

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE AGREGADOS GRAÚDOS DE PEDREIRAS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE, COM RELAÇÃO À RAS, FRENTE A DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND

Miguel Sebastião Maia chaves Arrais¹
Evenildo Bezerra de Melo²

1 Centro de Tecnologia e Geociências, Dep. de Geologia, Lab. Geologia e Geofísica
Marinha, UFPE, msarraes@terra.com.br

2 Centro de Tecnologia e Geociências, Dep. de Geologia, UFPE,
evenildodemelo@yahoo.com.br

RESUMO

Neste trabalho avaliou-se o potencial reativo, no que se refere à reação álcali-silicato, de quatro amostras de agregados graúdos utilizados na confecção de concreto na Região Metropolitana do Recife frente utilizando-se três tipos de cimento Portland: CP II-Z, CP IV e CP V-ARI. Para tal adotou-se a metodologia da NBR 15577/2008, incluindo microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de raios-X por energia dispersiva. Os resultados da análise petrográfica mostraram que todos os agregados estudados possuem minerais reativos. As expansões medidas no ensaio acelerado confirmaram a potencialidade reativa de três das quatro amostras de agregados. Apenas o cimento CP IV foi eficaz para inibir as expansões deletérias nas barras moldadas com os agregados potencialmente reativos. As observações por MEV/EDS mostraram que em todas as barras de argamassa houve a formação de gel sílico-alcálico, inclusive naquelas moldadas com o cimento CP IV. As maiores expansões ocorreram nas barras confeccionadas com as amostras de agregados provenientes de rochas graníticas milonitizadas, que apresentaram maior quantidade de quartzo microgranular.

Palavras chave: Reação álcali-silicato, tipo de cimento, reatividade dos agregados.

ABSTRACT

This study evaluated the reactive potential with respect to the alkali-silicate reaction, in four samples of coarse aggregate used in the manufacture of concrete in the Metropolitan Region of Recife against three types of cements: CP-Z II, IV and CP CP V-ARI. For this study it was adopted the methodology of NBR 15577/2008, including scanning electron microscopy coupled with X-ray spectroscopy energy dispersive. The results of petrographic analysis showed that all compounds studied have reactive minerals. The expansion measures in the accelerated test confirmed the potential of three of the four reactive aggregate samples. Only the cement IV CP was effective to inhibit the deleterious expansions bars molded with potentially reactive aggregates. The observations by SEM / EDS showed that in all mortar bars was the formation of alkali-silica gel, including those cast with cement CP IV. The largest increases occurred in bars made with the aggregate samples from mylonitic rocks, with a major amount of granular quartz.

Keywords: Alkali-silicate reaction, type of cement, reactivity of aggregates

INTRODUÇÃO

As reações álcali-agregado apresentam-se como uma das condicionantes da durabilidade das estruturas de concreto. São reações expansivas internas que se desenvolvem entre os constituintes reativos dos agregados e os íons alcalinos e hidroxilas presentes na solução intersticial do concreto.

As reações álcali-sílica, que envolvem rochas e minerais contendo fases reativas de sílica são consideradas atualmente a causa de deterioração precoce de um número cada vez maior de estruturas de concreto. Um caso considerado como particular das reações álcali-sílica é a reação álcali-silicato.

A adoção de agregados não reativos tem sido considerada a maneira mais eficiente de evitar a ocorrência da reação. Se por questões econômicas isso não for possível, uma boa alternativa é lançar mão de materiais que permitam a neutralização da reatividade como o cimento Portland pozolânico (Tiecher, 2006).

No Brasil, os estudos envolvendo a reação álcali-agregado, especialmente com relação à potencialidade reativa de agregados, são recentes e escassos. Valduga (2002) avaliou o potencial reativo de 36 amostras de agregados do Estado de São Paulo, concluindo que cerca de 60% das amostras são potencialmente reativas. Tiecher (2006) realizou estudo semelhante na região Sul do Brasil, concluindo que os agregados

utilizados para a produção de concreto naquela região tm grande potencial reativo, dependendo do tipo de cimento utilizado.

Na RMR - Região Metropolitana do Recife, a partir do evento relacionado com o Edifício Areia Branca, em 2004, embora a reação álcali-silicato não tenha sido a causa principal do desabamento, constatou-se a sua presença. Esse fato gerou grande preocupação no meio técnico-científico, o que suscitou o desenvolvimento de estudos sobre o problema, especialmente na RMR (Andrade, 2006).

Em função disso, o presente trabalho estudou alguns agregados graúdos e cimentos utilizados na produção de concreto na Região Metropolitana do Recife, especialmente no que se refere à potencialidade reativa dos agregados e avaliação do seu comportamento frente a três tipos de cimentos *Portland* com diferentes teores de adições (Arrais, 2011).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tendo em vista o objetivo da pesquisa, o programa experimental foi elaborado com a finalidade de avaliar o comportamento, com relação à RAS, de quatro amostras de agregados graúdos provenientes de pedreiras localizadas na RMR (Fig. 1), frente a três diferentes tipos de cimento *Portland*.

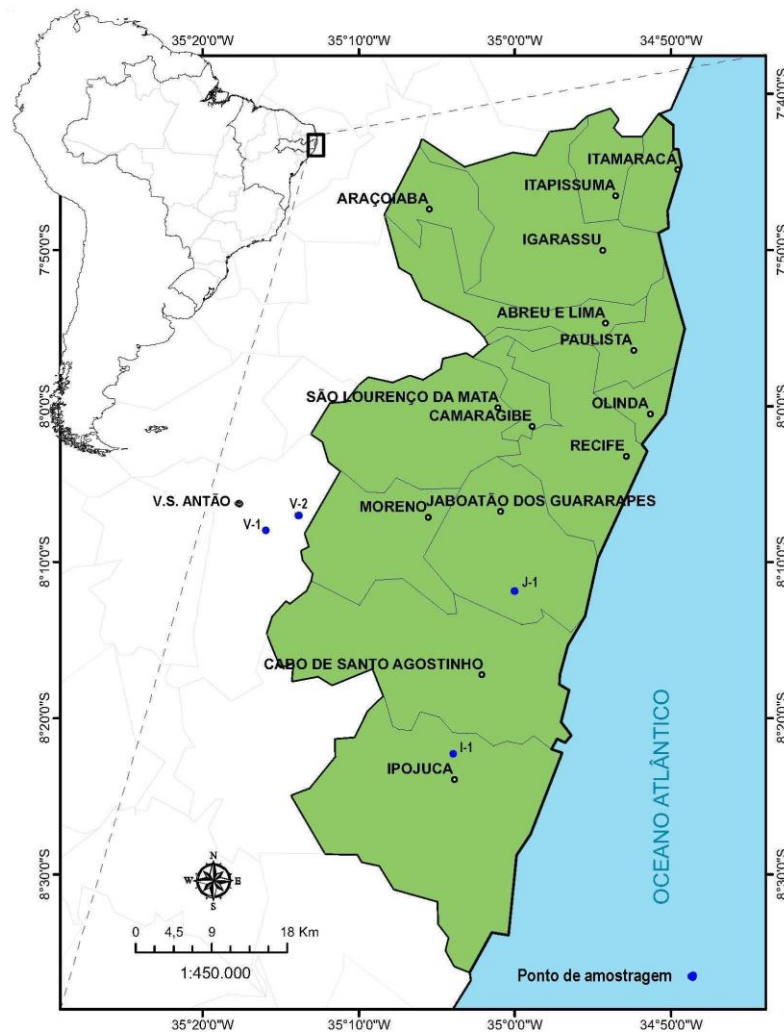


Figura 1: Mapa de localização com os pontos de coleta das amostras de agregados (adaptado de Barreto, 2010).

MATERIAIS

As amostras de agregados graúdos utilizados no presente estudo são provenientes de quatro pedreiras localizadas na Região Metropolitana do Recife, levando-se em conta, além da sua capacidade de produção, o potencial de utilização conforme a proximidade das áreas economicamente mais importantes da região, como os centros urbanos e o Porto de Suape. Essas pedreiras produzem essencialmente britas, largamente utilizadas na confecção de concreto. As pedreiras estão geograficamente

distribuídas da seguinte forma: uma no município de Ipojuca, outra no município de Jaboatão dos Guararapes e duas no município de Vitória de Santo Antão.

O critério para escolha dos diferentes tipos de cimentos foi o teor de adições pozolânicas presentes, tendo em vista que essas adições, quando utilizadas em proporções adequadas, podem inibir a RAS. Naturalmente a sua difusão no mercado foi outro fator considerado.

Três tipos de cimentos *Portland* com diferentes teores de adições foram utilizados neste estudo, a saber: CP II-Z, CP IV e CP V-ARI. A escolha desses

cimentos baseia-se nas normas brasileiras que determinam os teores de adições e outras características químicas, físicas e mecânicas dos cimentos produzidos no Brasil.

O cimento CP V-ARI foi escolhido e indicado como referência por que, além de conter baixo teor de adições, apresenta evolução mais rápida dos processos de hidratação, fato este muito importante na realização de ensaios acelerados.

O cimento CP II-Z foi escolhido por ser um dos mais consumidos na região e para se verificar se quantidade de adição é suficiente para inibir a reação.

O cimento CP IV foi escolhido por ser bastante consumido na região e conter um elevado teor de adições.

MÉTODOS

A pesquisa foi planejada e desenvolvida em três etapas. Na primeira procedeu-se a coleta e preparação das amostras de agregados e a aquisição dos diferentes tipos de cimentos. Na segunda realizou-se a caracterização química dos agregados e cimentos, a análise petrográfica dos agregados e os ensaios para determinação da reatividade potencial dos agregados e avaliação da eficiência dos cimentos, pelo método acelerado das barras de argamassa. Na terceira e última etapa realizaram-se as análises por MEV e EDS.

As amostras de agregados graúdos destinados à confecção das barras de argamassa para o ensaio acelerado foram identificadas de acordo com o local de procedência, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Amostras de agregados utilizados no ensaio de expansão.

Amostra	Município	Tipo de agregado
I-1	Ipojuca	Brita
J-1	Jaboatão dos Guararapes	Brita
V-1	Vitória de Santo Antão	Brita
V-2	Vitória de Santo Antão	Brita

As amostras de fragmentos de rochas utilizados na análise petrográfica também foram identificadas segundo o local de procedência, porém levando-se

em conta a existência de mais de uma feição no maciço rochoso, conforme se apresenta na Tabela 2.

Tabela 2 – Amostras de fragmentos de rocha utilizados na análise petrográfica.

Amostra	Município	Tipo
I-1.1	Ipojuca	Fragmento de rocha
I-1.2	Ipojuca	Fragmento de rocha
J-1.1	Jaboatão dos Guararapes	Fragmento de rocha
J-1.2	Jaboatão dos Guararapes	Fragmento de rocha
V-1.1	Vitória de Santo Antão	Fragmento de rocha
V-1.2	Vitória de Santo Antão	Fragmento de rocha
V-1.3	Vitória de Santo Antão	Fragmento de rocha
V-2.1	Vitória de Santo Antão	Fragmento de rocha
V-2.2	Vitória de Santo Antão	Fragmento de rocha

O potencial reativo dos agregados foi avaliado, seguindo as recomendações da NBR 15577/08, através da análise petrográfica dos agregados e pela determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, confeccionadas a partir da combinação dos diversos tipos de agregados com os diferentes tipos de cimento. Utilizou-se ainda a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-x por energia dispersiva, em algumas das barras de argamassa,

especialmente para identificação dos produtos da reação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Reatividade potencial dos agregados

As características petrográficas das rochas que compõem os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa encontram-se resumidas nas Tabelas 3a e 3b.

Tabela 3a - Resumo das principais características petrográficas das rochas avaliada

Amostra	Local	Características Petrográficas				
		Composição mineralógica		Estrutura	Intercrecimento de fases	Granulação
		Principal	Subordinada			
I-1.1	Ipojuca	quartzo K-feldspato plagioclásio	anfibólio titanita opacos zircão	suavemente foliada	mirmequitica, poiquilitica	fina, submilimétrica
I-1.2	Ipojuca	quartzo K-feldspato plagioclásio	anfibólio biotita titanita opacos	foliada/ bandada	mirmequitica, pertitica, antipertitica	fina a média 0,5 a 1,0 cm
J.1.1	Jaboatão dos Guararapes	quartzo k-feldspato plagioclásio	biotita, anfi bólio, titanita, opacos, zircão, alanita	foliada/ bandada/ porfirítica	mirmequitica pertitica antipertitica	fina a média 1,0 a 5,0 mm
J-1.2	Jaboatão dos Guararapes	quartzo K-feldspato plagioclásio	biotita, tita nita, alanita, epidoto, zircão, opacos	foliada/ bandada/ porfirítica	mirmequitica, pertitica, antipertitica	média a grossa 0,5 a 1,5 cm
V-1.1	Vitória de Santo Antônio	matriz milonítica/fi-lonítica, porfiroblastos feldspáticos	biotita resi dual, titanita, alanita, epi doto, opacos, granada	milonítica/ micro- porfiro-blástica	mimerquitica, pertitica	fina a média
V-1.2	Vitória de Santo Antônio	matriz milonítica porfiroblastos feldspáticos, bandas micro granulares de quartzo	biotita, titanita opacos alanita epidoto	foliada/ bandada/ proto- milonítica/ porfiro blástica	mirmequitica pertitica	média a grossa
V-1.3	Vitória de Santo Antônio	matriz milonítica, porfiroblastos feldspáticos bandas micro granulares de quartzo	biotita titanita opacos alanita epidoto zircão	foliada/ bandada/ proto milonítica/ microporfiro- blástica	mirmequitica pertitica antipertitica	fina a média
V-2.1	Vitória de Santo Antônio	horblenda biotita plagioclásio	quartzo, microclina titanita opacos epidoto	foliada/ gnáissica bandada	ausente	fina submilimétrica
V-2.2	Vitória de Santo Antônio	quartzo K-feldspato plagioclásio	matriz milonítica, biotita opacos apatita zircão	foliada/ bandada/ proto milonítica	mirmequitica pertitica	fina submilimétrica

Tabela 3b - Resumo das principais características petrográficas das rochas avaliada

Amostra	Local	Características Petrográficas						
		Alteração	Ângulo ext. ond. do quartzo	Quartzo micro- granular	Micro-fissuração	Tipo de rocha	Classificação Petrográfica	Reatividade Potencial
I-1.1	Ipojuca	sericitização, saussuritização	moderado 15° a 30°	>15%	ausente	meta-mórfica	migmatito	Potencialmente reativo
I-1.2	Ipojuca	retrometa- morfismo	moderado 15° a 30°	5% a 15%	moderada	meta-mórfica	biotita-anfibolio ortognaisse monzo-granítico	Potencialmente reativo
J.1.1	Jaboatão dos Guararapes	sericitização saussuritização	moderado 15° a 30°	< 5%	moderada	meta-mórfica	biotita ortognaisse grano-diorítico	Potencialmente inócuo
J-1.2	Jaboatão dos Guararapes	sericitização saussuritização	elevado > 30°	< 5%	forte	meta- mórfica	biotita ortognaisse monzo-granítico	Potencialmente inócuo
V-1.1	Vitória de Santo Antão	sericitização saussuritização	elevado > 30°	> 15%	forte	meta-mórfica	gnaisse milonitizado	potencialmente reativo
V-1.2	Vitória de Santo Antão	sericitização saussuritização	elevado > 30°	> 15%	forte	meta- morfica	ortognaisse leucocrático/ granítico proto- milonítico	potencialmente reativo
V-1.3	Vitória de Santo Antão	sericitização saussuritização	elevado > 30°	> 15%	forte	meta- morfica	biotita ortognaisse proto- milonítico	potencialmente reativo
V-2.1	Vitória de Santo Antão	saussuritização	< 15°	< 5%	ausente	meta- morfica	biotita- anfibólio ortognaisse quartzo diorítico	potencialmente inócuo
V-2.2	Vitória de Santo Antão	sericitização saussuritização	moderado 15° a 30°	5 a 15%	ausente	meta- morfica	biotita ortognaisse proto-milonítico monzo- granítico	potencialmente reativo

Nas Figuras 2 a 9 são apresentadas fotomicrografias dos agregados estudados

mostrando algumas características mineralógicas e petrográficas.

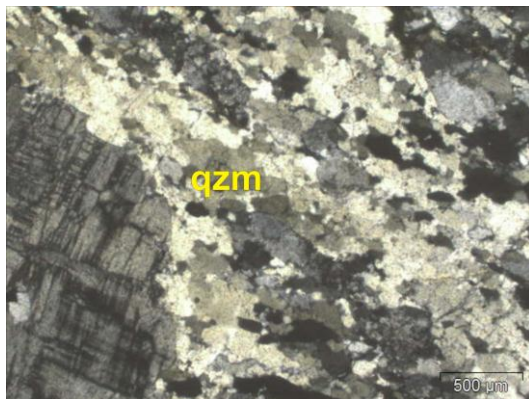


Figura 2. Agregado V-1: Bandas orientadas na direção da foliação gnaissicomilonítica, constituídas de quartzo microgranular (qzm) deformado, exibindo forte extinção ondulante. Nicóis cruzados. 20X.

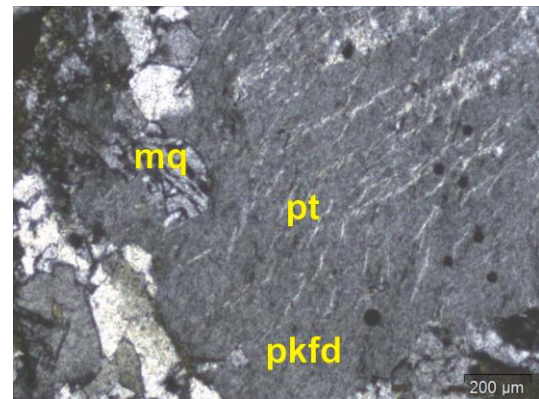


Figura 3. Agregado V-1: Mimerquita (mq) próxima à borda de cristal porfiroblástico (pkfd) de K-feldspato pertítico (pt). Nicóis cruzados. 40X.

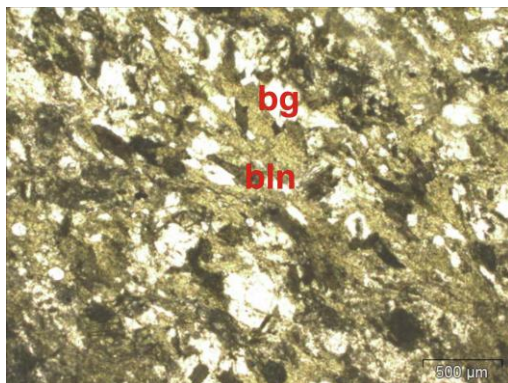


Figura 4. Agregado V-2: Alternância de bandas lepidonematoblásticas (bln) (biotita + anfibólio) com bandas granoblásticas (bg) (quartzo + K-feldspato + plagioclásio) do ortogneisse quartzo-diorítico. Observa-se a granulação fina, submilimétrica. Nicóis paralelos. 20X.

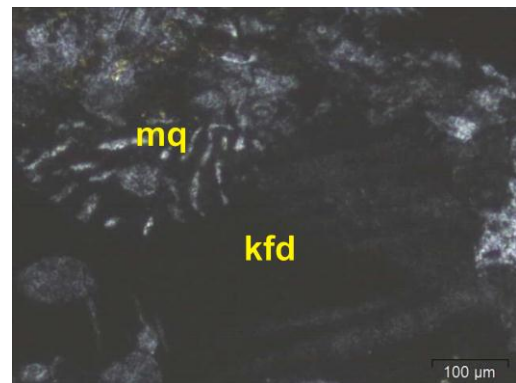


Figura 5. Agregado V-2: Mirmequítica (mq) próxima à borda de um cristal de K-feldspato (kfd). Nicóis cruzados. 20X.

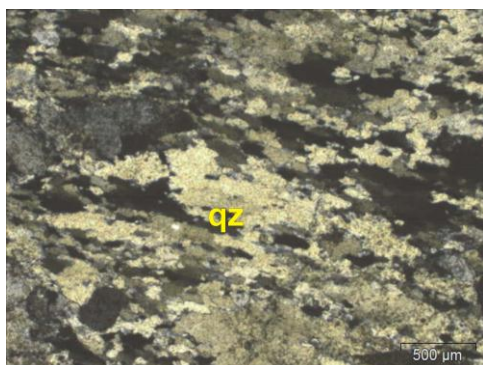


Figura 6. Agregado I-1: Quartzo (qz) anedral, deformado, mostrando extinção ondulante moderada, orientado na direção da foliação da rocha granodiorítica. Nicóis cruzados. 20X.

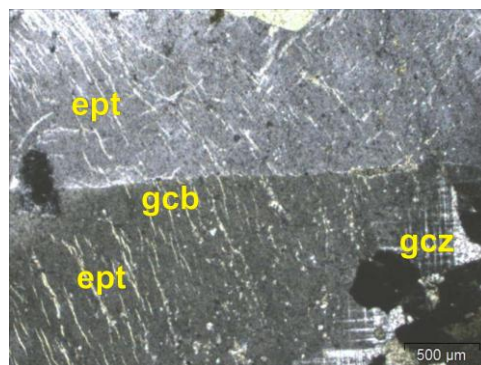


Figura 7. Agregado I-2: Fenocristal porfirítico de K-feldspato, mostrando geminação Carlsbad (gcb) combinada com geminação cruzada (gcz), e exsolução pertítica (ept). Nicóis cruzados. 20X.

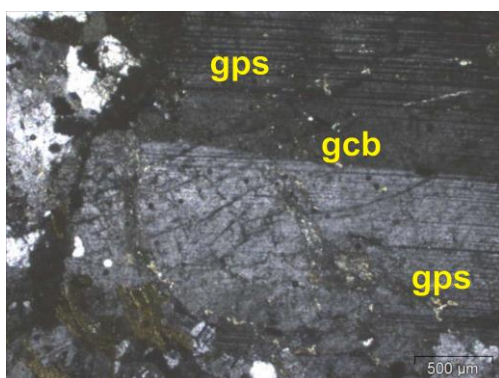


Figura 8. Agregado J-1: Cristal de plagioclásio exibindo combinação de geminação polissintética (gps) com geminação Carlsbad (gcb), sericitização e desenvolvimento de microfissuras. Nicóis cruzados. 20X.

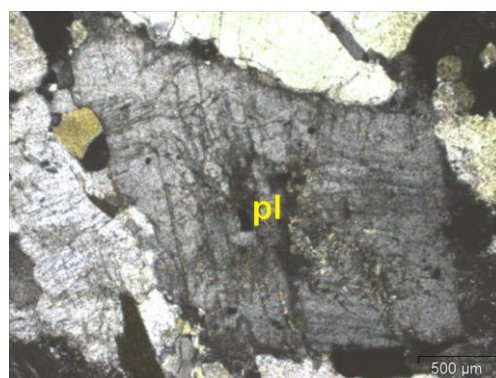


Figura 9. Agregado J-1. Cristal de Plagioclásio saussuritizado, exibindo forte desenvolvimento de microfissuras e formas subédricas. Nicóis cruzados. 20X.

A maioria dos litotipos que constituem os agregados avaliados foi classificada como rochas metamórficas, ortoderivadas, leucocráticas, de filiação granítica, constituídas essencialmente por quartzo, álcali-feldspato e plagioclásio.

As características apresentadas na Tabela 3 e as fotomicrografias mostram que todos os agregados avaliados apresentam minerais e/ou texturas potencialmente reativas no que se refere à reação álcali-silicato, como por exemplo: quartzo deformado, com extinção

ondulante, quartzo microcristalino, intercrescimentos (mirmequita, pertita e antipertita), granulação, alterações e microfissuras. Levando-se em conta a combinação dessas características, obtidas na análise petrográfica, é possível inferir-se uma maior ou menor tendência de reatividade de um determinado agregado.

Desta forma, o agregado V-1 apresenta uma maior tendência à reatividade tendo em vista que os litotipos que o constituem, V-1.1, V-1.2 e V-1.3, além de apresentarem todas as características potencialmente reativas, algumas delas se apresentam em grau elevado: estrutura milonítica, texturas mirmequíticas, pertíticas e antipertíticas, granulação predominantemente fina a média, saussuritização e sericitização de feldspatos, grande quantidade de microfissuras, quantidade de quartzo deformado superior a 15%, com elevado ângulo de extinção e quantidade de quartzo microgranular superior a 15%.

O agregado V-2, constituído pelos litotipos V-2.1 e V-2.2, também apresenta uma acentuada tendência à reatividade. Apesar de um dos seus constituintes, o litotipo V.2.1, ter apresentado poucas características potencialmente reativas, inclusive com quantidade de quartzo deformado e microgranular inferiores a 5%, este litotipo representa quantitativamente apenas cerca de 20% do total da amostra V-2.

Por outro lado, o litotipo V-2.2, que representa 80% do total da amostra V-2, além de apresentar estrutura milonítica, texturas de intercrescimentos, alterações do anfibólio e dos feldspatos, quantidade de quartzo deformado superior a 15%, com ângulo de extinção ondulante entre 15° e 30°, quantidade de quartzo microgranular entre 5% e 15%, ainda apresenta granulação submilimétrica, que favorece ainda mais a reatividade.

O agregado I-1, constituído pelos litotipos I-1.1 e I-1.2, embora não apresente todas características potencialmente reativas acima referidas, é o que

apresenta a maior quantidade de quartzo. Deste, mais de 15% encontra-se deformado, com ângulo de extinção entre 15° e 30°.

No litotipo I-1.1 mais de 15% do quartzo apresenta-se sob a forma microgranular, observam-se ainda texturas de intercrescimentos mirmequíticos, e poiquilíticos, e alterações em plagioclásios. No litotipo I-1.2 o percentual de quartzo microgranular varia de 5% a 15%, observa-se a presença de texturas mirmequíticas, pertíticas e antipertíticas, além de alterações de anfibólios (retrometamorfismo) e microfissuras em quantidade moderada.

O agregado J-1 é o que apresenta a menor tendência à reatividade, visto que os litotipos que o constituem: J-1.1 e J-1.2 apresentam menos características de potencialidade reativa, destacando-se a quantidade de quartzo microgranular inferior a 5%. Apesar do ângulo de extinção ondulante situar-se entre moderado (15° a 30°), no litotipo J-1.1 a elevado (>30°) no litotipo J-1.2, a quantidade de quartzo deformado em ambos é inferior a 15%. Ambos apresentam texturas mirmequíticas, pertíticas e antipertíticas, e alterações dos feldspatos (saussuritização e sericitização). No litotipo J-1.2, que representa cerca de 50% da amostra a quantidade de microfissuras é grande, porém a granulação é média a grossa. No outro litotipo J-1.1, onde a granulação varia de fina a média, as microfissuras são moderadas.

Do ponto de vista petrográfico, levando-se em conta principalmente o conteúdo de quartzo microgranular, pode-se sugerir que o agregado J-1 é o que apresenta menor potencial reativo quando comparado com as outras amostras.

Os ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado foram realizados conforme as recomendações da norma NBR 15577/08, combinando inicialmente todos os quatro

tipos de agregados com o cimento de referência CP V-ARI.

Os resultados obtidos com esses ensaios foram analisados através dos gráficos que relacionam a porcentagem média de expansão das barras de argamassa ao longo do tempo, salientando-se que as expansões foram calculadas em relação à leitura de referência, inicial, ou seja, quando os prismas ainda não tinham sido expostos à solução de NaOH.

Seguindo o prescrito na norma NBR 15577/08, os agregados graúdos foram classificados conforme os seguintes critérios:

- Potencialmente inócuo: expansões inferiores a 0,19% aos 30 dias;
- Potencialmente reativo: expansões iguais ou superiores a 0,19% aos 30 dias.

No gráfico da Figura 10 apresentam-se os resultados das expansões das combinações dos quatro agregados graúdos com o cimento de referência CP V-ARI.

Na Tabela 4 apresentam-se as expansões médias, aos 30 dias, das barras de argamassa confeccionadas com o cimento de referência CP V-ARI.

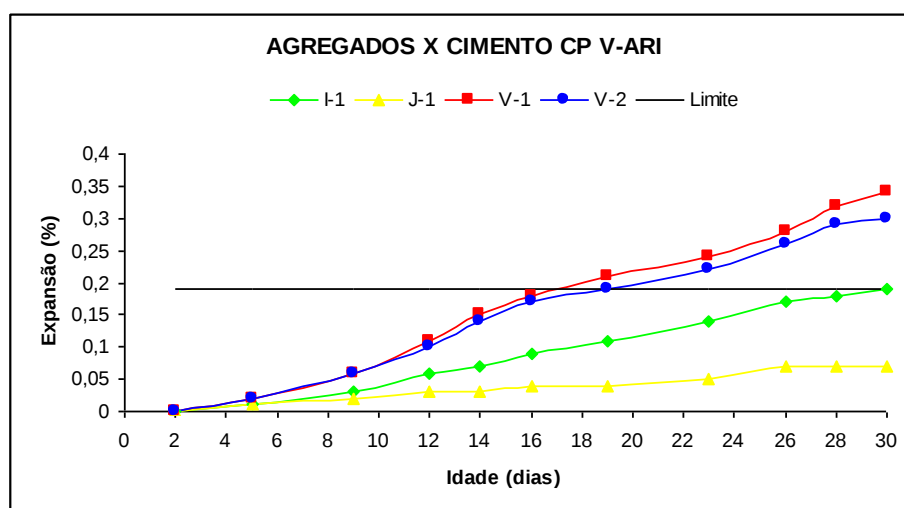


Figura 10 – Expansões médias das barras confeccionadas com o cimento CP V-ARI.

Tabela 4 – Expansões médias aos 30 dias e classificação da potencialidade reativa das barras confeccionadas com o cimento CP V-ARI.

Cimento	Agregado	Expansão (%) 30 dias	Classificação	
			Potencialmente inócuo	Potencialmente reativo
CP V-ARI	I-1	0,19		X
	J-1	0,07	X	
	V-1	0,34		X
	V-2	0,30		X

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 10 e na Tabela 4 indicam que apenas a amostra do agregado J-1 foi classificada como potencialmente inócua. Sendo o CP V-ARI um cimento básico, praticamente sem nenhum teor de adição, e levando-se em conta os resultados das análises petrográficas, era de se esperar que as amostras ensaiadas com esse cimento fossem classificadas como potencialmente reativas. O fato da amostra J-1 ter sido classificada como potencialmente inócua, confirma a tendência para menor reatividade desta amostra, indicada na análise petrográfica.

Por outro lado, os resultados de expansão para as amostras dos agregados V-1 e V-2 confirmam a tendência para maior reatividade destas amostras, inferida na análise petrográfica.

A amostra do agregado I-1 que apresentou valor limítrofe de expansão (0,19%), foi classificada como potencialmente reativa, obedecendo ao critério adotado pela norma, e também confirmando a tendência de potencialidade reativa indicada na análise petrográfica.

Avaliação da eficiência das adições pozolânicas nos cimentos

A avaliação da eficiência dos cimentos contendo adições pozolânicas utilizados nesta pesquisa foi realizada conforme os critérios recomendados pela norma NBR 15577/08. Porém, levando-se em conta o objetivo da pesquisa, optou-se por utilizar todas as amostras e não apenas aquelas consideradas mais reativas, com a finalidade de evidenciar-se o comportamento de cada um dos cimentos com relação aos agregados, bem como sua eficiência em inibir a RAS de acordo com os limites da NBR 15577/2008.

Os critérios para determinação da eficiência de materiais inibidores da reação, recomendados pela norma NBR 15577/08 são os seguintes:

- Quando as expansões obtidas no ensaio acelerado em barras de argamassa forem iguais ou superiores a 0,10% aos 16 dias, não está comprovada a mitigação, e serão necessários novos ensaios de forma a atender a esse limite, podendo-se optar por uma ou mais das alternativas seguintes: utilizar outro tipo de cimento *Portland* apropriado para inibir a reação; incorporar ou aumentar teores de adições; trocar o agregado.
- Quando as expansões obtidas no ensaio acelerado em barras de argamassa for inferior a 0,10% aos 16 dias, a mitigação está comprovada.

No gráfico da Figura 11 e na Tabela 5, apresentam-se os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com as combinações do agregado I-1 com o cimento de referência CP V-ARI e com os cimentos contendo adições pozolânicas (CP II-Z e CP IV).

No gráfico da Figura 12 e na Tabela 6, apresentam-se os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com as combinações do agregado J-1 com o cimento de referência CP V-ARI e com os cimentos contendo adições pozolânicas (CP II-Z e CP IV).

No gráfico da Figura 13 e na Tabela 7, são apresentados os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com as combinações do agregado V-1 com o cimento de referência CP V-ARI e com os cimentos contendo adições pozolânicas (CP II-Z e CP IV).

No gráfico da Figura 14 e na Tabela 8, apresentam-se os resultados das expansões das barras de argamassa confeccionadas com as combinações do agregado I-1 com o cimento de referência CP V-ARI e com os cimentos contendo adições pozolânicas (CP II-Z e CP IV).

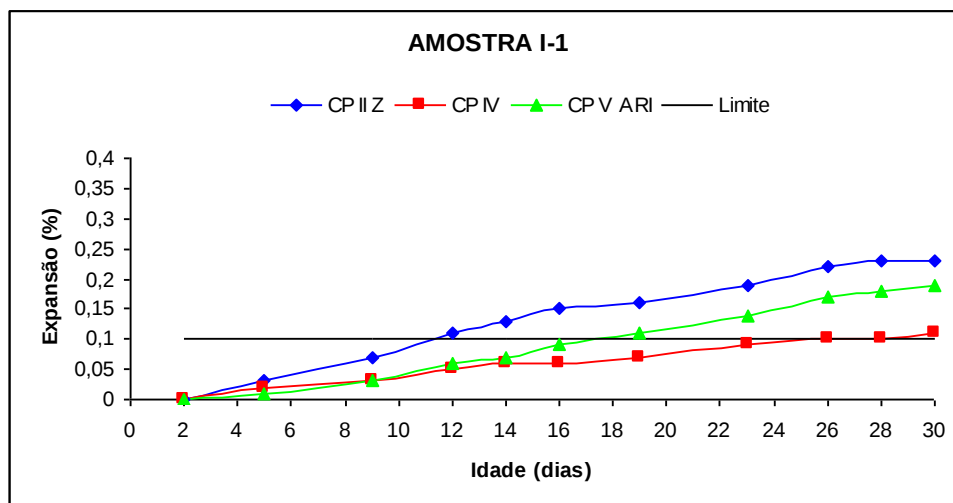


Figura 11 - Expansões médias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado I-1.

Tabela 5- Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado I-1 e verificação da eficiência dos cimentos.

Agregado	Cimento	Expansão (%) 16 dias	Eficiência	
			Comprovada	Não Comprovada
I-1	CP V-ARI	0,09	X	
	CP II-Z	0,15		X
	CP IV	0.06	X	

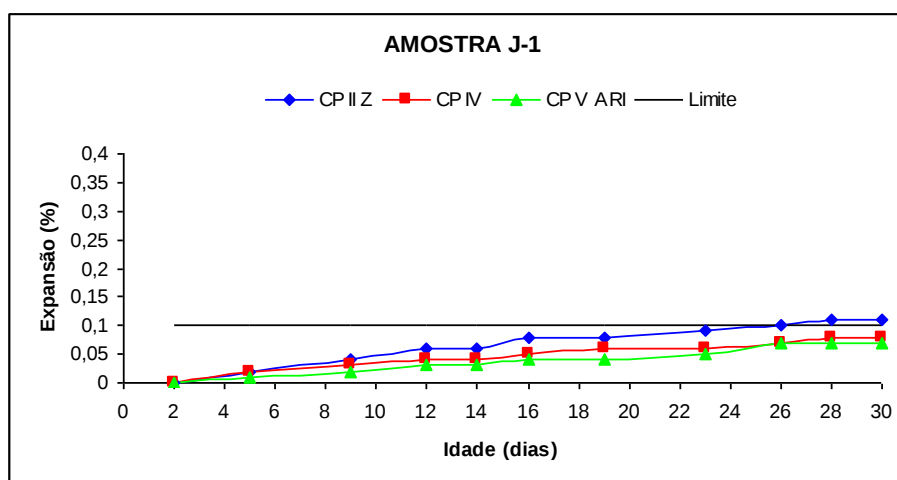


Figura 12 - Expansões médias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado J-1.

Tabela 6 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado J-1 e verificação da eficiência dos cimentos.

Agregado	Cimento	Expansão (%) 16 dias	Eficiência	
			Comprovada	Não Comprovada
J-1	CP V-ARI	0,04	X	
	CP II-Z	0,08	X	
	CP IV	0,05	X	

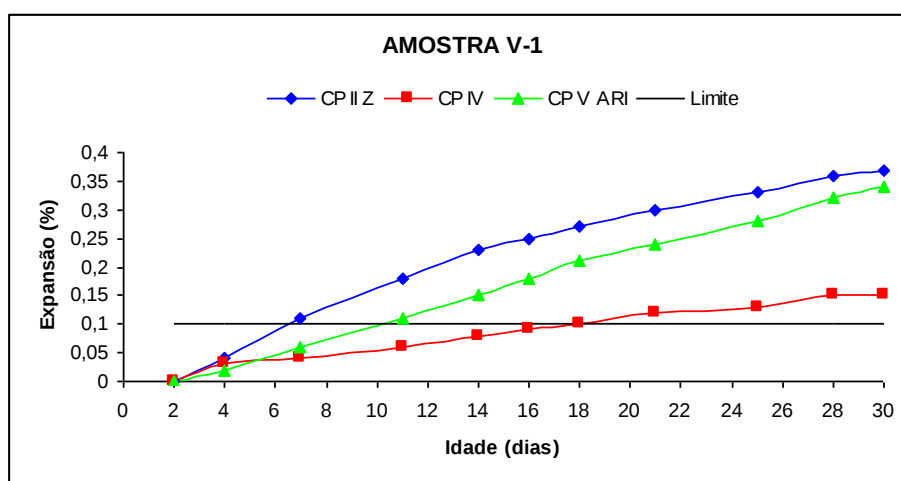


Figura 13 - Expansões médias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-1.

Tabela 7 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-1 e verificação da eficiência dos cimentos.

Agregado	Cimento	Expansão (%) 16 dias	Eficiência	
			Comprovada	Não Comprovada
V-1	CP V-ARI	0,18		X
	CP II-Z	0,25		X
	CP IV-RS	0,09	X	

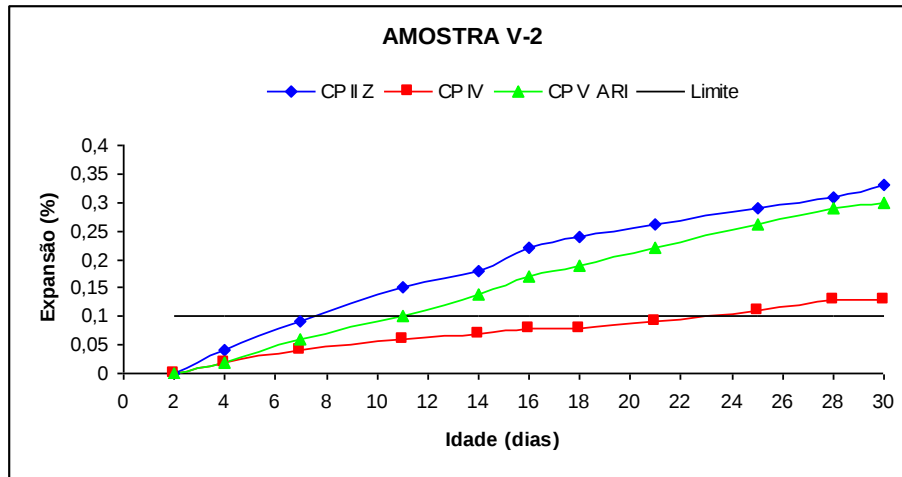


Figura 14 - Expansões médias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-2.

Tabela 8 - Expansões médias aos 16 dias das barras confeccionadas com os cimentos pozolânicos e o agregado V-2 e verificação da eficiência dos cimentos.

Agregado	Cimento	Expansão (%) 16 dias	Eficiência	
			Comprovada	Não Comprovada
V-2	CP V-ARI	0,17		X
	CP II-Z	0,22		X
	CP IV	0,08	X	

Analisando-se as informações dos gráficos e tabelas verifica-se que apenas o cimento CP IV teve eficiência comprovada, em inibir as expansões decorrentes da RAS, quando utilizado com todos os tipos de agregados. Estes resultados altamente satisfatórios devem-se ao teor de adição pozolânica, de 27%, indicando que os concretos confeccionados com a combinação deste cimento com estes agregados não apresentam risco de expansão deletéria, quando usados em condições de campo. Por outro lado, os resultados indicam que o cimento CP II-Z, com aproximadamente 15 % de pozolana, não se mostrou eficaz na inibição da reação quando utilizado com os agregados classificados como

reativos. Entretanto, mostrou-se eficaz quando utilizado com o agregado J-1, ratificando a inocuidade deste material, determinada anteriormente pelo ensaio de expansão com o cimento de referência.

O fato de não se mostrar capaz de inibir a reação, quando utilizado com agregados reativos, pode indicar que o teor de adição pozolânica presente no cimento CP II-Z não é capaz de garantir um comportamento inócuo dos agregados no concreto, sendo para isso necessários teores mais elevados desta adição.

Quando comparado com o CP IV, com teor mais elevado de pozolana e que resultou em expansões muito menores, o CP II-Z mostrou-se muito menos eficiente, evidenciando mais uma vez que

o seu teor de adição pozolânica não é suficiente para inibir a RAS em todos os tipos de agregados estudados. Há que se destacar que o desempenho deste cimento ficou abaixo até mesmo do cimento de referência CP V-ARI. Logo, além da hipótese de que o teor de pozolana utilizado no CP II-Z não é suficiente para inibir a reação, há que se averiguar sobre o tipo de pozolana utilizado neste cimento com relação ao cimento CP IV. Outro ponto a ser verificado é a questão do tempo de cura e o teor de álcalis do cimento.

Avaliação do efeito do teor de álcalis dos cimentos nas expansões

Sabe-se que quando se trata de um ensaio acelerado, em que as barras são imersas em uma solução altamente alcalina (1M de NaOH), o equivalente alcalino do cimento provavelmente não exerce influência nas expansões, pois os álcalis da solução é que reagirão mais intensamente com os minerais dos agregados. Neste sentido Jensen et al. (1982) salientam que quando há adição de sais alcalinos com o intuito de se acelerar

a álcali-reatividade das rochas, deve-se considerar a interferência da facilidade de migração desses sais aceleradores, pois a magnitude das expansões dependerá da migração dos álcalis. Então amostras confeccionadas com os mesmos agregados reativos podem desenvolver diferentes magnitudes de expansões.

Ao se avaliar os equivalentes alcalinos de cada cimento (Figura 15), verifica-se que o maior teor é encontrado no CP II-Z (2,23), seguido do CP IV (1,61%) e o menor no CP V-ARI (0,77%). Embora não exista uma correlação direta entre o valor dos equivalentes alcalinos dos cimentos e respectivas expansões, verifica-se que o cimento CP II-Z-RS, cujas barras apresentaram as maiores expansões é o que possui o maior equivalente alcalino.

Essa constatação, embora se tenha que considerar a agressividade da solução alcalina utilizada no ensaio, pode evidenciar que, além do teor insuficiente de adição pozolânica, o elevado teor de álcalis do cimento CP II-Z, pode estar influenciando na incapacidade do cimento em inibir a reação.

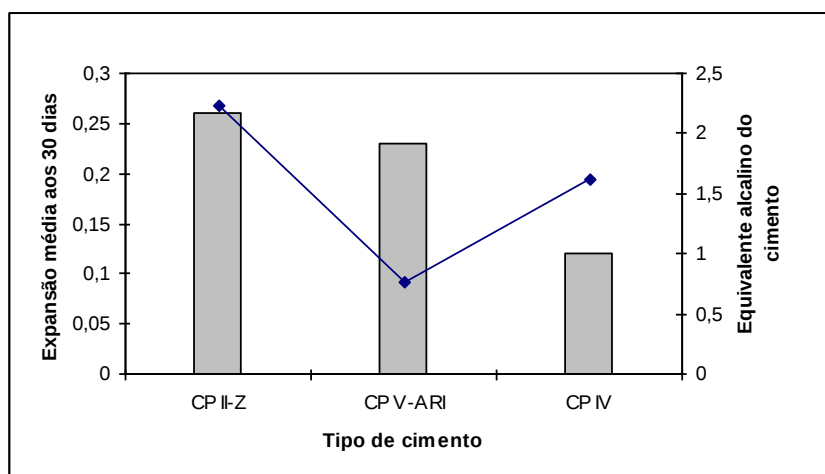


Figura 15 - Relação entre o equivalente alcalino do cimento e as expansões médias das barras.

Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-x

Foram observadas ao MEV e analisadas por EDS as barras que apresentaram as maiores expansões com os diversos tipos de cimento. As análises foram realizadas em fragmentos das barras em seu estado natural e não em lâminas delgadas com seção polida. A adoção dessa metodologia permite a obtenção de imagens topográficas dos produtos da reação, sem alterar sua morfologia, porém, pode comprometer a análise química realizada por EDS, levando a resultados menos precisos.

As análises de EDS foram realizadas em pontos ou em janelas, conforme o grau de homogeneidade da imagem. Como não houve a padronização de uma determinada região para análise, os resultados apresentaram-se bastante variados. A presença do ouro (Au) em todos os espectros apresentados está relacionada com a metalização das amostras.

A voltagem foi fixada em 15 kV, porém não se padronizou a ampliação das imagens tendo em vista que a visualização dos produtos ocorria segundo uma ampla variação de aumentos, conforme a procedência dos fragmentos.

Foram selecionadas para as análises em questão amostras de fragmentos de barras de argamassa moldadas com as seguintes combinações de agregado:cimento: V-1:CP II-Z; V-1:CP IV; V-1:CP V-ARI; V-2:CP II-Z; V-2:CP V-ARI e I-1:CP II-Z, considerando-se as maiores expansões observadas. Nenhuma barra moldada com o agregado J-1 foi selecionada para essas análises, levando-se em conta a inocuidade do material, já comprovada nas análises anteriores, petrografia e expansão, e a disponibilidade para se realizarem as observações no MEV.

Nas micrografias das Figuras 16 a 20 apresentam-se imagens de produtos da RAS identificados nas amostras observadas no MEV e respectivos espectros obtidos com EDS.

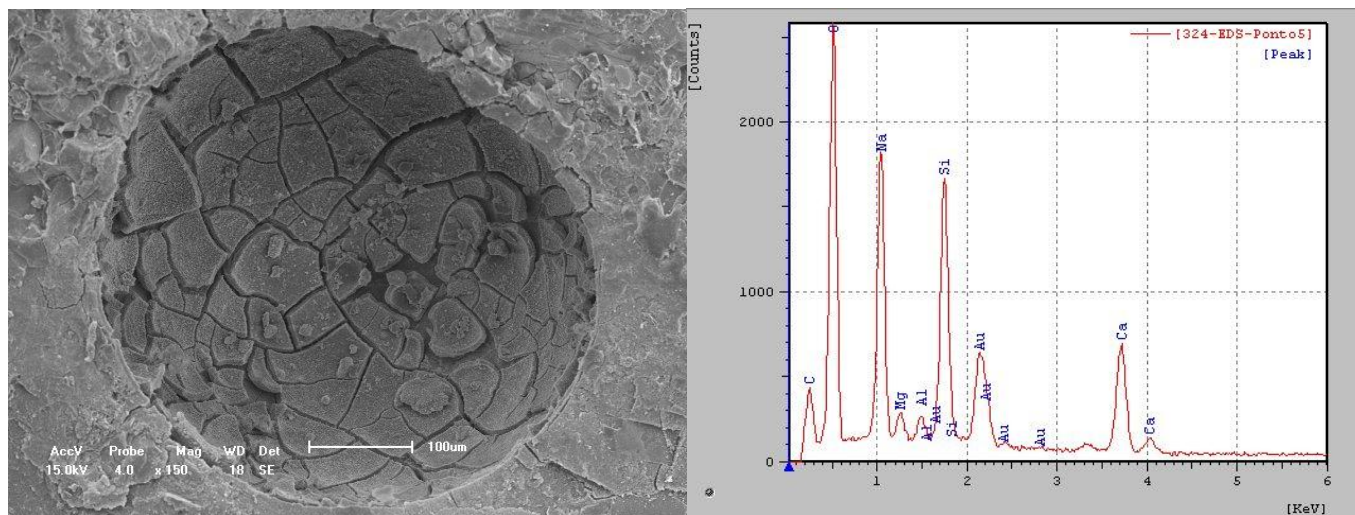


Figura 16. V-1/CP II-Z: c) Gel gretado revestindo poro de grandes dimensões e respectivo espectro EDS, no ponto.

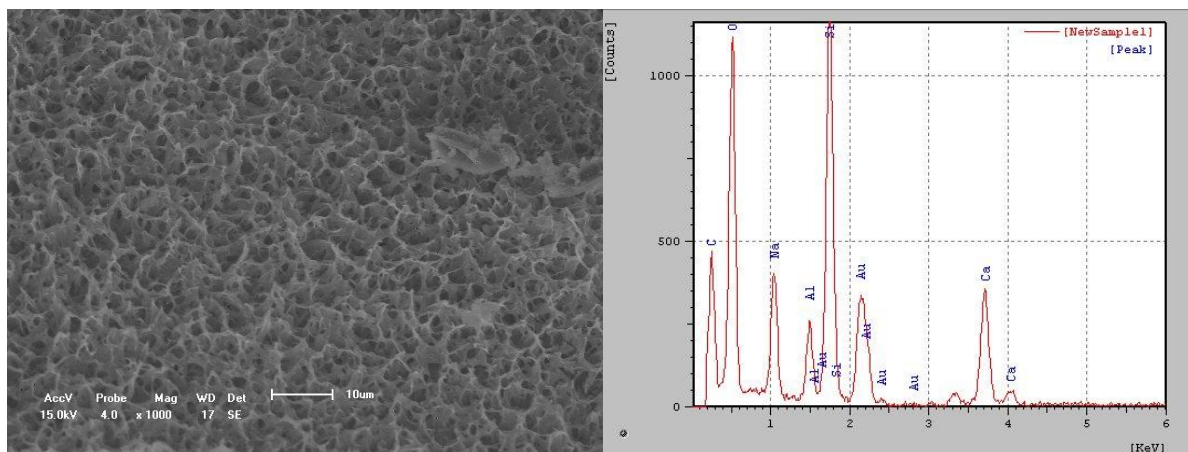


Figura 17. V-1/CP IV: Gel rendado preenchendo poro e respectivo espectro EDS, na janela.

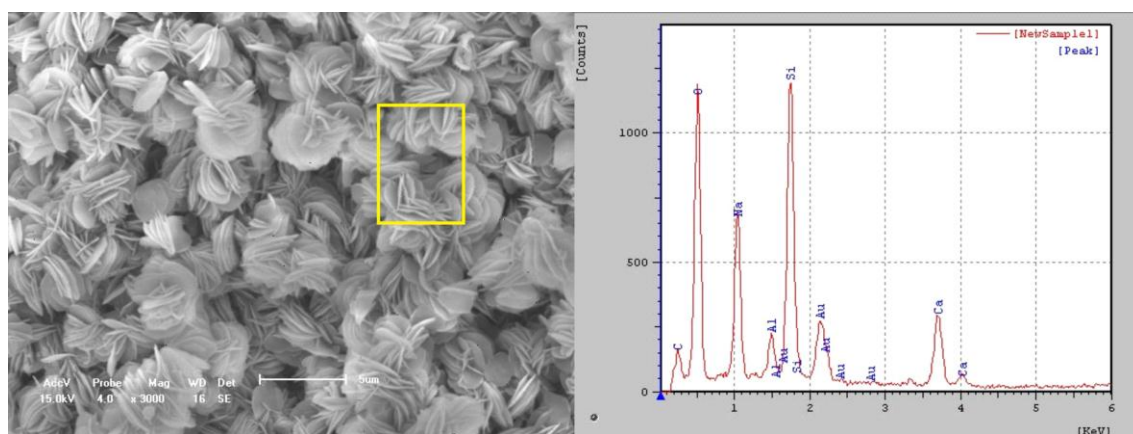


Figura 18. V-1/CP V-ARI: Produto semicristalizado da RAS e respectivo espectro EDS, na janela.

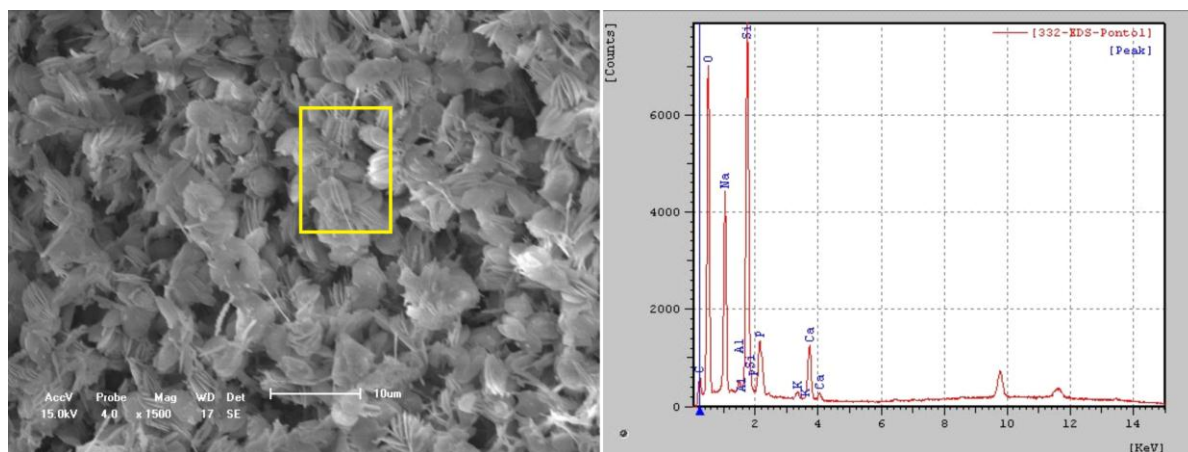


Figura 19. V-2/CP II-Z: Produto semicristalizado preenchendo poro e respectivo espectro EDS, na janela.

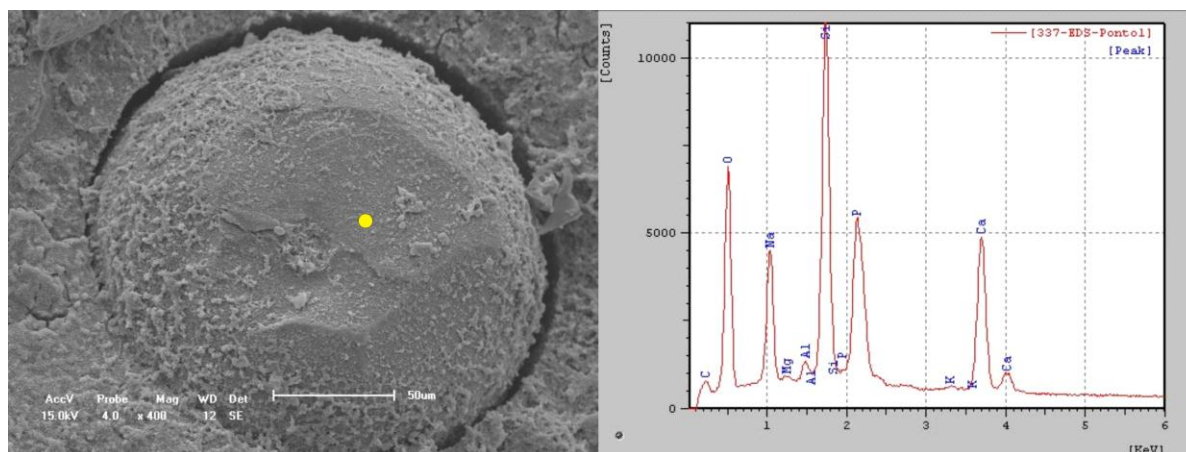


Figura 20. V-2/CP V-ARI: Gel rendado, preenchendo poro na interface agregado/pasta e respectivo espectro EDS, no ponto.

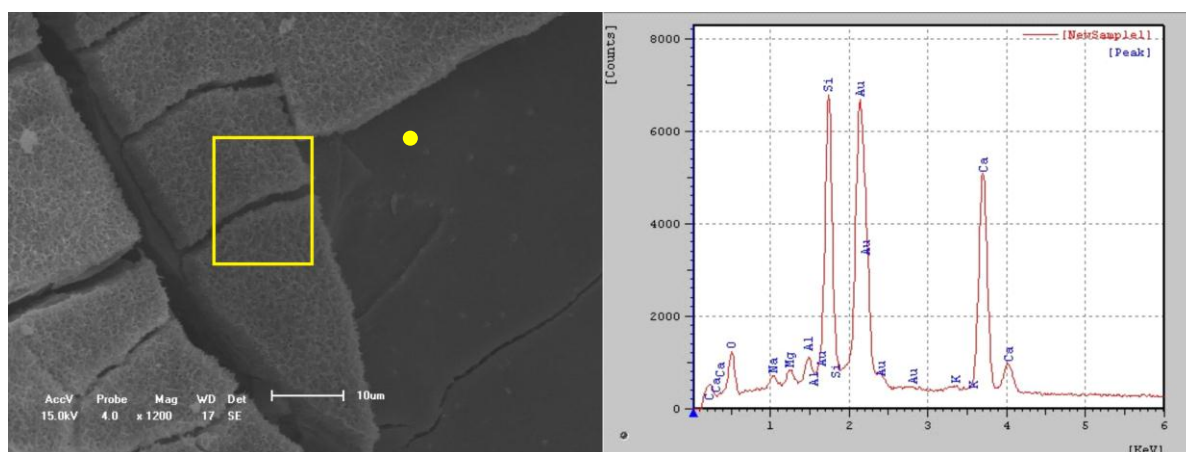


Figura 21. I-1CP II-Z: c) Produto da RAS preenchendo poro na interface pasta/agregado e respectivo espectro EDS, na janela.

As Figuras 16 a 18 constataam que houve a formação do gel sílico-alcalino em todos os fragmentos avaliados das barras moldadas com o agregado V-1, inclusive no fragmento da barra moldada com o cimento CP IV, que apresentou expansão menor do que 0,10% aos 16 dias, limite adotado pela NBR 15577 para atestar a eficiência do cimento. Em todos os fragmentos foram visualizados produtos tanto disseminados quanto

preenchendo poros. Entretanto, vale ressaltar que no fragmento moldado com o cimento CP IV os produtos expansivos foram visualizados preferencialmente nos poros, através de grandes aumentos, e em menor quantidade. Os espectros apresentados nestas figuras indicam que, em todas as morfologias, características da RAS, observadas, a presença dos principais constituintes do gel sílico-

alcalino, com predomínio de Si, Ca e Na, e em menor quantidade o K.

As imagens das Figuras 19 e 20 mostram a presença de produtos da RAS nos dois fragmentos, de barras moldadas com o agregado V-2, analisados. Tanto no fragmento moldado com o cimento CP II-Z quanto no fragmento moldado com o cimento CP V-ARI, os produtos se apresentam preferencialmente preenchendo poros, embora também ocorram disseminados sobre a pasta e sobre o agregado, porém em menor quantidade. Os dois espectros EDS destas figuras indicam a presença dos principais constituintes do gel sílico-alcalino, sendo que no fragmento moldado com o cimento CP II-Z observa-se maior quantidade de Na, enquanto que no fragmento moldado com o CP V-ARI predomina o Ca. Em ambos os espectros nota-se a presença de P, que pode estar associado ao agregado.

No fragmento proveniente da barra moldada com o agregado I-1 e o cimento CP II-Z foi mais difícil visualizar os produtos da RAS, tendo-se observado sua presença apenas em poros na interface entre a pasta e o agregado, conforme mostrado na Figura 3.21. O respectivo espectro EDS também indica a presença dos constituintes do gel sílico-alcalino.

CONCLUSÕES

Os métodos utilizados no presente trabalho mostraram-se eficientes na avaliação da potencialidade reativa dos agregados e da eficiência dos cimentos, especialmente o método acelerado em barras de argamassa que confirmou as informações decorrentes da análise petrográfica. A microscopia eletrônica de varredura e a espectroscopia de raios-x

revelaram-se importantes ferramentas na pesquisa, visto que as imagens e espectros confirmaram a reatividade dos agregados pela visualização dos produtos da reação.

As principais conclusões extraídas dos resultados desta pesquisa apresentam-se a seguir, ressaltando-se que são válidas apenas para as condições e materiais estudados.

Potencialidade reativa dos agregados

A caracterização mineralógica e a análise petrográfica revelaram que:

- Todas as amostras dos agregados são provenientes de rochas metamórficas, de origem plutônica;
- De modo geral, as rochas que compõem as amostras de agregados constituem-se essencialmente de quartzo, K-feldspato e plagioclásio;
- Todas amostras de agregados apresentaram características mineralógicas potencialmente reativas.

O ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, moldadas com o cimento básico CP V-ARI:

- Confirmou a potencialidade reativa das amostras dos agregados V-1, V-2 e I-1 e classificou a amostra do agregado J-1 como potencialmente inócuo;
- Mostrou que as amostras de agregados mais potencialmente reativos são provenientes das rochas miloníticas;
- O agregado potencialmente inócuo provém de rocha gnáissica.

Eficiência dos cimentos pozolânicos

O ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, moldadas com os cimentos compostos com adições pozolânicas revelou que:

- Os corpos-de-prova moldados com o cimento CP IV apresentaram as menores expansões;
- Os corpos de prova moldados com o cimento CP II-Z apresentaram as maiores expansões;
- O cimento CP IV se mostrou possivelmente eficaz para inibir as expansões decorrentes da RAS em todos os corpos-de-prova, moldados com todos os agregados;
- O cimento CP II-Z se mostrou possivelmente eficaz para inibir as expansões decorrentes da RAS apenas no corpo-de-prova moldado com o agregado J-1;
- A quantidade de pozolana, cerca de 15%, adicionada ao cimento CP II-Z não é suficiente para inibir as expansões decorrentes da RAS;
- O equivalente alcalino do cimento CP II-Z pode estar contribuindo para o desencadeamento da RAS.

Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-x

As imagens da microscopia eletrônica e os espectros de raios-x por EDS:

- Mostraram que os produtos da RAS se formaram em todas as amostras observadas.
- Confirmaram a reatividade das amostras dos agregados, mesmo nos corpos-de-prova onde as expansões não foram significativas.

- Apresentaram produtos da reação de morfologia variada, com predominância de gel na forma maciça gretada, preenchendo poros.

Agradecimentos

À geóloga DSc. Maria Angélica Fonseca Sampaio, da CPRM/SUREG Recife, pela realização das análises petrográficas; ao Departamento de Controle e Apoio Técnico de Furnas Centrais Elétricas pela realização dos ensaios de expansão em barras de argamassa; a Central Analítica do Departamento de Química Fundamental da UFPE pelas observações ao MEV e análises por EDS.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas., 2008. *NBR 15577/08: Agregados – Reatividade Alkali-agregado. Partes 1, 2, 3, 4 e 5*. Rio de Janeiro.
- Andrade, T. & Rego Silva, J. J., 2006. Diagnóstico do potencial de reatividade dos agregados e do potencial de inibição de RAA com uso de cimentos e de adições minerais disponíveis na RMR. *Relatório Técnico*, Recife.
- Arrais, M.S.M.C., 2011. *Reação álcali-silicato: avaliação do comportamento de agregados graúdos da Região Metropolitana do Recife frente a diferentes tipos de cimentos*. dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Mineral – UFPE, 97p.
- Barreto, E. P., 2010. *Instrumentos de ordenamento territorial aplicados à revisão do plano diretor de mineração*. Dissertação de Mestrado. UFPE, 210p.

Tiecher, F., 2006. *Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do Sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado*. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRS, p.

Valduga, L., 2002 *Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p.