

AValiação DA REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO DE AREIAS DE BRITAGEM DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA, BRASIL

H. N. COSTA

Mestranda Eng.º Civil
PEC, UFC
Fortaleza; Brasil
heloinan@hotmail.coM

A. J. R. MENEZES

Mestrando Eng.º Civil
PEC, UFC
Fortaleza; Brasil
alexandre-bl@hotmail.com

J. M. L. BARRETO

Mestrando Eng.º Civil
PEC, UFC
Fortaleza; Brasil
mauriciobarreto@ufc.br

A. E. B. CABRAL

Prof. Dsc. Eng.º Civil
PEC, UFC
Fortaleza; Brasil
eduardo.cabral@hotmail.com

RESUMO

A investigação do potencial de reatividade álcali-agregado (RAA) visa identificar as propriedades físicas e químicas governadas pela composição mineralógica, textura, estrutura interna e grau de alteração das rochas que compõem os agregados. A RAA é um processo químico que envolve os íons alcalinos e íons hidroxilas provenientes do cimento e certos constituintes mineralógicos do agregado, inseridos em um meio propício à reação. Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre as características mineralógicas e o potencial de reatividade álcali-agregado em areias de britagem utilizadas no concreto. Foram utilizadas areias oriundas de seis pedreiras localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza para identificação das características mineralógicas e ensaio de expansibilidade. Os resultados indicam que as areias de britagem estudadas podem ser consideradas potencialmente inócuas.

1. INTRODUÇÃO

O uso de areias provenientes do processo de britagem de rochas é crescente na Região Metropolitana de Fortaleza – Brasil, por isso, é fundamental a identificação de suas características físicas e químicas, para que seja atestada sua utilização no concreto, sem o risco de manifestações patológicas ao longo de sua vida útil. Sabe-se que os agregados, tanto graúdo como miúdo, quando reativos, em contato com os hidróxidos alcalinos formados no processo de hidratação do cimento Portland no concreto podem desencadear uma reação química, denominada reação álcali-agregado [1]. Um dos principais sintomas da RAA é a fissuração, devido à pressão imposta pelo gel expansivo formado pela reação, isto provoca alterações nas propriedades mecânicas do concreto, assim como, pode favorecer o aparecimento de carbonatação e conseqüentemente a corrosão das armaduras, ainda pode ocorrer eflorescências e exsudações na superfície do concreto.

Desde seu primeiro diagnóstico em 1940 nos Estados Unidos, diversas pesquisas nos mais diversos locais do mundo foram realizadas, assim, foram identificados os fatores condicionantes para a ocorrência de RAA [2], sendo eles: alcalinidade suficiente elevada da solução intersticial; existência de agregados reativos com concentrações dentro de uma faixa crítica; umidade elevada; temperatura, sendo maior a expansão quanto maior a temperatura; granulometria, sendo maior a força de expansão à medida que diminui a superfície específica do material e estrutura mineral presente no agregado desorganizada e instável [2-3-4].

São conhecidas três tipos de reações álcali-agregado, sendo elas, reação álcali-sílica (RAS), reação álcali-silicato (RASS) e reação álcali-carbonato (RAC). Portanto, a reação álcali-sílica apresenta maiores índices de ocorrência no

Brasil e em diversas partes do mundo. Esta reação é ocasionada pela interação entre os hidróxidos alcalinos do cimento e certas formas de sílica reativa presente no agregado, que são suscetíveis ao ataque dos íons alcalinos, o que pode ocasionar a dissolução do agregado [5]. A forma de ataque no concreto envolve a despolimerização ou quebra da estrutura de sílica do agregado por íons hidroxilas (OH^-) seguida pela adsorção de íons metálicos – alcalinos (Na^+ e K^+) na superfície recém criada dos produtos da reação. Assim, forma-se o gel, produto da reação, que se expande, devido a uma grande absorção de água através de osmose [6]. Quando a sílica é bem cristalizada, os íons hidroxilas atacam somente na superfície externa, mas no caso de sílica fracamente cristalizada, se torna particularmente vulnerável ao ataque, devido a sua maior área de contato e estrutura desordenada, sendo mais vulneráveis as fases microcristalinas, criptocristalinas e amorfas [7]. A reação álcali-sílica em agregados é geralmente avaliada por testes laboratoriais normatizados, como o método acelerado para determinação da expansão em barras de argamassa, método da expansão em prismas de concreto, método químico, entre outros. A caracterização mineralógica das rochas componentes dos agregados pode ser realizada por análise petrográfica em conjunto com técnicas complementares como a difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, análise térmico diferencial e espectrometria por energia dispersiva. Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre as características mineralógicas e o potencial de reatividade álcali-agregado em areias de britagem utilizadas no concreto, por meio de análise petrográfica associada à difração de raios X e teste laboratorial de determinação de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

2. REATIVIDADE DOS AGREGADOS

Mather [8] aponta que a escolha de agregados para o concreto deve partir da indagação sobre a origem dos mesmos e se estes apresentariam componentes que os tornassem potencialmente deletério, pois, na ocorrência de material reativo, o seu uso acarretaria um incremento nos custos da construção, tendo em vista, a necessidade da utilização de cimento de baixa alcalinidade, com adições pozolânicas e escórias, com a finalidade de inibir a reação. Portanto, a formação geológica das rochas envolve diversos processos e alterações ao longo dos anos, o que diversifica as características de rochas de uma mesma jazida, além do mais, no processo de exploração das jazidas, conforme Locati et al [9], os materiais diferentes são misturados, principalmente na moagem das rochas.

A composição mineral e a textura das rochas são alteradas pela ação da temperatura e pressão, que variam conforme a profundidade a qual se encontram. Nesse processo de formação, algumas rochas podem desenvolver-se em zonas de cisalhamento, sofrendo pressões não – coaxiais e variáveis taxas de deformação, assim, formam-se rochas de diferentes níveis de ductilidade, algumas mais frágeis, apresentando falhas e ranhuras. Em geral, um maior grau de deformação interna da rocha, experimenta uma expansão maior no concreto, que pode ser atribuída ao desenvolvimento de descontinuidades na estrutura cristalina [9]. A norma brasileira NBR 15577-3[10] especifica os principais materiais reativos encontrados nas rochas que podem causar reação álcali-sílica, muitos deles diagnosticados como reativos em trabalhos experimentais em diferentes lugares do mundo [8-9-11-12-13-14-15], sendo estes, a opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico, assim como, a calcedônia, quartzo microcristalino e criptocristalino, quartzo granular com o retículo cristalino deformado, rico em inclusões, intensamente fraturado, com quartzo microcristalino no contato do grão. As principais rochas de ocorrência contendo opala são o folhelho, renito, cherts, flints e diatomito. As rochas vulcânicas contendo vidro são o riolito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana, alguns basaltos e todas as variedades com matriz vítrea. As rochas reativas contendo quartzo são as mais numerosas, por ser este o mineral considerado mais abundante na Terra, são exemplos dessas rochas o veio de quartzo, quartzito, arenito, calcário silicoso, rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino, rochas micro ou macrogranulares que contenham quartzo micro ou criptocristalino ou uma quantidade significativa de quartzo tensionado, ainda podem apresentar materiais reativos de quartzo, rochas ígneas como o granito, granodiorito e charnockito, rochas sedimentares como grauvaça, siltito, arcóseo e rochas metamórficas como gnaisse, quartzo-mica xisto, filito e ardósia.

No concreto, a reatividade desses materiais está relacionada ao teor de sílica reativa ou amorfa disponível nos mesmos. De acordo com Michel et al [11] dependendo da quantidade de sílica reativa presente no agregado, este pode ser classificado como não reativo, potencialmente reativo e reativo. Para os agregados potencialmente reativos o uso de cimentos com teor alcalino equivalente ($0,658 \text{ K}_2\text{O}\% + \text{Na}_2\text{O}\%$) inferior a 0,9% não resultará em expansão no concreto. Acredita-se que o agregado para ser considerado reativo deve apresentar um teor superior a 4% de sílica reativa, isto ainda não é fenômeno claro e sua quantificação exige um aprofundamento no estudo geológico da rocha matriz. Entre os materiais mais reativos, são apontadas a opala, o chert e o vidro vulcânico, porém, são pouco usados como agregado, por outro lado, o quartzo, devido sua abundância, está presente na formação da maioria dos agregados utilizados no concreto. São as formas de sílica reativa presente no quartzo as principais responsáveis pela reação álcali-

Tabela 2 – Caracterização química das areias de britagem.

Elemento químico	Areias de britagem					
	A	B	C	D	E	F
	% concentração dos principais elementos químicos					
Si	38,74	53,24	54,66	54,58	44,52	55,51
K	8,22	14,83	15,55	18,85	17,36	14,21
Al	12,00	9,153	8,56	10,96	14,54	9,44
Fe	20,40	11,17	10,34	7,21	10,15	10,26
Ca	14,83	8,63	8,82	6,14	5,73	8,96
Na	-	-	-	-	4,55	-
Ti	3,06	2,14	1,62	1,08	1,16	1,05
Mn	0,68	0,30	0,26	-	0,73	0,38
Outros	2,02	0,49	0,16	1,12	1,21	0,16

O cimento utilizado no teste de expansibilidade está especificado na tabela 3. A norma 15577-4 [27] estabelece o equivalente alcalino total ($0,658K_2O + N_2O$) igual a $(0,90 \pm 0,10)$ % e a finura igual a (4900 ± 200) cm^2/g , portanto, o cimento utilizado atende as exigências da específica norma.

Tabela 3 – Caracterização química das areias de britagem.

Ensaio	Resultados
Massa retida na peneira #325 - % [21]	16,90
Massa Especifica - g/cm^3 [22]	2,92
Módulo de finura - cm^2/g [23]	4730
Equivalente Alcalino total - % [24]	0,954

3.2 Caracterização mineralógica

Foi realizada análise petrográfica por microscopia óptica de luz transmitida, em fatias de rocha (lâminas delgadas), de áreas de aproximadamente 4,0 cm x 2,5 cm e espessuras da ordem de 0,03 mm, conforme a NBR 15577-3 [25]. Complementarmente, foi realizada difração de raios X, com o objetivo de identificar fases cristalinas de quartzo presentes nas areias.

3.3 Ensaio de expansão

O teste de expansibilidade foi realizado através do método acelerado em barras de argamassa, conforme a NBR 15577-4 [26].

4. RESULTADOS

A classificação petrográfica das areias de britagem está apresentada na tabela 4. Foram identificados três tipos de rochas ígneas: monzogranito, monzodiorito e fonólito. Conforme Vidal *et al* [27] são rochas cristalinas datadas do período pré-cambiano, estas rochas formam grande parte do terreno geológico do estado do Ceará, inclusive da Região Metropolitana de Fortaleza, onde estão localizadas várias jazidas de agregados para a construção civil. As areias de britagem caracterizadas como monzogranito estão localizadas nas cidade de Caucaia (areia C e F) e Pacatuba (areia A), as areias classificadas como monzodiorito estão localizadas nas cidades de Caucaia (areia B) e Itatinga (areia D). Ambos os tipos de rochas tem sua formação mineral predominante composta por quartzo, feldspatos (microclina, plagioclásio e apatita) e mica (muscovita e biotita). A rocha fonólito, cuja jazida está localizada na cidade de Eusébio, é composto essencialmente por uma matriz de feldspatos potássicos e piroxênios.

Tabela 4 – Classificação petrográfica das areias de britagem.

Areia	Tipo de rocha	Classificação petrográfica	Textura	Minerais principais	Minerais acessórios
A	Ígnea	Monzogranito	Inequigranular	Microclina, plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, minerais opacos.	Apatita
B	Ígnea	Monzodiorito	Inequigranular	Microclina, plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, minerais opacos.	Apatita
C	Ígnea	Monzogranito	Inequigranular	Microclina, plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, minerais opacos.	Apatita
D	Ígnea	Monzodiorito	Inequigranular	Microclina, plagioclásio, quartzo, biotita, hornblenda, muscovita, minerais opacos, sericita.	Apatita
E	Ígnea	Fonólito	Porfírica	Feldspato potássico, piroxênio, hornblenda, nefelina, olivina, opacos.	Apatita
F	Ígnea	Monzogranito	Inequigranular	Microclina, plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, minerais opacos.	Apatita

De acordo com a identificação mineral e análise textural das amostras estudadas, o quartzo é o mineral que pode oferecer risco de reatividade álcali-sílica no uso no concreto das areias de britagem de origem das rochas monzogranito e monzodiorito. Na figura 2 apresenta-se o perfil de concentração dos minerais principais das rochas de origem das areias de britagem.

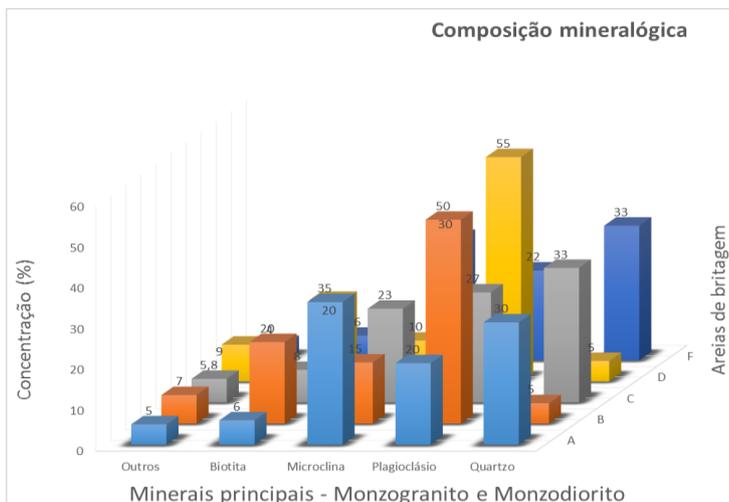


Figura 2- Composição mineral –monzogranito e monzodiorito.

O perfil de concentração dos minerais componentes da rocha fonólito, matriz da areia E, está apresentado na figura 3. Trata-se de uma rocha considerada vulcânica alcalina que pode apresentar material vítreo [27].

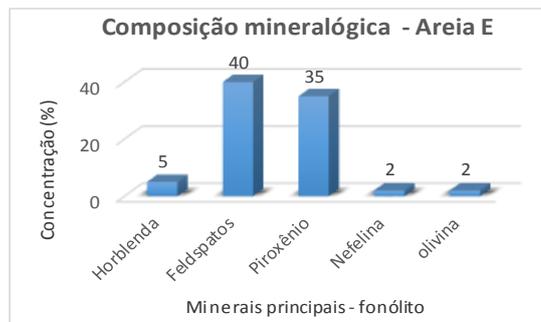


Figura 3 – Composição mineral – fonólito.

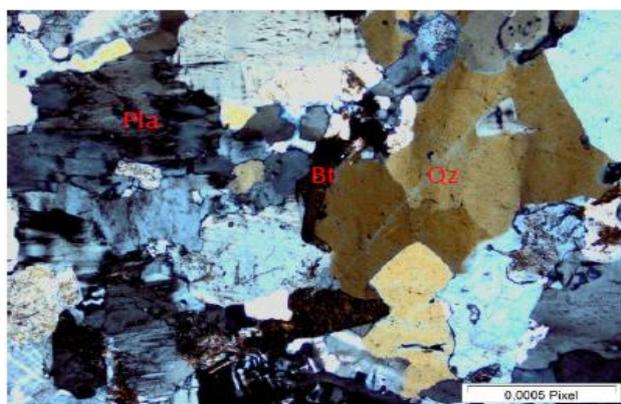


Figura 4 – Microscopia monzogranito - Qz (quartzo com extinção ondulante); Pla (plagioclásio); Bt (biotita).

Os cristais de quartzo apresentam maior concentração nas amostras de monzogranito, em análise microscópica apresentaram-se preservados em cristais de dimensões que variam entre 0,10 a 2 mm, porém exibiu extinção ondulante, conforme mostra a figura 4. A NBR 15577 -3 [25] aponta o quartzo deformado como possivelmente reativo, este é caracterizado como quartzo que apresenta deformações intracristalinas decorrentes de processos tectônicos e sob microscópio óptico de luz transmitida polarizada exibe extinção ondulante, bandas de deformação, subgrãos e outras feições. Poirier e Guilopé [28] e White [29] corroboram que, os defeitos na estrutura cristalina do quartzo, causadas por tensões que levam à deformações intracristalinas, são geralmente relacionados com os deslocamentos internos, sendo a extinção ondulante um exemplo deste fenômeno.

As figuras 5 e 6 apresentam a microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura da rocha fonólito, rocha matriz da areia E. Na figura 5 visualiza-se os cristais de nefelina e minerais opacos inseridos numa matriz formada de feldspatos potássicos e piroxênios.

Os difratogramas de raios X realizados nas amostras de areia de britagem estão apresentados nas figuras 7, 8, 9, 10, 11 e 12, para as areias A, B, C, D, E e F, respectivamente. O quartzo das areias C e F, que apresentou extinção ondulante, demonstra estrutura cristalina bem definida, conforme a alta intensidade dos picos formados no difratograma (figuras 9 e 12). O quartzo contido na amostra da areia A apresentou pico cristalino de menor intensidade (figura 7), portanto, a expansão verificada no ensaio de expansibilidade em barras de argamassa pelo método acelerado apresentou índice de 0,08% aos 30 dias de ensaio, inferior ao limite de 0,19%, sendo considerado como não reativo. O quartzo presente nas amostras das areias B e D, classificadas como monzodiorito, também apresentou extinção ondulante, porém com pouca representatividade. Os picos formados no difratograma dessas amostras mostram alta intensidade, indicando que o material tem estrutura cristalina bem definida (Figura 8 e Figura 10), embora a concentração de quartzo nessas amostras seja baixa em relação aos demais minerais (Figura 2).

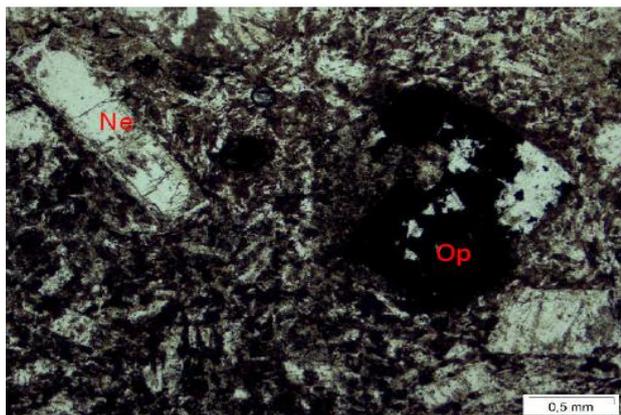


Figura 5 – Microscopia óptica fonólito - matriz de feldspato e piroxênio (nefelina -Ne e opacos -Op)

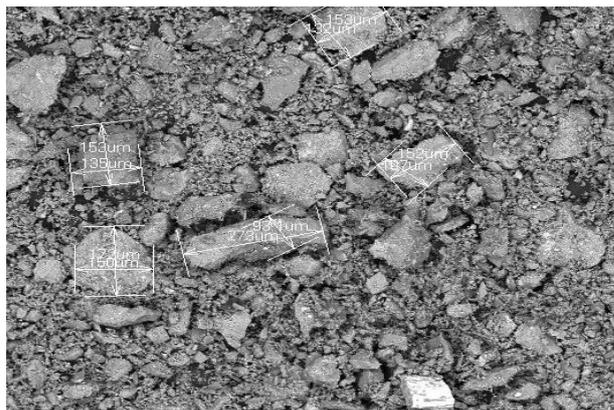


Figura 6 – Microscopia eletrônica de varredura -fonólito

O fonólito apresenta textura microcristalina, conforme a figura 6, as maiores partículas chegam a 273 μm . Segundo Cavalcanti e Parahyba [30], esta rocha quando possui texturas microcristalinas, material vítreo amorfo e apresenta composição alcalina significativa pode provocar reação com os álcalis do cimento. Portanto, o ensaio de expansão da areia E apresentou o menor índice de expansão entre as areias, igual a 0,04%. No difratograma realizado nessa amostra, conforme figura 11, os minerais principais como os feldspatos potássico e sódico e o piroxênio aluminoso apresentam características cristalina, não indicando a presença de material amorfo.

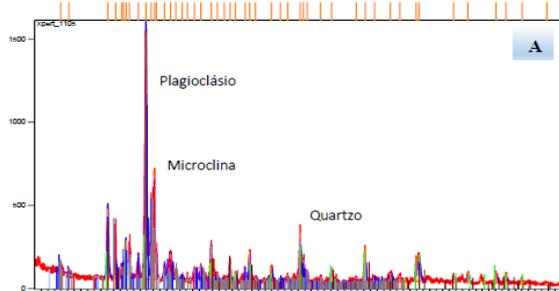


Figura 7 – Difratograma RX – areia A

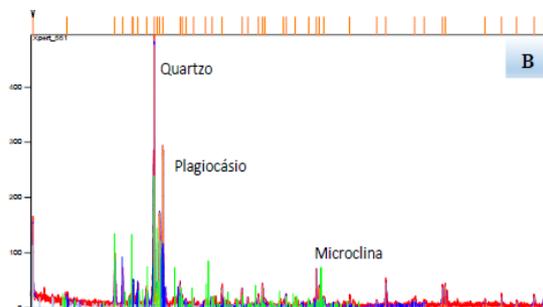


Figura 8 – Difratograma RX – areia B

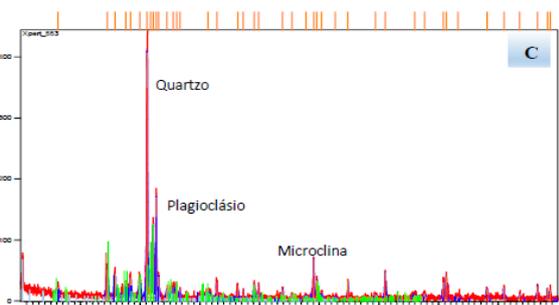


Figura 9 – Difratograma RX – areia C

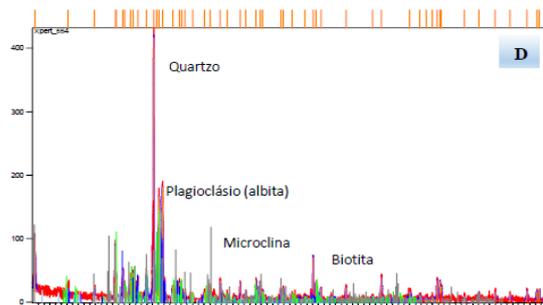


Figura 10 – Difratograma RX – areia D

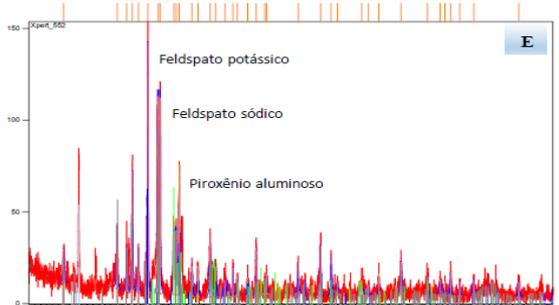


Figura 11 – Difratograma RX – areia E

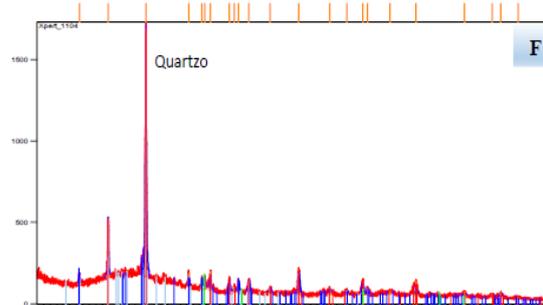


Figura 12 – Difratograma RX – areia F

Na figura 13 estão apresentados os resultados da expansibilidade das amostras de areia de britagem. O ensaio foi realizado através do método acelerado das barras de argamassa, conforme a norma brasileira 15577-4 [26]. Esta norma preconiza que para uma amostra ser considerada potencialmente inócua o valor máximo da expansão, aos 30 dias de ensaio, deve ser inferior a 0,19%, sendo considerado potencialmente reativo amostras que atingirem valores superiores a este.

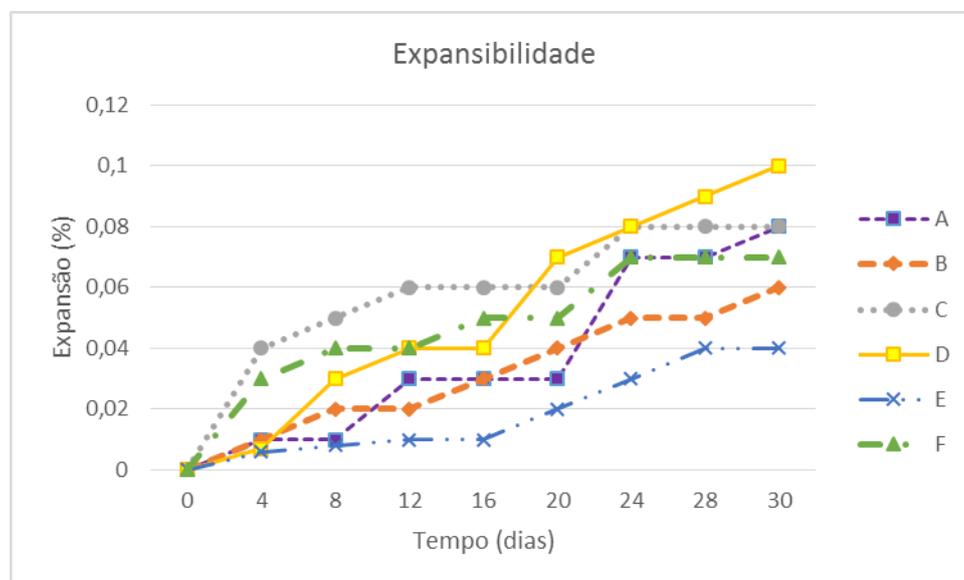


Figura 13 - Resultado da expansibilidade das amostras de areia de britagem.

Conforme a figura 13, o maior índice de expansão foi da areia D, cujas análises anteriores apontavam menor risco de reatividade. As areias A e C obtiveram o valor de 0,08%, a areia B teve valor de 0,06%, a areia F apresentou expansão igual a 0,07%, por fim, a areia E apresentou menor expansão igual a 0,04%. Portanto, como os valores obtidos nos ensaios realizados foram iguais ou inferiores a 0,10%, para esta análise, as amostras de areia de britagem analisadas podem ser consideradas inócuas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise petrográfica das amostras de monzogranito e monzodiorito identificou o quartzo com extinção ondulante, característica apontada no referencial teórico como indicativo de quartzo com deformações intercristalinas, que pode ser apontado como fator de risco para a reação álcali-silica, porém, os difratogramas de Raios X apontaram que as partículas de quartzo presente nas amostras apresentaram picos de cristalinidade bem definidos, o que caracteriza deformações pouco significativas para a estrutura interna do material. A rocha fonólito apresentou textura microcristalina, porém, a difração de raios X não identificou material amorfo.

O ensaio de expansibilidade aponta todas as amostras de areia como potencialmente inócuas, conforme preconiza a norma brasileira 15577-4[26].

A identificação de rochas potencialmente reativas através de aspectos geológicos, como textura e microestrutura, por microscopia e difração de raios X, ainda não é difundida no campo da construção civil, este tipo de análise vem sendo explorada na área de geologia, porém se utiliza de ferramentas e tecnologias específicas dessa área.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Tiecher, F. *et al* – “Influence of mesostasis in volcanic rocks on the alkali-aggregate reaction”. *Cement and Concrete Composites*, 2012, n° 34, pp. 1130-1140.
- [2] Krivenko, P. *et al*. Mechanism of preventing the alkali-aggregate reaction in alkali activated cement concretes. *Cement and Concrete Composites*, 2014, n° 45, pp 157-165.

- [3] Almeida, F.C.R. Sales, A. Efeitos da ação do meio ambiente sobre estruturas de concreto. In: Ribeiro, D. V. (organizador). Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [4] Kihara, Y. *et al.* “Avaliação Prática da Previsão da Reação Álcali-Silicato de Rochas Granitóides”. *Revista IBRACON de Materiais*. 2006, V.2, N.2.
- [5] García-Lodeiro, I. *et al.* “Alkali-aggregate reaction in active fly ash systems”. *Cement and Concrete Research*, 2007, V. 37, n° 2, pp 175-183.
- [6] Mehta, P.K. Monteiro, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 4ª edição. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [7] Glasser, L.S. Kataoka, N. “The Chemistry of 'Alkali-Aggregate' Reaction”. *Cement and Concrete Research*, 1981 Vol. 11 , pp 1-9.
- [8] Mather, B. “How to make concrete that will not suffer deleterious álcali-silica reaction”. *Cement and Concrete Research*, 1999, n° 29, pp 1277-1280.
- [9] Locati, F. *et al.* “Effect of ductile deformation of quartz-bearing rocks on the alkali-silica reaction”. *Engineering Geology*. 2010, n° 116, pp. 117-128.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15577-1: Agregados – Reatividade álcali-agregado: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.
- [11] Michel, B. *et al.* “Intérêt de la minéralogie des granulats dans la connaissance des risques de l’álcali-réaction”. *Bull Eng Geol Env*. 2003, n° 62, pp. 145-153.
- [12] Wakizaka, Y. “Alkali-silica reactivity of Japanese rocks”. *Engineering Geology*. 2000, n° 62, pp. 145-153.
- [13] Marinoni, N. *et al.* “Influence of aggregate mineralogy on alkali-silica reaction studied by X-ray powder diffraction and imaging techniques”. *J. Mater Sci*. 2012, n° 47, pp. 2845-2855.
- [14] Englinton, M.S. *et al.* “An unfamiliar alkali-agregado reaction from Trinidad”. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 1994, n° 27, pp. 363-373.
- [15] Sachlova, S. “Microstructure parameters affecting alkali-silica reactivity of aggregates”. *Construction and Building Materials*. 2013, n° 49, pp.604.
- [16] Wigum, B.J. “Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete”. *Engineering Geology*. 1995, n° 40, pp. 195-214.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248: Agregados-determinação da composição granulométrica . Rio de Janeiro, 2003.
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53: Agregado graúdo –determinação da massa específica, Massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- [19] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 30: Agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- [20] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 46: Agregados – determinação do material fino que passa Através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
- [21] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12826: Cimento Portland e outros materiais em pó – determina- ção do índice de finura por meio de peneirador. Rio de Janeiro, 2014.
- [22] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – determina- ção. Rio de Janeiro, 2001.
- [23] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 76: Cimento Portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.
- [24] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 10: Cimento Portland – Análise química–Disposições gerais. Rio de Janeiro, 2012.
- [25] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15577-3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade Reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro, 2008.
- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15577-4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.
- [27] Vidal, F.W.H. *et al.* Rochas e Minerais industriais do Estado do Ceará. Fortaleza: CETEM/UECE/ DNPM/ FUNCAP/ SENAI, 2005.
- [28] Poirier, J.-P., Guillopé, M., 1979. Deformation induced recrystallisation of minerals. *Bull. Minéral*. 102, 67–74.
- [29] White, S., 1973. The dislocation structures responsible for the optical effects in some naturally-deformed quartzes. *J. Mater. Sci*. 8, 490–499.
- [30] Cavalcanti, V. M M. Parahyba, R. E. R. Indústria de agregados para a construção civil na Região Metropolitana de Fortaleza. Fortaleza: DNPM, 2011.