

Reciclagem secundária de rejeitos de porcelanas elétricas em estruturas de concreto

K. F Portella, LACTEC, A. Joukoski, LACTEC, O. Baron, LACTEC e A. Sales, UFSCar

RESUMO

Seis traços de concretos foram estipulados com rejeitos de porcelana, variando-se os agregados graúdos e miúdos artificiais de 0% a 100%. Todos foram comparados a um traço básico de concreto convencional. O consumo de cimento CII-F 32 e a relação água/cimento foram considerados, para postes e cruzetas, como sendo 350 kg/m³ e 0,50,0 respectivamente. O material foi avaliado por técnicas analíticas, tais como: DRX, DTA, MEV, resistência mecânica, etc. Dos resultados, pode-se destacar: i) o material é facilmente britado; ii) é potencialmente reativo e os mecanismos de reação deverão ser melhores entendidos; iii) é facilmente trabalhável até cerca de 80% de rejeitos. Acima, é recomendado para contrapisos ou para CCR (com estudo prévio de dosagem); iv) os melhores traços foram obtidos entre 20% e 50%; e v) há necessidade de estudos em resistência mecânica à tração na flexão. Constatou-se que a disposição pretendida é viável economicamente e é ambientalmente correta.

PALAVRAS-CHAVE

reciclagem secundária; rejeitos de porcelana; concreto; dosagem; reações expansivas

I. INTRODUÇÃO

Entulhos da construção civil e de outras indústrias tecnológicas que geram resíduos sólidos, principalmente inertes, ainda têm o mesmo destino final que o do lixo doméstico, ou seja, os aterros sanitários. Milhares de toneladas anuais destes materiais têm sido geradas. Dados estatísticos apresentados por John, V. M. [1] mostram que a geração diária de resíduos sólidos domésticos no Brasil atinge números da ordem de 0,7 kg/habitante e que destes, entre 41% e 70%, são resíduos de construção e demolição (RCD).

Os recursos naturais extraídos do planeta são consumidos entre 14% e 50% pela construção civil e, segundo John, V. M. [1] no Brasil, é estimado um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados.

Não se tem uma estatística oficial geral do consumo anual de porcelanas elétricas produzidas e consumidas. No Paraná há cerca de 160.000 km de linhas de redes de distribuição. Fazendo-se uma projeção de 60 isoladores de 1,2 kg/unidade (médio) e por km de linha, tem-se um passivo em torno de 11.000 toneladas, considerando a vida útil destes componentes. Apesar de ser inerte, este passivo torna-se um problema significativo para o impacto ambiental.

Fazendo-se uma extrapolação para o Brasil, poderia se estimar um consumo mínimo 15 vezes maior. Deste número, pode-se considerar cerca de 10% a mais de resíduos gerados na própria fábrica, devido aos defeitos de queima entre outros problemas de fabricação, ou seja, o passivo estaria na ordem de 190.000 toneladas. O teor é pequeno se comparado à demanda de recursos naturais, mas somando-se a outros resíduos de construção e demolição, haverá, anualmente, significativa diminuição dos rejeitos em aterros sanitários e produtos ambientalmente corretos.

As porcelanas elétricas são fabricadas a partir de composições triaxiais de sílica, argila e feldspato e contêm como características principais as relacionadas na Tabela I, listadas em conjunto com os valores mínimos e máximos obtidos para alguns dos materiais utilizados como agregados para concreto [2,3,4]. Uma característica essencial da porcelana elétrica para alta tensão é a ausência de poros abertos e, a quantidade de poros fechados tão baixa quanto possível, sendo que estes deveriam estar preferencialmente ausentes[2]. Os valores medidos de porosidade pelo método de absorção de água não deveriam ser maiores do que 0,1% em porcelanas elétricas usadas em alta tensão. Para baixa tensão, o índice de poros (poros abertos ou comunicantes) deveria ser inferior a 2% [2]. A NBR 5032 [4] recomenda que os corpos-de-prova de porcelana não apresentem penetração de fucsina, que é um indicativo de trincas e poros abertos ou comunicantes.

TABELA 1
propriedades das porcelanas para fins elétricos (isoladores) e de alguns materiais usados como agregados para concreto [2, 3, 4].

Características	Porcelana	Basalto	Granito
Massa específica, kg/m ³	2,3 a 2,5	2,6 a 3,0	2,6 a 3,0
Absorção de água, %	0 a 3, >0,1	-	-
Resistência à compressão, MPa	240 a 820	201 a 377	114 a 257
Porosidade, %	0 a 2	-	0,4 a 3,8
Expansão térmica, 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	3,5 a 9,1	3,6 a 9,7	1,8 a 11,9

K. F. Portella – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC; - e-mail: portella@lactec.org.br;

A. Joukoski – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC; - e-mail: alex@lactec.org.br

O. Baron – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC; - e-mail: baron@lactec.org.br;

A. Sales – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar; e-mail: almir@lactec.org.br.

O vidrado superficial das saias da porcelana pode ser potencialmente reativo com os cimentos comumente utilizados, produzindo reações expansivas, trincas e diminuição da resistência mecânica final. O material de base do vidrado pode conter ferro, cromo e manganês ou zircônio, cobalto e níquel, para as cores marrom e cinza, respectivamente, bem como outros constituintes como o quartzo, feldspato e caulim. Além da composição química, outro problema relacionado ao vidrado é que a região polida prejudica a aderência com a pasta de cimento, sendo local preferencial de fratura [5].

Agentes cimentantes à base de enxofre, utilizados para fixação das ferragens às saias de isoladores, são componentes indesejados pela tendência em reagir com os álcalis do cimento e pela dificuldade em separá-los da matéria-prima, elevando-se o custo final da imobilização. Estas reações normalmente resultam em expansões e trincas das estruturas de concreto [3].

II. EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento do presente projeto, foram adquiridos os seguintes materiais:

- CII-F 32 - cimento Portland composto com adição de filler carbonáceo, com resistência característica de 32 MPa (mín.) aos 28 dias;
- Agregado graúdo – brita 1;
- Agregado miúdo - areia natural lavada; e
- Rejeitos de porcelana.

Os agregados artificiais foram obtidos pelo processo de britagem dos rejeitos dos isoladores de porcelana em britador do tipo mandíbula, marca Metalúrgica Tamandaré, modelo Brit 3. A dimensão máxima obtida do agregado foi de 19 mm. O estudo granulométrico foi baseado na NBR 7217 [5].

As análises físico-químicas e mecânicas do cimento foram realizadas conforme as normas brasileiras e outras referências da literatura. Os objetivos básicos foram identificar e determinar quantitativamente os principais compostos químicos presentes e, pelas caracterizações físicas e mecânicas, verificar se o produto se encontra dentro do especificado pelo fabricante.

Os ensaios de caracterização dos agregados foram feitos segundo normas ABNT correlacionadas, tendo como objetivo principal verificar a qualidade das matérias-primas e subsidiar os cálculos para o desenvolvimento dos traços dos concretos trabalhados.

Os ensaios realizados para caracterização da areia natural e brita 1 têm como objetivos, qualificar os materiais, o teor de impurezas e subsidiar os estudos de dosagens.

Microscopia eletrônica de varredura, MEV, com microsonda analítica de raios X, EDS. As superfícies de fratura e/ou polidas dos CPs de concreto foram metalizadas e analisadas quanto à micrografia e composição química elementar. O equipamento para a análise é da marca Philips, modelo XL30, equipado com microsonda analítica de raios X, EDS.

Dosagens. Foram efetuados seis estudos de dosagens, sendo: um considerado padrão, com brita 1 e agregado miúdo (areia natural); e seis contendo misturas com os agregados artificiais (isoladores britados), graúdos (granulometrias entre 19 e 4,8 mm, e miúdos (< 4,8 mm).

Como parâmetro principal na estipulação dos traços, foi adotado o fator a/c como sendo fixo e igual a 0,5. Outros parâmetros fixados foram o teor de agregado miúdo (40,4%) e a relação cimento/agregado total de 1:5. Para cada dosagem, com o concreto fresco foram realizadas determinações do abatimento do tronco de cone (*slump*).

A moldagem dos CPs para os diversos ensaios, seguiu a NBR 5738 [6].

Resistência à compressão axial simples. Foram moldados CPs para a medida da resistência à compressão axial simples, nas dimensões e procedimentos recomendados pela norma NBR 5739/94 [7], sendo 2 CPs por idade, aos 3, 7, 14, 28 e 77 dias. Até a data da ruptura os CPs foram mantidos em câmara úmida a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, e umidade relativa mínima de 95%.

Reatividade potencial do concreto. A reatividade potencial foi analisada segundo método adaptado e implantado no LACTEC/LAME, número 1.02.01.11, tendo como base as seguintes normas complementares: NBRI [8], NBR NM-ISO 3310-1/97 [9], NBR 9773/87 [10], ASTM C -1260/94 [11] e NBR 7215/96 [12] onde CPs prismáticos foram submetidos ao envelhecimento acelerado, principalmente pelo fato de haver presença de resíduos de enxofre nos rejeitos, entre outros materiais reativos (vidrado superficial à porcelana).

Propriedades físicas do concreto. A massa específica, o teor de absorção de água por imersão, e o índice de vazios foram medidos segundo recomendações das normas NBR9778/87 [13].

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na caracterização físico-química do cimento foi constatada a presença de Na_2O equivalente igual a 0,81. Este teor está acima do recomendado na literatura [14] e poderá ser um fator decisivo em reações do tipo álcali-agregado. A composição química restante está dentro do especificado para o tipo de cimento.

A análise granulométrica dos agregados, expressas em termos das porcentagens passantes acumuladas em cada peneira encontram-se dentro do recomendado pela norma NBR 7211/83 [15], exceto os teores de matéria orgânica e material pulverulento da areia. A análise físico-química das amostras teve como resultados os seguintes teores médios:

- Materiais pulverulentos (NBR 7219/87 [16]) – 0,5% e 3,2%. O primeiro valor encontra-se dentro do recomendado pela norma NBR 7211/83 [17], para a brita. A amostra de areia apresentou teor acima do estabelecido na norma, que é de 3,0%;
- Torrões de argila e materiais friáveis (NBR 7218/87 [18]) – 0,1%. O valor limite máximo recomendado é de 3,0%, segundo a NBR 7211/83 [15];

- Índice de matéria orgânica (NBR 7220/87 [19]). O valor determinado foi maior do que o valor limite máximo estipulado na NBR 7211/83 [15] que é de 300 ppm (partes por milhão);
- Massa específica (SSS) e absorção de água (NBR NM 30/01 [20]) – a massa específica resultante foi de 2,61 g/cm³ para ambos os agregados e a absorção de 0,4% e 0,8% para a brita e areia, respectivamente. Todos os parâmetros são importantes para o cálculo final da dosagem e definição do traço característico.

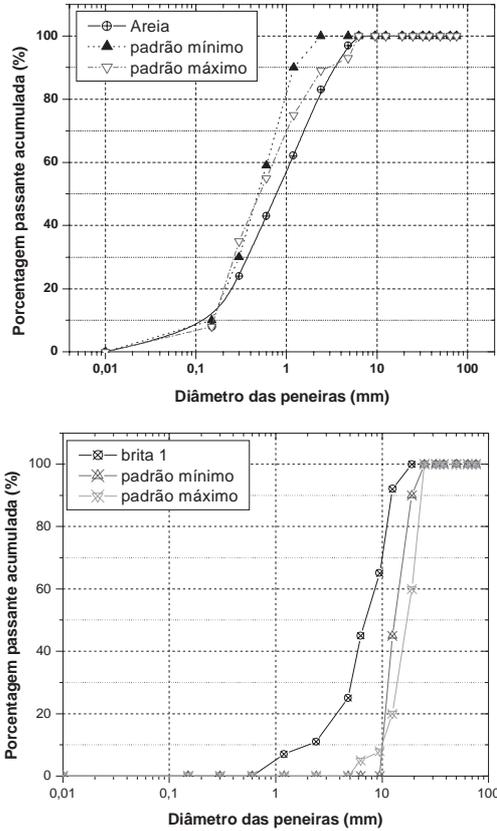


FIGURA 1 - Curvas granulométricas dos agregados.

Os agregados artificiais, após britagem, estão mostrados na Figura 2. Inicialmente, foi feita a retirada manual das ferragens.

Pela NBR 10.004/87 [21] tais resíduos estão classificados como “resíduo sólido, classe III, inertes”.



FIGURA 2 - Agregados de porcelana britados em britador tipo mandíbula.

Os resultados da caracterização física dos rejeitos de porcelana usados como agregados artificiais estão reunidos na tabela II.

TABELA 2
Resultados de análises físico-químicas realizadas nos agregados artificiais.

Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)	Massa específica (g/cm ³)
0,69 ± 0,30	0,30 ± 0,13	2,29 ± 0,06

Os resultados estão de acordo com os valores encontrados na literatura [2]. Os índices de absorção de água medidos mostram que há mistura de porcelanas ou que estas não estão em conformidade com a norma [2, 4], uma vez que, seria esperado um teor de absorção d’água inferior a 0,1% se os materiais fossem utilizados para linhas de alta tensão.

O ensaio, sob envelhecimento acelerado, para a reatividade potencial com o cimento Portland CII-F 32, resultou em valores acima dos recomendados pela norma ASTM C-1260/94 [22]. Mesmo aos 28 dias, as expansões observadas mostraram ser potencialmente deletérias, como pode ser verificado no gráfico da Figura 3, onde os limites em expansibilidade aos 16 (indicado, também, com seta) e 28 dias estão indicados pelas linhas a 0,10% e 0,20%, respectivamente.

A proporção ideal dos componentes naturais (brita e areia) e artificiais (agregados provenientes da moagem dos isoladores de porcelana), britados em granulometrias similares, foi obtida variando-se a concentração dos mesmos em quantidades que vão desde 0% a 100%, tanto na fração de agregados graúdos quanto miúdos. Os valores correspondentes estão mostrados na Tabela III e os detalhes de cada dosagem, descritos nas observações gerais, logo após a mesma. Este estudo fundamentou-se na questão do custo e do benefício da reciclagem secundária dos rejeitos de porcelanas elétricas, na trabalhabilidade, aplicação e resistência mecânica do material obtido.

A durabilidade será objeto de estudo na segunda fase deste projeto.

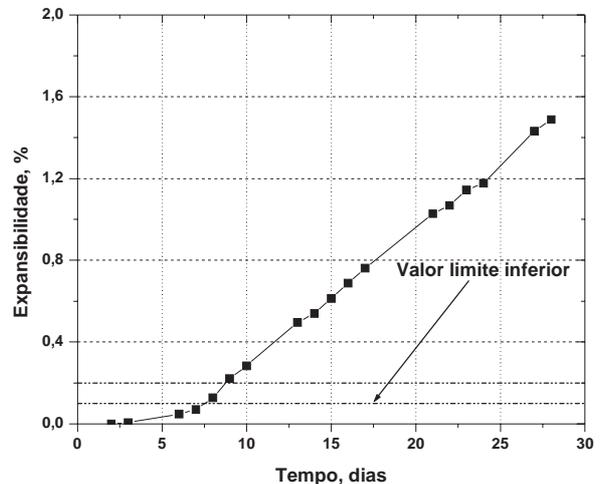


FIGURA 3 - Reatividade potencial dos agregados artificiais com o cimento Portland CII-F 32.

TABELA 3

Resumo das dosagens realizadas.

Dosagem	1038	1039	1040	1041	1042	1044
a/c	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Dm _{ax} , mm	19	19	19	19	19	19
Teor agreg. miúdo, %	40,4	40,4	40,4	40,4	40,4	40,4
Consumos, kg/m ³						
cimento	364	356	350	342	336	351
areia nat.	736	542	354	175	-	710
areia artif.	-	182	354	520	679	-
brita nat.	1085	798	522	257	-	-
brita artif.	-	267	522	767	1002	1046
água	183	178	176	171	169	176
Abatimento, mm	65	30	17	7	1	30
Massa unitária, kg/m ³						
teórica	2373	2326	2290	2246	2213	2268
real	2366	2309	2272	2219	2180	2276
Ar incorp. teor., %	0,3	0,7	0,8	1,2	1,5	-
Temp. concreto, oC	14,3	15,8	16,7	17,3	17,5	17,5

Observações gerais:

- **Traço E-1038:** traço padrão para referência e comparação de resultados, utilizando apenas agregados naturais (areia média e brita 1);
- **Traço E-1039:** dosagem utilizando 25% de agregados artificiais (parcelas graúda e miúda de rejeitos de porcelana) e 75% de agregados naturais, mantendo-se as proporções entre as partes graúda e miúda de ambos os agregados;
- **Traço E-1040:** dosagem utilizando 50% de agregados artificiais e 50% de agregados naturais;
- **Traço E-1041:** dosagem utilizando 75% de agregados artificiais e 25% de agregados naturais **traço E-1042:** dosagem utilizando apenas agregados artificiais, nas mesmas proporções do traço contendo somente agregados naturais; e
- **Traço E-1044:** traço apresentando a parcela miúda composta totalmente por agregados naturais (areia média) e a parcela graúda composta integralmente por agregados artificiais (parcela graúda de rejeitos de porcelana).

Na figura 4 é mostrado gráfico ilustrando os resultados obtidos para a resistência à compressão, em relação ao teor de agregados reciclados utilizado e para distintas idades de ruptura.

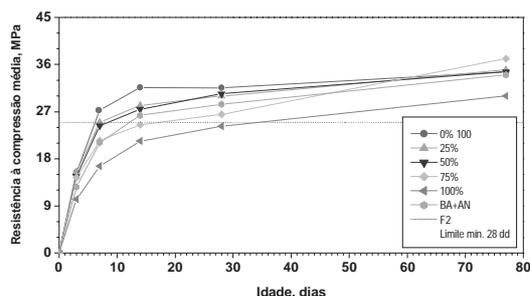


FIGURA 4 - Resistência à compressão dos traços de concreto em função da idade dos CPs.

Observa-se que, em relação ao concreto-referência, a resistência nas primeiras idades é menor, mas ao longo do tempo esta passa a se igualar.

Pela metodologia estudada pode-se considerar que os melhores traços, para as aplicações desejadas, são aqueles com teores de agregado reciclado compreendidos entre 20% e 80%, sendo o limite máximo estipulado pelo *slump*.

IV. CONCLUSÃO

Constatou-se no trabalho que a disposição dos rejeitos de porcelana em estruturas de concreto é viável economicamente e é ambientalmente correta, já que não há perigos de contaminações futuras, já que são praticamente inertes.

Alguns dos principais aspectos, foram considerados. Dentre estes, destacam-se:

1. os rejeitos de porcelana, como recebidos e britados, são potencialmente reativos e seus mecanismos de reação deverão ser melhores entendidos. Parte da reatividade potencial pode ser proveniente do agente cimentante à base de enxofre;
2. o concreto é facilmente trabalhável até as adições de agregados artificiais próximas de 80% (limite inferior no abatimento de tronco de cone de 15 mm);
3. teores entre 20% e 50% de agregados artificiais graúdos e miúdos foram considerados os mais indicados, utilizando o cimento CII-F 32 e com a relação a/c de 0,50. Foram obtidas resistências à compressão entre 26,5 e 30 MPa, aos 28 dias;
4. verificou-se a necessidade de estudos mais aprofundados em resistência mecânica à tração na flexão (planos de fratura na superfície vidrada da porcelana).

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Paranaense de Energia – COPEL DIS; ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC; à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, pelo apoio recebido, confiança depositada, liberação de recursos financeiros e disponibilização da infra-estrutura, para a realização e finalização deste projeto de pesquisa; e a todos aqueles profissionais que, de forma direta e indireta, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. M. John Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese de livre docência. Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2000.
- [2] J.S.T.Looms. "Insulators for High Voltages", London, 1988.
- [3] M. NEVILLE, Propriedades do concreto. Tradução S. E. Giammusso. 2ª. edição, Editora PINI Ltda., São Paulo, 1997. 828 p.

- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “Coletânea de Normas de Isoladores”. Comitê Brasileiro de Eletricidade, ABNT. Rio de Janeiro, 1989.
- [5] ABNT, NBR 7217. Determinação da composição granulométrica dos agregados, 1982. 3 p.
- [6] NBR 5738/94 – “Moldagem e cura de corpos de prova, cilíndricos ou prismáticos – Procedimento”, 1994.
- [7] NBR 5739/94 – “Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto - Método de ensaio”, 1994.
- [8] NBRI - Oberhtoster, R.: E. and Davis, G.: Accelerated Method of Testing the Potencial Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates - National Building researsh Institute Council for Scientific and Industrial Research - Vol. 16, PP 181, 189 - 1986.
- [9] NBR NM-ISO 3310-1/97, Peneiras de Ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1 : Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.
- [10] NBR 9773/87. “Agregado – Reatividade potencial de álcalis em combinações cimento-agregado. Rio de Janeiro, 1987.
- [11] ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Testing and Materials. ASTM C-1260/94. Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (mortarbar method). Philadelphia, 1997. section 4 Construction), v.04.02 (Concrete and Aggregates).
- [12] ABNT, NBR 7215. Ensaio de cimento Portland, 1996. 20 p.
- [13] NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. ABNT, 1987. 5 pg.
- [14] H. F. W. TAYLOR, Cement chemistry. Academic Press, New York, 1990.
- [15] NBR 7211/83. “Agregado para concreto – Especificação”, 1983. 9 p.
- [16] NBR 7219/87 – “Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados - Método de ensaio”, 1987.
- [17] NBR 7211/83. “Agregado para concreto – Especificação”, 1983. 9 p.
- [18] NBR 7218/87 – “Determinação do teor de argila em torrões nos agregados - Método de ensaio”, 1987.
- [19] NBR 7220/87 – “Avaliação das impurezas orgânicas húmicas das areias para concreto - Método de ensaio”, 1987.
- [20] NBR NM 30/01 – “Agregado miúdo – Determinação da absorção de água”, 2001.
- [21] ABNT, NBR 10.004. Resíduos sólidos, 1987. 48 p.
- [22] ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – American Society for Testing and Materials. ASTM C-1260/94. Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 1994.