



Efeito da Distribuição Microestrutural de Fases Mineralógicas na Susceptibilidade de Rochas da Região Nordeste para o desenvolvimento da Reação Álcali-Agregado

Por

Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade

Orientador: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa – PB
Maio-2019

TIBÉRIO WANDERLEY CORREIA DE OLIVEIRA ANDRADE

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO MICROESTRUTURAL DE FASES
MINERALÓGICAS NA SUSCEPTIBILIDADE DE ROCHAS DA
REGIÃO NORDESTE DE DESENVOLVEREM REAÇÃO ÁLCALI-
AGREGADO**

Tese de Doutorado apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

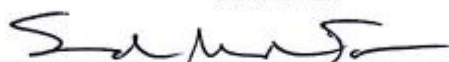
João Pessoa – PB
Maio-2019

EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO MICROESTRUTURAL DE FASES MINERALÓGICAS
NA SUSCEPTIBILIDADE DE ROCHAS DA REGIÃO NORDESTE DE
DESENVOLVEREM REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Por

TIBÉRIO WANDERLEY CORREIA DE OLIVEIRA ANDRADE

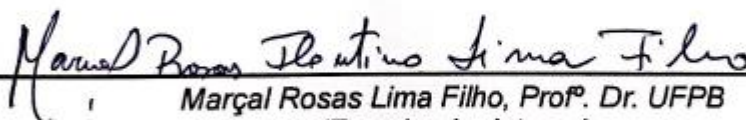
Tese defendida em maio de 2019 e examinada pela banca constituída dos
membros:



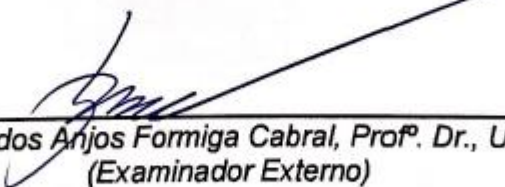
Sandro Marden Torres, Prof^o. Ph.D., UFPB
(Presidente, Orientador)



, Prof^o Antônio Farias Leal, Dr. IFPB
(Examinadora Interno)



Marçal Rosas Lima Filho, Prof^o. Dr. UFPB
(Examinador Interno)



Lucídio dos Anjos Formiga Cabral, Prof^o. Dr., UFPB
(Examinador Externo)



Eliana Cristina Barreto Monteiro, Prof^a. Dra., POLI/UPE
(Examinador Externo)

João Pessoa – PB
Maio, 2019

Dedico incondicionalmente essa minha conquista aos meus pais, Fernanda e Joaquim, que já não se encontram mais entre nós. Almas gêmeas, que se dedicaram intensamente a família, com a criação dos seus filhos e netos, transmitindo valores éticos, morais e de respeito ao próximo. Um exemplo a todos que conviveram com eles ao longo de suas trajetórias de vida

AGRADECIMENTOS

São tantos amigos que participaram direta ou indiretamente dessa minha empreitada, que tenho receio de esquecer alguém. Me perdoem se por um acaso eu não consiga nomear todos que contribuíram para essa conquista, que demorou uma eternidade, mas que agora saiu.

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador Sandro Marden Torres, pelo incentivo, apoio e principalmente pelas contribuições e ensinamentos valiosos. Pela afinidade ao longo de todos esses anos de convivência, extrapolando e muito a orientação da minha tese, o considero um grande amigo que posso contar para o que der e vier.

Ainda no âmbito da UFPB, não posso deixar de lembrar os professores que, de uma forma ou de outra, tiveram presentes ao longo desses 5 anos, tornando as estadas em João Pessoa mais agradáveis, como Andressa, Rodney, Lucídio, Alessandro. Além desses professores, tem dois em especial, Antônio Leal e Marçal, que pelo convívio mais próximo e afinidades tornaram-se meus amigos, muito além do que colegas de profissão.

Faço um agradecimento especial ao meu amigo de longas datas, Aluísio Caldas, colega de doutorado, que vivenciou comigo ao longo desses eternos 5 anos, muitas alegrias, tristezas, angústias e incertezas que tornaram a nossa amizade mais forte.

Aos colegas de disciplinas do PPCEM e aos técnicos dos laboratórios e servidores do programa, pelo apoio durante os exames e atividades do curso. Em especial, não posso deixar de citar dois grandes colegas e amigos que me ajudaram bastante nessa trajetória, me auxiliando nos ensaios e apoio logístico, Ricardo e Tiago.

Institucionalmente gostaria de agradecer a Elizabeth Cimentos pelo apoio na preparação das amostras e, mais especificamente a TECOMAT, que me ajudou financeira e operacionalmente na realização dos ensaios. Nesses ensaios na TECOMAT, não poderia deixar de citar nominalmente Alessandro, Thaisa e, principalmente, o meu amigo Melque que com sua criatividade nata, me auxílio na concepção e fabricação de alguns equipamentos.

Dentro do seio família gostaria de externar gratidão aos meus dois filhos, Tiago e Lucas pela paciência com que levaram essa minha empreitada, bem como pedir desculpas por muitos momentos de ausência, sabendo que essa conquista também é de vocês.

Por fim, gostaria de agradecer o apoio de Marília, que pegou essa minha trajetória no meio do caminho, e com muito amor e paciência me deu incentivo para que eu pudesse finalizar mais essa etapa de minha vida.

RESUMO

Desde 2005, quando a RAA foi diagnosticada em fundações de edifícios na cidade de Recife, estado de Pernambuco, a engenharia nacional e a academia tomaram uma postura bastante pro-ativa para o problema. Até então, no Brasil, a preocupação e prevenção para esse mecanismo de deterioração do concreto se resumia a grandes obras de infraestrutura, principalmente, barragens e hidroelétricas.

Até então, a normalização brasileira não contemplava normas que tratassem do tema, que pudessem nortear a engenharia nacional para prevenção do problema. Logo após esses casos e a divulgação a nível nacional, foi formada uma comissão da ABNT para elaboração de normas específicas sobre RAA. Em 2008, esses conjuntos de normas (NBR 15.577) entrou em vigor, estando já na sua segunda revisão.

Com a conscientização do problema, construtoras e empreiteiras em todo país começaram a se preocupar com a reatividade dos agregados, exigindo dos seus fornecedores de concreto e pedreiras, ensaios de reatividade e de mitigação. No tocante a academia, muitos grupos de pesquisa em todo o país começaram a produzir trabalhos científicos cujo enfoque é a reação álcali-agregado. Na grande maioria desses trabalhos, são utilizados os ensaios tecnológicos definidos pela normalização brasileira.

A pesquisa proposta nesse trabalho terá uma abordagem inédita, utilizando técnicas de DRX e MEV para identificação de características microestruturais que possam levar a comprovar o potencial de reatividade dos agregados por essas técnicas não convencionais para RAA.

Para essa pesquisa, estão sendo utilizados 15 agregados graúdos de diversas regiões do Nordeste, com níveis de reatividade distintos. Nesses agregados serão realizados todos os ensaios tecnológicos preconizados em norma para validação dos resultados obtidos.

Palavras-Chave: *RAA, Expansão acelerada em barras de argamassa, Expansão em prismas de concreto, Ensaios Microestruturais, Petrografia, DRX, FRX, MEV.*

ABSTRACT

Since 2005, when the RAA was diagnosed in building foundations in the city of Recife, state of Pernambuco, national engineering and academia have taken a very proactive stance towards the problem. Until then, in Brazil, the concern and prevention for this mechanism of concrete deterioration was summed up to major infrastructure works, mainly dams and hydroelectric.

Until then, Brazilian normalization did not contemplate norms that dealt with the issue, which could guide national engineering to prevent the problem. Soon after these cases and disclosure at national level, an ABNT commission was formed to develop specific standards on AAR. In 2008, these sets of standards (NBR 15.577) entered into force and is already in its second review.

With awareness of the problem, construction companies and contractors throughout the country began to worry about the reactivity of households, requiring their concrete suppliers and quarries, reactivity and mitigation tests. With regard to academia, many research groups across the country have begun to produce scientific work whose focus is the alkali-aggregate reaction. In the vast majority of these studies, technological trials defined by Brazilian normalization are used.

The research proposed in this work will have an unprecedented approach, using DRX and SEM techniques to identify microstructural characteristics that can lead to proof the potential for reactivity of aggregates by these unconventional techniques for RAA.

For this research, 15 large aggregates from several regions of the Northeast are being used, with different levels of reactivity. In these aggregates will be carried out all the technological tests recommended as a standard for validation of the results obtained.

Keywords: RAA, Accelerated expansion in mortar bars, Expansion in concrete prisms, Microstructural Tests, Petrography, DRX, FRX, MEV.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Bloco de coroamento da ponte Paulo Guerra com intenso quadro fissuratório induzido pela expansão devido à RAA (Fonte: Autor).	30
Figura 2.2 - Um dos blocos de fundação em que foi empregado o concreto da concreteira B. (Fonte: Autor)	33
Figura 2.3 - Visão de 2 blocos, sendo que o da direita, com concreto fornecido pela concreteira B está intensamente fissurado, já preparado para injeção de epóxi, enquanto o bloco da esquerda, executado com o concreto da concreteira A sem apresentar nenhuma fissura. (Fonte: Autor)	34
Figura 2.4 - Visão geral de um bloco de fundação do edifício público, onde pode ser observado as superfícies laterais, recém limpas, apresentando um quadro fissuratório. (Fonte: Autor)	37
Figura 2.5 - Detalhe de uma trinca na superfície lateral de um bloco, com ruptura de uma costela (armadura horizontal) no encontro de duas superfícies laterais. (Fonte: Autor)	37
Figura 2.6 - Fissuras nas faces laterais de um bloco. (Fonte: Autor)	38
Figura 2.7 - Pilar de um edifício residencial de 16 pavimentos fissurado pela RAA. (Fonte: Autor)	40
Figura 2.8 - Dormentes de concreto protendido no pátio de estocagem fissurados (Fonte: Autor)	41
Figura 2.9 - A mapa do lado esquerda mostra a localização dentro da região Nordeste em que os agregados graúdos se apresentaram potencialmente inócuos, enquanto o mapa do lado direito mostra a localização dos agregados que foram classificados como potencialmente reativos (SILVA, L. G. V)	43
Figura 5.1 - Fluxograma do programa experimental	52
Figura 6.1. - Ensaio acelerado das barras de argamassa – NBR 15577-4 (ABNT, 2018)	77

Figura 6.2. - Ensaio de prisma de concreto – NBR 15577- 6 (ABNT, 2018)	78
Figura 6.3. - Ensaio Petrográfico – NBR 15577- 3 (ABNT, 2018)	78
Figura 6.4. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 55 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto	79
Figura 6.5. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 56 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto	80
Figura 6.6. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 57 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto	80
Figura 6.7. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 58 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto	81
Figura 6.8. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 59 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto	81
Figura 6.9. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 60 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto	82
Figura 6.10. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 61 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto	82
Figura 6.11. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 62 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto	83
Figura 6.12. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 63 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto	83

Figura 6.13. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 64 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto -----	84
Figura 6.14. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 65 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto -----	84
Figura 6.15. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 66 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto -----	85
Figura 6.16. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 67 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto -----	85
Figura 6.17. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 68 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto -----	86
Figura 6.18. - Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 69 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto -----	86
Figura 6.19. - Gráfico de correlação entre as expansões pelo método acelerado das barras de argamassa e método do prisma de concreto	98
Figura 6.20. - Taxas de expansão dos agregados 55 e 56 no ensaio de prisma de concreto	100
Figura 6.21. - Taxas de expansão dos agregados 57 e 58 no ensaio de prisma de concreto	100
Figura 6.22. - Taxas de expansão dos agregados 59 e 60 no ensaio de prisma de concreto	101
Figura 6.23. - Taxas de expansão dos agregados 61 e 62 no ensaio de prisma de concreto	101

Figura 6.24. - Taxas de expansão dos agregados 63 e 64 no ensaio de prisma de concreto	101
Figura 6.25. - Taxas de expansão dos agregados 65 e 66 no ensaio de prisma de concreto	102
Figura 6.26. - Taxas de expansão dos agregados 67 e 68 no ensaio de prisma de concreto	102
Figura 6.27. - Taxas de expansão dos agregados 69 no ensaio de prisma de concreto	102
Figura 7.1. - Amostra de agregado em pó sendo pesada em balança	108
Figura 7.2. - Amostra com 2g de agregado em pó sendo colocado do erlenmeyer para ser atacado em solução alcalina	109
Figura 7.3. - Erlenmeyer adaptado para suportar a pressão a uma temperatura de 80° durante 14 dias sem perda da solução por evaporação, sendo composto por contra rosca, anel e tampa de nylon, além de borracha no interior da tampa	109
Figura 7.4. - Anel do Erlenmeyer sendo vedado com veda rosca líquida em sua borda com a amostra em pó do agregado e solução alcalina já acondicionada em seu interior	110
Figura 7.5.- Detalhe do banho maria com 03 erlenmeyers fixados a placa com dispositivo de agitação pronto para receber lâmina d'água e a campânola (tampa) para ser ligado o dispositivo de aquecimento (termostato digital)	110
Figura 7.6. - Detalhe de amostra já atacada armazenada em um Becker sendo a solução alcalina utilizada no ataque neutralizada com HCl, sendo a operação realizada com auxílio de uma pipeta e um medidor de pH de bancada digital com eletrodo de pH e de temperatura	111
Figura 7.7 - Detalhe do processo de filtração da solução da amostra atacada. A solução neutralizada com o pó é colocada sobre o microfiltro no porta-filtro. A solução por gravidade e auxiliada pelo vácuo da bomba passa pelo microfiltro, ficando retido sobre o microfiltro o pó atacado. O pó atacado sobre o microfiltro foi lavado várias vezes com água destilada para a remoção do NaCl e a água de lavagem armazenada em beckers para medição da condutividade elétrica. O	

processo de lavagem só era interrompido quando a condutividade elétrica quando a água de lavagem era inferior a 300 uS/cm111

Figura 7.8. - Manobra com beakers para controle da água de lavagem do pó atacado 112

Figura 7.9. - Cadinhos de porcelana dentro da estufa com o da esquerda contendo microfiltros utilizados na lavagem e o da direita com pó atacado com água de lavagem utilizada para descolamento do pó do microfiltro 112

Figura 7.10. - Pó de agregado atacado após a completa secagem em estufa...113

Figura 7.11. - Cadinho de porcelana a frente contendo água de lavagem com NaCl dissolvido originado da neutralização da solução alcalina 113

Figura 7.12. - Após a secagem em estufa o pó de agregado e o sal foram armazenados em eppendorfs para serem ensaiados no DRX 114

Figura 7.13. - Equipamento D2 Phaser da Bruker para ensaios de Difratoograma de Raio X - DRX (Fonte – Próprio autor/2018) 115

Figura 7.14. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 65 118

Figura 7.15. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 57 119

Figura 7.16. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 56 119

Figura 7.17. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 66 120

Figura 7.18. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 63 120

Figura 7.19. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 68 121

Figura 7.20. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 64 121

Figura 7.21. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 60 122

Figura 7.22. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 59 122

Figura 7.23. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 58 123

Figura 7.24. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 67 123

Figura 7.25. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 61	124
Figura 7.26. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 69	124
Figura 7.27. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 55	125
Figura 7.28. - Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 62	125
Figura 7.29. - Correlação entre o quartzo dissolvido e expansão acelerada em barras de argamassa	128
Figura 7.30. - Correlação entre o quartzo dissolvido e expansão em prismas de concreto	129
Figura 7.31. - Correlação entre o grau de cristalinidade da rocha não atacada e a expansão acelerada em barras de argamassa	129
Figura 7.32. - Correlação entre o grau de cristalinidade da rocha atacada e a expansão acelerada em barras de argamassa	130
Figura 7.33. - Correlação entre o grau de cristalinidade da rocha não atacada e a expansão em prismas de concreto	130
Figura 7.34. - Correlação entre o grau de cristalinidade da rocha atacada e a expansão em prismas de concreto	131
Figura 8.1.- Etapa de preparação das amostras (Fonte próprio autor – 2019)...	135
Figura 8.2. Rocha com fases mineralógicas distintas, visualizadas no MEV Microscópio eletrônico de Varredura	137
Figura 8.3.- Imagem coloridas pelo MAZE onde cada cor representa uma fase no agregado	138
Figura 8.4. - Análise de Imagem pelo Maze para o agregado 65	139
Figura 8.5. - Análise de Imagem pelo Maze para o agregado 56	140
Figura 8.6. - Análise de Imagem pelo Maze para o agregado 60	140
Figura 8.7.- Análise de Imagem pelo Maze para o agregado 64	141
Figura 8.8.- Análise de Imagem pelo Maze para o agregado 59	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. - Dados do concreto e do agregado graúdo das concretagens de um caso de RAA na cidade de Recife	35
Tabela 5.1.- Pedreiras com suas respectivas localizações utilizadas no estudo..	50
Tabela 6.1.- Limites para classificação da reatividade potencial de agregados pelos métodos de ensaios da NBR 15577-4 (ABNT, 2018) e NBR 15577-6 (ABNT, 2018). (NBR 15577 parte 1 (ABNT,2018)	75
Tabela 6.2. - Resumo dos resultados de reatividade dos agregados utilizando o método acelerado das barras de argamassa (NBR 15577– 4), o método dos prismas de concreto (NBR 15577-6), o método petrográfico (NBR 15577 – 3) e a classificação final estabelecida pela NBR 15577 1.....	88
Tabela 6.3. - Características petrográficas dos agregados e a classificação quanto a reatividade estabelecida pelo petrógrafo	95
Tabela 6.4. - Análise comparativa entre os resultados da reatividade dos agregados estudados reatividade nos ensaios normalizados	97
Tabela 7.1. - Informações sobre o procedimento de ataque com solução alcalina realizado nas amostras	116
Tabela 7.2. - Percentuais dos principais óxidos fundamentais das rochas dos agregados estudados	117
Tabela 8.3. Resumo dos resultados obtidos no ensaio de DRX	127

Efeito da Distribuição Microestrutural de Fases Mineralógicas na Susceptibilidade de Rochas da Região Nordeste de Desenvolverem Reação Álcali-Agregado

Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade

sumário

1.	INTRODUÇÃO AO TEMA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO	18
2.	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	28
3.	OBJETIVOS DA PESQUISA	46
4.	ORIGINALIDADE DA PESQUISA	48
5.	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL GERAL.....	50
5.1.	Planejamento dos ensaios tecnológicos	51
5.2.	Planejamento dos ensaios com material em pó	51
5.3.	Planejamento dos ensaios com as partículas dos agregados	55
6.	CAPÍTULO I: Agregados graúdos da região Nordeste do Brasil e sua Suscetibilidade no desenvolvimento de reação álcali agregado nos concretos	
6.1	Introdução	58
6.2	Revisão bibliográfica	58
6.2.1	Métodos de ensaio para avaliação da reatividade potencial de agregados Brasil e no Mundo	58
6.2.2.	Histórico de métodos de ensaio no mundo	60
6.2.2.1.	Análise petrográfica	65

6.2.2.2. Método acelerado das barras de argamassa	67
6.2.2.3. Método dos prismas de concreto	71
6.2.3. Normalização brasileira com relação à RAA	73
6.3. Programa experimental	77
6.4. Resultados	79
6.5. Análise dos resultados	89
6.5.1. Níveis de reatividade pelo método dos prismas de concreto NBR 15577-6	90
6.5.2. Níveis de reatividade pelo método acelerado das barras de argamassa BR 15577- 4	91
6.5.3. Análise petrográfica NBR 15577- 3	92
6.5.4. Análise comparativa entre os ensaios normativos	95
6.5.5. Taxa de expansão	99
6.6. Conclusões	103

7

CAPÍTULO II: Distribuição microestrutural das fases mineralógicas de alguns agregados da Região Nordeste do Brasil e seu efeito na Reação Álcali agregado

7.1. Introdução	106
7.2. Ensaio realizados	106
7.2.1. Procedimento para ataque alcalino dos agregados	106
7.2.2. Fluorescência de Raio X	114
7.2.3. Difração de raio X	114
7.3. Resultados	114
7.3.1. Ataque e filtragem	115
7.3.2. Percentual de óxidos fundamentais	116
7.3.3. Difratoograma das rochas	117

7.4. Análise dos resultados	126
7.5. Conclusões	131
8.	
CAPÍTULO III: A influência da estrutura dos poros e microfissuração em agregados graúdos graníticos no desenvolvimento de RAA	
8.1. Introdução	134
8.2. Ensaios realizados	134
8.2.1. Preparação das amostras	134
8.2.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	135
8.2.3. Análise de imagem (Maze)	136
8.3. Análise dos resultados	138
8.4. Conclusões	141
9. Conclusões Gerais	142

1. INTRODUÇÃO AO TEMA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO

A reação álcali-agregado (RAA) pode ser definida como um termo genérico empregado para descrever uma reação química que ocorre no interior do concreto de Cimento Portland. Essa reação envolve os hidróxidos alcalinos fornecidos principalmente pela pasta de cimento endurecida, com minerais reativos contidos nos agregados miúdos ou graúdos utilizados no concreto.

O produto da reação, denominado genericamente de gel sílico alcalino, em contato com a umidade, é capaz de sofrer expansão, induzindo tensões de tração maiores do que o concreto pode suportar, gerando perda de aderência na interface pasta/agregado e macro e microfissurações no concreto.

Esta reação passou despercebida nas décadas de 1920 e 1930, apesar de que várias estruturas de concreto no Estado da Califórnia, Estados Unidos, estavam apresentando quadros fissuratórios severos com poucos anos de serviço. Estas estruturas tinham sido construídas dentro das especificações vigentes, e executadas conforme as boas práticas construtivas conhecidas, não havendo explicação técnica e científica para as manifestações patológicas existentes.

Só em 1940, foi demonstrado por Stanton¹, que a manifestação patológica ocorrida no Estado da Califórnia provinha de um processo deletério intrínseco de expansão dos constituintes do concreto. Através de subseqüentes estudos experimentais, realizados pelo próprio Stanton, concluiu-se que a expansão e a fissuração do concreto foram induzidas pela reação entre os Cimentos Portland, que continham alto teor de álcalis, e os agregados opalinos encontrados na região. Esse fenômeno foi denominado de “reação álcali-agregado” ou RAA.

Logo após a publicação de Stanton, Blanks² e Meissner³ descreveram fissuração e deterioração do concreto da Barragem de Parker, sendo mostrado que os

¹ STANTON, T.E. *Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate*. American Society Civil Engineering, V. 107 p. 54-126. 1940.

² BLANKS, R.F. *Concrete deterioration at Parker Dam*. Eng. News. Rec. 126, 462-465. 1941.

³ MEISSNER, H.S. *Cracking in concrete due to expansion reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker Dam*. American Concrete Institute. V.37, p.549-568. 1941.

produtos da reação álcali/agregado provinham de fragmentos de riolito e andesito, os quais representavam apenas 2% do total do agregado utilizado.

Nos primeiros anos do descobrimento do fenômeno, tinha-se conhecimento de que apenas um pequeno grupo de minerais, presentes nas rochas, era susceptível a desenvolverem RAA, basicamente, opala, calcedônia e alguns vidros vulcânicos, dando a falsa idéia de que o fenômeno se restringia a alguns casos isolados no mundo. Em 1957, essa teoria foi posta à prova, quando Swenson⁴ detectou que agregados carbonáticos estavam reagindo com os álcalis do cimento, em pavimentos de concreto em Kingston, Ontário/Canadá, descobrindo uma nova reação de expansão, bastante distinta da reação álcali-sílica, até então conhecida, sendo denominada de reação álcali-carbonato.

Desde 1940, têm-se multiplicado vertiginosamente o número de casos de estruturas de concreto afetadas pela reação álcali-agregado em todo mundo, devido, em parte, ao crescimento das cidades e a multiplicação das estruturas de concreto, bem como ao próprio envelhecimento dessas estruturas. Juntamente com esses casos, tem-se detectado que uma série de minerais e agregados, que antes eram considerados inócuos e seguros para emprego em concretos, podem apresentar níveis variados de reatividade e, conseqüentemente, danos às estruturas.

Para que a reação ocorra e se desenvolva, é necessária a existência da tríplice aliança, isto é, além da presença no concreto de agregado reativo, deve existir ainda a disponibilidade de álcalis livres e umidade no concreto. A ausência de um desses ingredientes impede o desenvolvimento da reação álcali agregado. Por outro lado, quando os 03 ingredientes fundamentais estão presentes, a temperatura acelera a cinética da reação, aumentando a taxa de expansão e encurtando o tempo para o aparecimento dos sintomas.

Caso existam as condicionantes básicas para o desenvolvimento da reação, em ambiente com temperaturas normais, o aparecimento dos primeiros sintomas na

⁴ SWENSON, E.G. ***A reactive aggregate undetected by ASTM tests.*** ASTM Bulletin Nº 266, Philadelphia, Pa. pp 48-57. 1957.

estrutura pode levar, mais comumente, de 5 a 15 anos, entretanto, existem casos em que os sintomas apareceram com 25 a 40 anos⁵. Esta incerteza reside na complexidade da cinética da reação e no mecanismo de expansão, que dependerá do potencial de reatividade do agregado, dimensão dos agregados, da proporção dos reagentes (mineral reativo e álcalis), da disponibilidade de umidade, além da quantidade e distribuição dos poros do concreto, estado de restrição das peças de concreto armado, dentre muitos outros fatores de influência.

Sabe-se que o concreto não necessita estar em contato direto com a água para que o gel venha provocar expansões deletérias. Elementos de concreto que estejam em equilíbrio higroscópico com o ambiente, que possua umidade relativa do ar acima de 70% já podem apresentar expansões, entretanto, acima de 80%, as expansões são mais significativas^{5,6,7}.

Entretanto, os danos induzidos pela reação álcali agregado são mais comuns em peças de concreto mais expostas, que estão enterrados no solo úmido, ou imersos totalmente ou parcialmente em água, ou sujeitos a forte condensação⁸.

Peças com elevado volume de concreto estão mais vulneráveis a expansão, mesmo em condições não favoráveis de umidade para desenvolvimento de expansões deletérias. Esta premissa reside no fato de que água utilizada no amassamento do concreto e, que não reagiu com o cimento, tem dificuldade de sair da peça, podendo ser suficiente para alimentar a expansão por longos anos⁹.

⁵ POOLE, A. B. **Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete**. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p.1-29.

⁶ STARK, D. **The Moisture Condition of Field Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity**. CANMET/ACI Second International Conference on Durability of Concrete, SP-126. American Concrete Institute, Detroit, p. 973-987. 1991.

⁷ BCA. **The Diagnosis of Alkali-silica Reaction – Report of a Working Party**. British Cement Association. Wexham Springs, Slough, U.K. SL3 6PL, p.36. 1992.

⁸ THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. **Structural Effects of Alkali-silica Reaction**. Ed SETO Ltda, London, 1992.

⁹ STARK, D.; DEPUY, G. **Alkali-Silica Reaction in Five Dams in Southwestern United States**. In Proceedings of the Katharine and Bryant Mather International Conference on Durability, Atlanta, April/May. ACI SP 100, p.1759-1786. 1997.

Diversos sintomas visíveis a “*olho nu*” são relatados como consequência do desenvolvimento de RAA nos concretos, servindo de subsídio para o diagnóstico da reação. Os principais sintomas são as bordas de reação em torno dos agregados e o preenchimento parcial ou total dos macroporos e fissuras no interior do concreto pelo gel da reação, sendo ambos observados no concreto fraturado. Um outro sintoma é a macrofissuração localizada nas superfícies dos elementos do concreto, sendo que esse sintoma pode possuir características geométricas bastante diferenciadas, em função da geometria, dimensão e estado de tensão atuante na peça, da densidade e distribuição das armaduras. A tipologia mais tradicionalmente conhecida a do tipo “*mapa*”, isto é, as fissuras formam uma espécie de mosaico na superfície, onde de cada nó são irradiadas 3 fissuras. Ainda pode ocorrer a lixiviação do gel por essas fissuras e escurecimento de suas bordas.

Além dos sintomas descritos, o deslocamento e/ou danos em equipamentos ou em outros elementos apoiados ou em contato com peças afetadas pela RAA, devido à expansão, podem ser indícios do fenômeno.

A principal consequência e preocupação da engenharia, devido ao desenvolvimento da RAA em estruturas de concreto, é a indução de micro e macrofissuração no concreto, levando inevitavelmente à queda nas propriedades mecânicas e na rigidez do concreto podendo comprometer a capacidade resistente do elemento estrutural.

Diversos trabalhos têm sido conduzidos, com o objetivo de avaliar a perda da capacidade mecânica e da rigidez dos concretos, com ou sem restrição, bem como do comportamento estrutural de elementos estruturais armados afetados pela RAA. Para avaliação da influência da expansão nas propriedades do concreto, são comumente empregados corpos de prova cilíndricos e/ou prismáticos, os quais são submetidos a procedimentos para acelerar a reação e a expansão, através da adição complementar de álcalis e expondo os mesmos a temperaturas e umidades elevadas por certo período. Ao longo do ensaio, são

medidas as propriedades dos concretos afetados e os resultados são comparados com os mesmos concretos que não sofreram indução da reação.

Para o caso do estudo do comportamento estrutural de elementos de concreto armado, pesquisadores têm procurado ensaiar pilares e com maior frequência vigas, ambos em escala real, as quais são submetidas a um pré-carregamento, sendo, posteriormente, acelerada a expansão. Diversos parâmetros são obtidos durante a expansão, sendo, no final, avaliada a capacidade resistente da peça, na grande maioria, através de ensaio de carregamento estático de flexão, comparando os resultados com peças similares e que não sofreram o efeito da expansão.

No que diz respeito ao comportamento mecânico do concreto, diversos trabalhos têm demonstrado, em ensaios acelerados, uma queda acentuada nas propriedades mecânicas e no módulo de deformação. Fan; Hanson¹⁰ em um trabalho com corpos de prova e vigas, obtiveram queda nos resultados na resistência à compressão, resistência à tração na compressão diametral e módulo de deformação, em apenas 6 meses, respectivamente, de 24%, 38% e 31%, em relação aos valores obtidos aos 28 dias de idade.

Batic et al.¹¹ encontraram 22% de queda na resistência à compressão e 34% no módulo de deformação, aos 75 dias, quando a expansão atingiu valor em torno de 0,13%. Já Pleau et al.¹² afirmam que a resistência à tração não é mais afetada do que a compressão, entretanto, os autores concordam que existe uma queda mais acentuada do módulo de deformação em relação às demais propriedades. Com mais trabalhos pesquisados^{13,14,15}, pode-se afirmar que existe um consenso de

¹⁰ FAN, F.; HANSON, J.M. *Effect of Alkali Reaction Expansion and Cracking on Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams*. *ACI Structural Journal*, September-October. p 498-504. 1998.

¹¹ BATIC, O.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R. *On the Effect of ASR Cracking on the Mechanical Behaviour of Concrete in Tension and Compression*. Proceedings... 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, China. pp.1136-1141. 2004.

¹² PLEAU, R.; BÉRUBÉ, M.A; PIGEON, M.; FOURNIER, B.; RAPHAEL, S. *Mechanical Behavior of Concrete Affected by ASR*. Proceedings... 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Kyoto, Japan. pp.721-726. 1989.

¹³ KOBAYASHY, K.; KOJIMA, T.; UTOH, S.; ONO, K. *Repair of Concrete Structures Damaged by Alkali-Silica Reactions and its Effects*. Proceedings... 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Kyoto, Japan. pp.863-868. 1989.

que a rigidez, isto é, o módulo de deformação do concreto decresce mais rapidamente do que a sua resistência, e a resistência à tração é mais afetada do que a resistência à compressão.

Vale ressaltar que os resultados dos trabalhos descritos acima foram obtidos de corpos de prova que apresentaram expansão sem nenhum tipo de restrição, isto é, expansão livre. Nestes casos as fissuras, induzidas pela reação, devem apresentar intensidade semelhante em qualquer direção de medida, levando também a queda de desempenho uniforme das propriedades mecânicas e de rigidez em qualquer direção que determine estas propriedades.

Entretanto, não é o que se tem observado, em pesquisas de laboratório e investigações de campo. Multon et al.¹⁶, em um experimento para avaliação do comportamento estrutural de vigas afetadas pela reação, mediram a anisotropia das expansões em corpos de prova sem restrição, encontrando o dobro da expansão na direção vertical do que na horizontal. Larive et al.¹⁷ obtiveram também expansões bem superiores na direção longitudinal, isto é, na direção de lançamento do concreto, do que na direção transversal. Os autores¹⁷ creditaram a anisotropia das expansões devido ao processo de vibração durante a moldagem, que leva a um acúmulo maior de água sob as partículas dos agregados, levando a uma zona de maior porosidade. Segundo os autores, esta característica é mais pronunciada quando se emprega agregados lamelares.

Menos frequente é a avaliação das propriedades mecânicas do concreto restringindo a expansão, através da aplicação de um pré-carregamento nos corpos de prova. Nesta linha de ensaio, existem dois trabalhos muito interessantes que indicam a influência da reação bastante diferenciada quando se aplica

¹⁴ OHNO, S.; YOSHIOKA, Y.; SHINOSAKI, Y.; MORIKAWA, T. **The Mechanical Behaviour of Beams Coated After Alkali Silica Reaction Damage**. Proceedings... 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Kyoto, Japan. pp.697-702. 1989.

¹⁵ BALLIVY, G.; KHAYAT, K.; GRAVEL, C.; HOULE, D. **Influence of Reinforcement Steel on the Expansion of Concrete Affected by Alkali-Aggregate Reaction**. Proceedings... 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Quebec, Canada. pp.919-928. 2000.

¹⁶ MULTON, S.; SEIGNOL, J. -F.; TOUTLEMOND, F. **Structural Behavior of Concrete Beams Affected by Alkali-Silica Reaction**. ACI Materials Journal. March-April, pp.67-75. 2005.

¹⁷ LARIVE, C.; TOUTLEMONDE, F.; JOLY, M.; LAPLAND, A. **Heterogeneity and Anisotropy in ASR-Affected Concrete Consequences for Structural Assessment**. Proceedings... 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Quebec, Canada. pp.969-978. 2000.

tensões unidirecionais antes de expor o concreto aos ensaios acelerados para indução da reação e expansão.

Um dos trabalhos foi publicado por Rigden et al.¹⁸ que impuseram tensões confinantes unidirecionais de 0 MPa, 4 MPa e 8 MPa em pequenos blocos de concreto, antes de colocá-los em câmara úmida 38°C. Após o período de indução da reação, foram extraídos testemunhos dos blocos nas direções paralelas e perpendiculares a aplicação do carregamento. Os autores chegaram à conclusão que quanto maior o nível de carregamento, maiores serão os danos na direção perpendicular, sendo que, em contrapartida, os danos na direção paralela às tensões são reduzidos. A diferença de danos refletiu nas propriedades no concreto, sendo obtida uma resistência à compressão e um módulo de deformação de 42% e 77% superiores, respectivamente, na direção paralela a tensão de confinamento de 8 MPa, em relação a direção perpendicular. Já para os blocos sem tensão confinante, a queda nas propriedades foi equivalente, independente da direção do ensaio.

Resultados semelhantes foram obtidos por Majlesi et al.¹⁹, quando avaliaram as propriedades do concreto aplicando tensões unidirecionais ao concreto. Os autores afirmaram que as tensões externas de confinamento modificam as características das fissuras sobre a superfície do concreto, podendo até eliminar estas fissuras na direção paralela às tensões de confinamento, mudando a configuração das fissuras do tipo “Mapa”, encontrada em concretos sem restrição, afetados pela RAA.

Diante deste fato, é presumível que a armadura no interior dos elementos concreto de armado também tenha um efeito de restrição às expansões induzidas pela RAA, além das restrições induzidas pelas tensões de compressão geradas pelos carregamentos externos. O efeito da restrição da armadura também é objeto de

¹⁸ RIGDEN, S.R.; SALAM, J.M.; BURLEY, E. *The Influence of Stress Intensity and Orientation upon the Mechanical Properties of ASR affected Concrete. Proceedings... 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*. London, UK. Pp. 866-876. 1992.

¹⁹ MAJLESI, Y.; RIGDEN, S.R.; BURLEY, E. *Restraint Effects on the Performance of Various ASR structural Elements*. Proceedings...10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Melbourne, Australia. Pp. 442-449. 1996.

muitos trabalhos experimentais. Nesta linha de pesquisa, Ballivy et al¹⁵, além de avaliarem a influência da RAA em corpos de prova sem restrição, moldaram blocos de concreto armados e não armados e aceleraram a reação e mediram as expansões. Os pesquisadores concluíram que ocorreu um decréscimo acentuado das expansões dos blocos armados, em relação aos blocos sem armadura. Foi citado ainda que as expansões verticais foram bem superiores as expansões horizontais, corroborando com as conclusões dos pesquisadores citados anteriormente^{16,17}. Entretanto, esta diferença de expansão não foi encontrada nos blocos armados, sugerindo que as armaduras, além de reduzirem as expansões gerais, também as uniformizam.

Portanto, pode-se concluir que expansões induzidas pela RAA podem ter consequências bastante distintas, quando se avalia o comportamento das propriedades do concreto sem nenhuma restrição, isto é, expansão livre, com os concretos no interior dos elementos estruturais, que estão sob efeito de restrições induzidas por tensões de trabalho e pelas armaduras. Esta característica torna muito mais complexa a avaliação dos danos provocados pela RAA.

Dois trabalhos recentes abordaram análise numérica sobre o tema. O primeiro²⁰ relativo a um estudo numérico sobre a deterioração do concreto armado em consequência de tensões induzidas pela expansão do concreto devido à RAA. O segundo trabalho²¹ aborda a influência da fluência e do estado de tensão na expansão induzida pela reação álcali agregado no concreto sob efeito de restrição.

Nessa linha de avaliar os efeitos da restrição imposta pelo estado de tensão e pelas armaduras à expansão induzida pela reação álcali agregado na capacidade resistente de elementos estruturais, pesquisadores buscam respostas em estudos experimentais em vigas de concreto armado. Um trabalho interessante foi

²⁰Posterlli, M. C.; Sanches, R. A. K.; Paccola, R. R.; Carrazedo, R.. Numerical Study on Restraintment of Reinforced Concrete due to AAR Expansion. **Proceedings...15th Internacional Conference on Alkali-Aggregate Reaction. São Paulo, Brasil. . 2016.**

²¹Kawabata, Y.; Seignol, J. F.; Martin, R. P.; Toutlemonde, F.. Influence of Creep and Stress States on Alkali-Silica Reaction Induced-Expansion of Concrete under Restraint. **Proceedings...15th Internacional Conference on Alkali-Aggregate Reaction. São Paulo, Brasil. . 2016.**

publicado por Inoue et al.²² que moldaram pequenas vigas de concreto armado, variando a taxa de armadura longitudinal das vigas. No experimento, as vigas foram submetidas à exposição de umidade e temperatura elevadas para acelerar a reação e as expansões, sem pré-carregamento, sendo medida as deformações de tração induzidas nas barras longitudinais, devido à expansão do concreto. Os autores concluíram que a expansão do concreto foi restringida pela armadura, gerando tração no aço e compressão no concreto, sendo denominado esse efeito de “protensão química”. Essa protensão química variou em função da taxa de armadura, chegando a uma tensão de compressão no concreto estimada de 6,2MPa na viga com maior taxa de armadura, e de 4,2MPa, na viga de menor taxa.

Uma outra conclusão importante do trabalho, obtida após o ensaio de flexão realizado nas vigas afetadas pela reação e as respectivas vigas de referência, é que a capacidade de carga e deformações obtidas nas vigas afetadas pela reação, no ensaio de flexão, não tiveram de diferenças significativas em relação as vigas de referência. Vale ressaltar que no experimento, a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de deformação do concreto das vigas, medidos em corpos de prova, sem restrição, tiveram resultados, respectivamente, de 64%, 59% e 48% em relação aos corpos de prova que não sofreram os efeitos da reação.

Outros trabalhos^{23,24} empregando ensaios em vigas, chegaram a conclusões semelhantes, afirmando que, apesar das fissuras visíveis ocorridas nas vigas, induzidas pela reação, a capacidade de carga a flexão foi aproximadamente a mesma das vigas de referência que não sofreram danos pela RAA.

²² INOUE, S.; FUJJI, M.; KOBAYASHI, K.; NAKANO, K. **Structural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Affected by Alkali-Silica Reaction**. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Kyoto, Japan. pp.727-732. 1989.

²³ MONETTE, L.; GARDNER, J.; GRATTAN-BELEEW, P. **Structural Effects of the Alkali-Silica Reaction on Non-Loaded and Loaded Reinforced Concrete Beams**. Proceedings... 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Quebec, Canada. pp.999-1008. 2000.

²⁴ ABE, M.; KIKUTA, S.; MASUDA, Y.; TOMAZAWA, F. **Experimental Study on Mechanical Behaviour of Reinforced Concrete Members Affected by Alkali-Aggregate Reaction**. Proceedings... 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Kyoto, Japan. pp.691-697. 1989.

Diversos autores, que estudaram o comportamento mecânico de vigas sob efeito da reação, afirmaram que desempenho satisfatório desses elementos em relação às vigas de referência, deu-se devido ao efeito da protensão química. Apesar desta conclusão, Smaoui²⁵, através de um trabalho experimental para avaliação das tensões induzidas nas armaduras em concretos empregando vários agregados reativos, concluiu que, dependendo da taxa de armadura e da reatividade do agregado, tensões desenvolvidas nas armaduras longitudinais e estribos poderiam ultrapassar seu limite elástico, isto é, as tensões atuantes poderiam ser superiores ao seu limite de escoamento.

Swamy; Al Asali²² afirmaram que expansões na ordem de 0,1% poderiam induzir tensões de tração na armadura na ordem de 50 a 100 MPa, sendo este valor dependente do tipo e das dimensões do elemento.

Nessa breve introdução se observa a grande complexidade desse mecanismo de deterioração do concreto de cimento Portland, tanto no que diz respeito a reação em si, como as suas consequências nas estruturas de concreto simples e armado, sendo função da quantidade de variáveis envolvidas no processo.

Apesar de inúmeras pesquisas terem sido realizadas desde o seu diagnóstico, em 1940, ainda se tem muito a se avançar com o estado da arte nesse tema tão fascinante que é a Reação Álcali-Agregado.

²⁵ SMAOUI, N.; BÉRUBE, M. A.; FOURNIER, B.; BISSONNETTE, B. **Stresses Induced by ASR in Reinforced Concrete Incorporating Various Aggregates**. Proceedings... 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, China. pp.1191-1201. 2004.

2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

No que diz respeito à reação álcali-agregado, apesar do fenômeno ter sido descoberto, no mundo, na década de 40, existiam poucos relatos de estruturas ditas convencionais, de pequenas dimensões, afetadas no Brasil até 2005. Até então, apenas em obras hidráulicas, como barragens e hidroelétricas, o fenômeno tinha despertado interesse, em parte por este tipo de estrutura ser mais susceptível a reação, como também a falta de percepção da engenharia nacional de que o concreto de pontes, viadutos, edifícios e outras estruturas também poderiam ser afetadas por RAA.

Um exemplo de estruturas de hidráulicas que se situam na nossa região nordeste e que a muito tempo são objetivos de preocupação e estudo é o conjunto de barragens e hidroelétricas do Sistema Chesf, responsável pela geração de energia elétrica a partir das águas do Rio São Francisco.

Todas as 07 usinas que compõe o complexo, Sobradinho, Moxotó (Apolônio Sales), Paulo Afonso I, II, III e IV e Xingó apresentam reação álcali-agregado em graus de intensidade distintos. Um caso ícone, de maior relevância, é o exemplo de Moxotó, que foi concluída em 1971 e que já em 1983 já apresentava sintomas de expansão.

Essa estrutura chegou a níveis inaceitáveis de expansão devido à RAA, o que levou a necessidade de se interromper a produção de energia e a se realizar intervenções, como cortes transversais no concreto para alívio de tensões e reduzir o tamanho das aletas das turbinas para postergar a vida útil da usina. Como não existem ações para se neutralizar ou paralisar as expansões devido à RAA, essa estrutura, como outras do complexo, continuam sendo monitoradas indefinitivamente, levando a um custo considerável nas intervenções e monitoramento do maciço.

Esse monitoramento consiste na instalação de equipamentos que medem continuamente as movimentações lineares e inclinações dessas estruturas de concreto, para avaliar futuramente a necessidade de novas intervenções.

Esses problemas de expansões das estruturas de concreto enfrentados pela CHESF, devido à RAA, já foram objeto de publicações de inúmeros trabalhos científicos publicados em revistas técnicas e congressos nacionais e internacionais^{26,27,28}.

No Brasil, até 2005, alguns trabalhos isolados foram publicados reportando casos de ocorrência de RAA em estruturas comuns, bem como levantamento do potencial de reatividade em determinadas regiões do País. Entretanto, estes trabalhos não despertaram a conscientização para se conhecer extensão da RAA no Brasil.

Contudo, só a partir de 2005, a engenharia brasileira alertou para o problema mais abrangente da RAA. Nesse ano houve uma conscientização de que a RAA poderia também afetar elementos de concreto armado de estruturas como viadutos, pontes, edifícios, galerias, etc. Essa percepção já era conhecida fazia tempo em muitos outros países.

Esse despertar e sua disseminação pelo Brasil tomou “força” a partir de 2005 na cidade de Recife, capital do Estado de Pernambuco estabeleceu ao acaso. Esse despertar se deu partir do desabamento de um edifício de concreto armado de 12 pavimentos, que não teve nenhuma correlação com RAA, mas gerou pânico na engenharia pernambucana e na sociedade, o que levou a realização sistemática de inspeções em fundações.

²⁶ CAVALCANTI, A. J. C. T.; SILVEIRA, J. F.; DEGASPARE, J. C. A.. Investigations on the Moxotó powerhouse concrete affected by álcali-silica reation. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGREGGATE REACTION IN CONCRETE, 8, 1989, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto, 1989. P 797-802.

²⁷ CAVALCANTI, A. J. C. T; DEGASPARE, J. C. A. AAR management at Paulo Afonso IV power plant – Brasil. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGREGGATE REACTION IN CONCRETE, 11, 2000, Quebec. **Proceedings...** Quebec, Canada, 2000. P 1263-1272.

²⁸ HASPARYK, N. P. et al. Deterioration index and properties of concretes from Paulo Afonso power plants – Brasil – affected by the álcali aggregate reation. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGREGGATE REACTION IN CONCRETE, 12, 2004, Beijing. **Proceedings...** Beijing, China, 2004. P 888-897.

Apesar da divulgação ampla dos problemas encontrados na cidade RMR a partir de 2005, um caso, em 2001, foi diagnosticado como RAA nos blocos de coroamento da fundação de uma das principais pontes da Cidade de Recife, a Ponte Paulo Guerra, que liga os bairros centrais da cidade com o Bairro de Boa Viagem, conforme visualizado nas foto da figura 2.1.



Figura 2.1. Bloco de coroamento da ponte Paulo Guerra com intenso quadro fissuratório induzido pela expansão devido à RAA (Fonte: Autor).

Essa ponte foi construída em 1977 e poucos anos depois motoristas e pedestres que passavam pela ponte Agamenon Magalhães, com traçado paralelo e próxima a Ponte Paulo Guerra, observavam nitidamente as fissuras nas laterais dos blocos, quando a maré estava baixa.

Em 2001 a prefeitura licitou um trabalho de inspeção para diagnóstico do problema, com o Prof. Paulo Helene, professor da USP e renomado pesquisador na área, cujo resultado foi objeto de uma publicação internacional sobre o caso²⁹. Na época, foi indagado a possibilidade muito provável da utilização dos agregados da ponte em outras estruturas da RMR, em função de serem agregados comerciais, entretanto não foi em frente o estudo e a investigação dessa hipótese.

²⁹ HELENE, P.. Reação Álcali-árido en el Encepado del Puente Gobernador Paulo Guerra. uevos Avances en el Estudio de la Corrosión y Protección de la Armadura. Vol: 1. 2002, pg: 39 – 51.

No caso da Ponte Paulo Guerra em 2001, os profissionais envolvidos na investigação cogitaram a possibilidade da existência de inúmeros outros casos de fissuração em elementos de fundação de edifícios e obras d'arte. Essa suspeita tinha fundamento, pois o agregado graúdo utilizado, que foi diagnosticado como reativo, era comercialmente empregado na RMR, entretanto, a suspeita não foi motivadora para aprofundar as investigações.

Entretanto, com a queda do edifício, esse fato motivador ocorreu e inúmeros condomínios por iniciativa própria começaram a inspecionar as fundações dos seus edifícios em 2005. Essas inspeções foram motivadas na época não pela RAA, mas efetivamente em função do desabamento do edifício, cuja causa estava correlacionada com existência de falhas construtivas nos pescoços dos pilares que se encontravam enterrados e inacessíveis.

Nessas inspeções realizadas foi encontrada uma incidência muito grande de fissuração em elementos de fundação, como foi conjecturado no estudo realizado na Ponte Paulo Guerra, 4 anos antes.

Até o final de 2005, das fundações de edifícios inspecionadas pelo autor dessa tese, 18 apresentaram fissuração, sendo que em todas essas 18 fundações foi realizado ensaio petrográfico do concreto, confirmando em todas elas a existência de RAA.

O quadro se tornou tão alarmante que o SINDUSCON/PE começou a promover reuniões quinzenais com seus associados para tratar do tema, tanto sob o ponto de vista técnico, quanto jurídico. Nessas reuniões foram convidados especialistas, especificamente tecnologistas de concreto de barragens, que já tinham familiaridade com esse mecanismo de degradação do concreto.

Concomitantemente a essas reuniões, foi realizado convênio entre o SINDUSCON/PE, Universidade Federal de Pernambuco e o Sebrae para avaliação do Potencial de reatividade dos agregados da Região Metropolitana do Recife.

O trabalho com esses resultados foi apresentado no II Simpósio de Reação Álcali Agregado em Estruturas de Concreto, realizado no Rio de Janeiro³⁰. Os ensaios foram realizados pelo laboratório de Furnas, e compreendeu o ensaio reatividade, pelo método acelerado das barras de argamassa ASTM C 1260³¹, pois na época o Brasil não até então e ensaio petrográfico.

Esse trabalho foi de uma importância bastante grande, em função da possibilidade de se poder correlacionar os agregados graúdos de alguns casos diagnosticados que estavam surgindo na época, com o potencial de reatividade obtido nesse trabalho de investigação.

Interessante e comprobatório foram os casos de fissuração mais intensos em blocos de fundação, observados entre 2005 e 2006, que coincidiram com os agregados graúdos com maiores potenciais de reatividade obtidos no trabalho desenvolvido pelo SINDUSCON/PE.

Dos casos apresentados³² em fundações de edifícios na RMR, pode-se ressaltar um em particular. Esse caso específico teve uma relevância na desmistificação dentro da engenharia pernambucana de que esse mecanismo de expansão em estruturas de concreto não poderia ser o fator determinante de fissuração do concreto nos elementos de fundação de edifícios, que estavam surgindo, à medida que se realizavam inspeções nas fundações.

Ao longo de 2005 alguns engenheiros pernambucanos, principalmente projetistas de estruturas de concreto, relutavam em creditar que os problemas de fissuração recentemente diagnosticados poderiam ter tido como causa principal a expansão interna induzida pela RAA.

³⁰ Andrade, T.; Silva, J. J. R.; Hasparyk, P. N.; Silva, M. C. ***Investigação do Potencial de Reatividade para o Desenvolvimento de RAA dos Agregados Miúdos e Graúdos Comercializados na Região Metropolitana do Recife***. RAA -2006 – II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto (IBRACON). Rio de Janeiro, 2006.

³¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1260-01. **Standard Test Method for Potencial Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)**. Philadelphia. 2001.

³² Andrade, T. ***Histórico de Casos de RAA Ocorridos recentemente em Fundações de Edifícios na Região Metropolitana do Recife***. RAA -2006 – II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto (IBRACON). Rio de Janeiro, 2006.

Esse exemplo foi de um edifício abandonado pela construtora no 10º pavimento, de um total de 26 andares. As obras foram paralisadas em 1995, tendo, portanto, apenas 10 anos quando o estudo e diagnóstico foi realizado. Em 2005 os proprietários conseguiram resgatar judicialmente a posse do edifício e pretendiam retomar a construção por conta própria. Antes de reiniciar a construção, o condomínio contratou um laudo de inspeção para avaliar o estado de conservação da estrutura de concreto.

Nessa avaliação, foi incluído os elementos de concreto armado da fundação. Na investigação dos blocos de fundação foi observado um quadro fissuratório, com tipologia similar aos casos observados em outros blocos de fundação, conforme visualizado na figura 2.2.



Figura 2.2. Um dos blocos de fundação em que foi empregado o concreto da concreteira B.
Fonte: Autor

Entretanto, nesse caso específico, a intensidade de fissuração foi bastante variada, existindo blocos sem nenhum quadro fissuratório junto a blocos bastante fissurados, conforme a figura 2.3.

Nessa figura 2.3 pode-se observar dois blocos de fundação, um deles intensamente fissurado, enquanto o outro ao lado, estruturalmente idêntico, com mesma dimensão, mesma armadura e números de estacas e carregamento muito próximo, não apresentava nenhuma fissura.



Figura 2.3. Visão de 2 blocos, sendo que o da direita, com concreto fornecido pela concreteira B está intensamente fissurado, já preparado para injeção de epóxi, enquanto o bloco da esquerda, executado com o concreto da concreteira A sem apresentar nenhuma fissura. Fonte: Autor

O avanço da investigação só foi possível em função de se ter identificado e localizado o engenheiro responsável da empresa pela execução da estrutura de concreto armado. Ainda após quase 10 anos, esse engenheiro tinha a planta de fundação com as informações da concretagem desses elementos.

Essa planta indicava as datas de concretagens de todos os elementos de fundação, as concreteiras envolvidas no fornecimento do concreto e as resistências à compressão de todas as partidas de concreto (caminhões), o que foi de suma relevância para a análise do caso.

Todos os blocos da fundação foram concretados em 4 etapas, sendo que a 1^a, 2^a e 4^a etapas o concreto foi fornecido pela concreteira A e a 3^a etapa o concreto foi entregue pela concreteira B. Os 06 blocos e 05 blocos executados, respectivamente na 1^a e 2^a etapas, utilizando o concreto da concreteira A, apresentaram quadro fissuratório de baixa intensidade e as fissuras localizadas apenas na região superior do bloco, que poderia ser confundido com fissuras originadas pela retração plástica.

Os 3 blocos referentes à 3^a etapa de concretagem, fornecido pela concreteira B, apresentaram-se intensamente fissurados, sendo que um deles pode ser

visualizado do lado direito e ao fundo da figura 03. Por outro lado, os últimos 03 blocos, executados com o concreto da concreteira A apresentaram-se totalmente íntegros, sem qualquer tipo de fissuração.

A concreteira B, cujos blocos estavam todos fissurados, possuía uma pedreira própria, tendo o agregado dessa pedreira sido classificada como a 3ª com maior potencial de reatividade no estudo realizado pelo SINDUSCON/PE²⁷, enquanto na concreteira A não foi possível identificar a origem do agregado.

Em todas as concretagens foram retirados testemunhos para realização de ensaio petrográfico, e resistência à compressão. Os resultados da petrografia estão mostrados na tabela 2.1.

Tabela 2.1. Dados do concreto e do agregado graúdo das concretagens de um caso de RAA na cidade de Recife²⁸

Características		Concretagem			
		1ª	2ª	3ª	4ª
Concreteira		A	A	B	A
Intensidade das fissuras		Pouca	Pouca	grande	nenhuma
Agregado graúdo	Classificação	Granito porfirítico	Granito porfirítico	Gnaiss cataclástico/milonito	Granito porfirítico
	Estrutura	Maciça	Maciça	Foliada	Maciça
	Minerais reativos	Quartzo deformado com extinção ondulante	Quartzo deformado com extinção ondulante	Quartzo deformado com extinção ondulante e quartzo microcristalino	Quartzo deformado com extinção ondulante

Esse ensaio de petrografia reforçou a informação obtida na planta de fundação, de que a 1ª, 2ª e 4ª concretagens foi utilizada a mesma concreteira, devido ao agregado graúdo ter tido a mesma classificação petrográfica, e que a 3ª concretagem foi de um concreto distinto dos demais, em função de o agregado graúdo empregado tinha uma outra origem.

Além do mais, o agregado graúdo empregado na 3ª concretagem, por ter o quartzo microcristalino como fase, deveria ser mais reativo do que o concreto referente as demais concretagens, corroborando com o quadro fissuratório observado “in loco”.

Outro dado importante foi que a classificação petrográfica obtida no agregado gráudo retirado do concreto coincidia com a mesma classificação da amostra retirada da pedreira, pertencente a concreteira B, que forneceu o concreto referente a 3ª concretagem.

Pode-se considerar esse caso como um dos mais relevantes estudados, que possibilitou um grande avanço no “estado da arte” do problema enfrentado pela engenharia pernambucana a partir de 2005.

Um outro caso relevante encontrado em 2005 na Cidade de Recife³³, muito em função severidade dos danos, das investigações realizadas e da solução para o reforço estrutural foi um edifício público, com apenas 12 anos de construído na época da investigação. Essa edificação tem 16 pavimentos, tendo sido descoberto o problema, em função de ter sido realizado um pequeno corte no terreno, próximo a edificação, para compatibilizar o projeto paisagístico que estava sendo executado.

Nesse caso, todos os 17 elementos da fundação estavam bastante fissurados, sendo encontrada armadura de “costela” e estribos de alguns blocos e cintas rompidos, gerando, na época, uma certa preocupação quanto a estabilidade do edifício. As figuras 2.4, 2.5 e 2.6 mostram alguns desses elementos deteriorados.

Na investigação foram extraídos diversos testemunhos em diversas regiões dos para avaliar o direcionamento das maiores trincas no interior desses elementos, além de em alguns blocos, ter sido escavado todo terreno em sua volta, inclusive a superfície inferior, para se avaliar o estado de fissuração em todas as superfícies desses elementos.

³³ Andrade,T; Silva, J. J. R.; Almeida, R; Patrocínio. J; Kihara, Y; Pecchio,M.. **Diagnóstico de Reação Álcali-Agregado em Blocos de Fundação de um Edifício Público Situado na Cidade do Recife/PE**. RAA -2006 – II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto (IBRACON). Rio de Janeiro, 2006.



Figura 2.4. Visão geral de um bloco de fundação do edifício público, onde pode ser observado as superfícies laterais, recém limpas, apresentando um quadro fissuratório. Fonte: Autor



Figura 2.5. Detalhe de uma trinca na superfície lateral de um bloco, com ruptura de uma costela (armadura horizontal) no encontro de duas superfícies laterais. Fonte: Autor

Esse procedimento ainda não tinha sido realizado nos casos anteriores, tendo se chegado à conclusão de que o quadro fissuratório existente se concentrava apenas na superfície horizontal superior e nas faces laterais desses elementos. Essa característica foi creditada à elevada restrição a expansão em que o

concreto é submetido na região inferior desses elementos, devido ao maior estado de tensão de compressão e maior taxa de armaduras.



Figura 2.6. Fissuras nas faces laterais de um bloco. Fonte: Autor

Quanto aos agregados, foi possível apenas o rastreamento do agregado graúdo a partir do contato com o engenheiro da obra, que informou a concreteira responsável pelo fornecimento do concreto.

Esse agregado foi, muito provavelmente, o de maior potencial de reatividade do estudo realizado no mesmo ano pelo SINDUSCON/PE. A rocha desse agregado graúdo foi classificada petrograficamente como um milonito, contendo como fases reativas o quartzo deformado com extinção ondulante, quartzo microcristalino e quartzo recristalizado. Por sinal, os casos de maior fissuração em elementos de fundação utilizaram esse agregado graúdo no concreto.

Por essa comprovação da reatividade em campo, em condições severas de fissuração, esse agregado já foi utilizado em diversos trabalhos nacionais e internacionais. Apesar da maior reatividade desse agregado específico utilizado em concretos na RMR, com expansão pelo método das barras de argamassa

entre 0,40% e 0,45%, outros agregados graúdos também classificados, petrograficamente, como milonitos e/ou cataclasitos são os agregados problemáticos na RMR e, muito provavelmente, na Região Nordeste do Brasil.

Os casos surgidos frequentemente nesse período na RMR e a divulgação a nível nacional motivou, no final de 2006, a formação do comitê de normalização da reação álcali agregado pela ABNT. Essa norma, a NBR 15577 entrou em vigor em 2008, já tendo sido revisada em 2014 e recentemente recebeu uma nova revisão (2018).

Recentemente tem-se verificado que os casos de RAA não se resumem apenas a elementos de fundação de edifícios, onde o problema de umidade é crítico devido ao elevado nível em que se encontra o lençol freático na Cidade de Recife.

Existem casos de pilares de edifícios com quadros fissuratórios típicos de reação, em que foi diagnosticada a presença de gel e a utilização de agregado potencialmente reativo através da análise petrográfica.

Um desses casos pode ser visualizado na figura 2.7, tendo o edifício 15 pavimentos e aproximadamente 10 anos de idade. Nesse edifício como em todos os outros casos, apenas os pilares de periferia, que estão em contato direto com a chuva se apresentaram fissurados em toda a sua extensão, com exceção dos tramos abaixo da laje de garagem que se projeta além da lâmina principal. Nesses tramos, diferente dos demais, o pilar está protegido da umidade da chuva, que umedece o revestimento externo e o concreto.

Em 2012, nos dormentes de concreto protendido do sistema de trens urbano da RMR foi observado quadro fissuratório típico de expansão interna do concreto, mesmo nos elementos pertencentes ao estoque de reposição que estavam estocados no pátio externo de oficinas, conforme pode ser visualizado na foto da figura 2.8. Nos ensaios petrográficos realizados no concreto das peças foi detectada reação álcali agregado.

Em face desses inúmeros casos, a Cidade de Recife foi citada no livro recentemente reeditado de referência sobre o tema, Alkali-Aggregate Reaction in Concrete—A World Review³⁴, sendo citados dois trabalhos que referenciavam os problemas com RAA^{35,36}.

O ano de 2005 e 2006 e até 2012 foi de muito aprendizado no tocante a RAA na RMR, entretanto, mesmo a partir de 2012 novos casos foram surgindo, chegando em 2018 com mais de uma centena de casos diagnosticados, sem que houvesse um avanço, na Região Nordeste, na publicação de trabalhos relevantes que mantenha o protagonismo da região nesse tema.



Figura 2.7. Pilar de um edifício residencial de 16 pavimentos fissurado pela RAA. Fonte: Autor

Um único fato relevante, mais pela sua abrangência, foi uma pesquisa realizada por um aluno de graduação em engenharia civil da UFPE³⁷, que foi objeto do seu

³⁴ South And Central América – Eduardo M. R Fairbain in: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review. Editor: Ian Sims and Alan Poole. Taylor & Francis Group, London, Uk, 2017. ISBN: 978-315-70895-9

³⁵ Pechio, M.; Kihara, Y.; Battagin, A.F.; Andrade, T.. (2006). Alkali-Aggregate reaction products from Recife Buildings, RAA 2006 IBRACON II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto, Rio de Janeiro

³⁶ Andrade, T; Silva, J. J. R.; Silva, C. M.; Hasparick, N. P.. History of some AAR cases in the Recife region of Brazil. Proceeding of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICCAR), Trodheim.

³⁷ SILVA, L. G. V.. *Estudo e mapeamento dos agregados reativos quanto à Reação Álcali-agregado na Região Nordeste do Brasil*. Trabalho de conclusão de curso do curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco (Orientador Tibério Andrade). Recife, 2016.

trabalho de conclusão de curso (TCC), apresentado em janeiro de 2016. Essa pesquisa forneceu dados sobre a reatividade dos agregados e as suas localizações a nível regional, isto é, na região Nordeste.



Figura 2.8. Dormentes de concreto protendido no pátio de estocagem fissurados Fonte: Autor

A pesquisa compilou 226 ensaios de reatividade pelo método acelerado das barras de argamassa realizados pela NBR 15577-parte 4 (ABNT, 2008)³⁸, no período de 2011 a 2015, em agregados miúdos e graúdos espalhados pela região nordeste.

Esses ensaios tecnológicos foram realizados por uma empresa de tecnologia de concreto, a TECOMAT-Engenharia Ltda localizada em Recife, que participou de diversas obras de infraestrutura nesse período na região Nordeste do país, como a transnordestina, transposição de Rio São Francisco, projetos de eólicas, rodovias, indústrias, projetos de irrigação, etc. Muitos agregados ensaiados foram de regiões inóspitas, que dificilmente seriam utilizados e ensaiados se não fossem essas obras estruturadoras. Infelizmente nessas investigações não foi

³⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** NBR 15577-parte 4. Rio de Janeiro, 2008.

contemplado o ensaio petrográfico, que poderia fornecer mais informações importantes a respeito do potencial de reatividade desses agregados.

O percentual de amostras por estado em ordem decrescente foram Pernambuco (53,98%), Rio grande do Norte (11,06%), vindo em seguida o Ceará (9,29%), Alagoas (7,52%), depois o Piauí, a Bahia e Paraíba (com 3,98%), Sergipe (3,54%) e Maranhão (2,65%).

Os agregados ensaiados foram classificados em níveis de reatividade, sendo classificados como potencialmente inócuos aqueles que tiveram expansão abaixo de 0,19%, como preconiza a NBR 15577-parte 1 (ABNT, 2008)³⁹. Os potencialmente reativos com nível 1, com expansão entre 0,19% e 0,35%, os de nível 2 entre 0,35% a 0,50% e por último o de nível 3, com expansão acima de 0,50%

Os resultados indicaram que das 226 amostras de agregados ensaiados, 80% deram potencialmente inócuos e apenas 20% potencialmente reativos. Desses potencialmente reativos, 69,8% foram classificados como nível 1 de reatividade, 20,9% como nível 2 e apenas 9,3% foram classificados com nível 3, isto é, com expansões acima 0,50%.

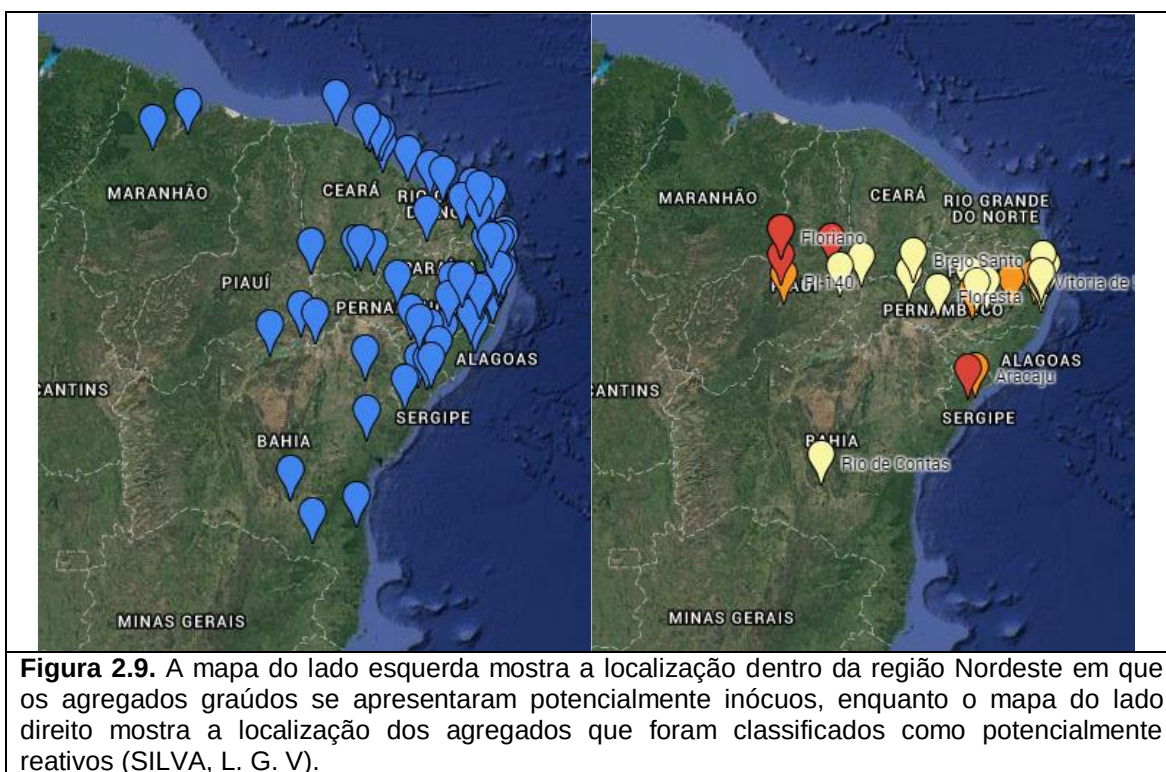
Os agregados que entraram na pesquisa foram georreferenciados utilizando a ferramenta “My Maps” do Google Maps, permitindo se ter uma visão global da reatividade dos agregados na Região Nordeste. A figura 2.9 mostra essa distribuição na região.

Os balões azuis foram os agregados classificados como potencialmente inócuos, os de cor creme como potencialmente reativos de nível 2, já os de cor laranja foram classificados como potencialmente de nível 3 e por último, de cor vermelha com expansão acima de 0,50%, como potencialmente reativo do nível 3.

³⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados — Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** NBR 15577-parte 1. Rio de Janeiro, 2008.

Essa pesquisa mostrou que a reatividade pode se localizar em regiões específicas do Nordeste, em função de características geológicas particulares que levam a essa suscetibilidade no tocante a RAA.

A região central de Pernambuco, de leste a oeste é uma dessas regiões. Dentro dessa linha, já no Estado do Piauí, amostras coletadas na região compreendida entre os Municípios Picos, Floriano e Itaueira as expansões foram superiores a 0,50%. Já em Sergipe, nas regiões próximas a Aracaju existem problemas de reatividade.



Essa pesquisa proposta teria uma justificativa sob o ponto de vista local ou regional, em função de atender a uma demanda da engenharia para avançar no conhecimento sobre RAA, a partir casos reais surgidos ao longo de mais de uma década na Região Nordeste, mais especificamente na RMR.

Uma outra justificativa, agora sob o ponto de vista mais amplo é que, apesar da realização de muitas pesquisas desde o seu descobrimento, em 1940, a RAA ainda é um problema real em estruturas de concreto em todo o mundo.

Indo nessa linha, essa tese se propõe a avançar no conhecimento da RAA, a partir realização de um estudo fundamental, utilizando alguns agregados graúdos da região Nordeste com diferentes níveis de reatividade, avaliando o efeito da distribuição microestrutural das fases mineralógicas na suscetibilidade dessas rochas de desenvolverem a RAA

Para isso seriam empregadas abordagens inéditas, utilizando técnicas de ataque e dissolução das fases em meio alcalino nos agregados em pó e análise de imagens em agregados nas dimensões de britas, utilizando técnicas de DRX, MEV e EDS.

Além desse estudo avançado, esses agregados foram ensaiados pelo o que preconiza a norma Brasileira NBR 15577 (ABNT, 2008) para determinar o potencial de reatividade deles. Esses métodos são o de expansão acelerado das barras de argamassa, o de expansão dos prismas de concreto e o petrográfico, que seriam, respectivamente, a parte 4³⁶, a parte 6⁴⁰ e a parte 3⁴¹ da NBR 15577 (ABNT, 2008).

A realização desses ensaios tecnológicos, recomendados em normas de muitos países, foram importantes para correlacionar as características microestruturais, com o potencial de reatividade desses agregados.

Por último, uma contribuição relevante desse trabalho será a avaliação comparativa do potencial de reatividade dos agregados nordestinos pelos 03 métodos de ensaio, principalmente, pelos métodos de expansão das barras de argamassa e expansão de prismas de concreto.

Existe no Brasil poucos estudos comparativos, sendo mais empregado o método de expansão acelerado das barras de argamassa por ser um ensaio rápido, 30 dias apenas, apesar de poder apresentar um certo percentual de resultados falsos

⁴⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.** Rio de Janeiro, 2008.

⁴¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade de agregados na presença de álcalis do concreto.** Rio de Janeiro, 2008.

negativos e falsos positivos, que são indesejáveis, dependendo das características mineralógicas dos agregados.

Por outro lado, o ensaio expansão de prismas de concreto são mais confiáveis nas avaliações do potencial de reatividade dos agregados, entretanto, são pouco utilizados, devido ao tempo de resposta, que é de 01 ano. Com isso, é possível que muitas avaliações do potencial de reatividade de agregados da região nordeste do Brasil, empregando o método acelerado das barras, estejam equivocadas, condenando agregados potencialmente inócuos ou aprovando agregados potencialmente reativos.

Com os resultados desse trabalho poderá se avaliar os erros que poderão estar sendo cometidos na estimativa do potencial de reatividade dos agregados nordestinos, quando do emprego do método acelerado pelas barras de argamassa.

3. OBJETIVOS DA PESQUISA

A pesquisa consiste no estudo de 15 agregados graúdos coletados em pedreiras comerciais em atividade, localizadas em regiões específicas nos Estados de Pernambuco, Alagoas e Sergipe. Estes agregados estão em sua grande maioria situadas próximas as suas respectivas capitais, Recife, Maceió e Aracaju, sendo, portanto, fornecedoras de agregados para essas respectivas praças.

A pesquisa será dividida em 3 etapas as quais possuem objetivos específicos sendo descritos a seguir.

CAPÍTULO I: *Agregados graúdos da região Nordeste do Brasil e sua Suscetibilidade no desenvolvimento de reação álcali agregado nos concretos*

Ensaio e técnicas: Expansão acelerada pelo método das barras de argamassa e pelo prisma de concreto e análise petrográfica definidos pela NBR 15577 – parte 3,4 e 6.

- 1) Classificar os agregados pelos níveis de expansão (reatividade), tanto pelo método acelerado das barras de argamassa, quanto pelo método dos prismas de concreto;
- 2) Avaliar a incidência de resultados “falso negativo” e “falsos positivos” dos resultados do método acelerado das barras de argamassa;
- 3) Correlacionar os minerais identificados e a classificação das rochas nos ensaios petrográficos com as expansões obtidas.

CAPÍTULO II: *Distribuição microestrutural das fases mineralógicas de alguns agregados da Região Nordeste do Brasil e seu efeito na Reação Álcali agregado*

Ensaio e técnicas: DRX para obtenção do grau de cristalinidade, identificação e quantificação das diversas fases presentes nas rochas, tamanho do cristalito, parâmetros de rede e valência das ligações de cada uma das principais fases presente nas rochas, atacadas e não atacadas com solução alcalina.

Essas características dos agregados estudados serão obtidas através do programa de refinamento estrutural TOPAS V4, a partir dos ensaios de DRX realizados nas amostras “in natura” e atacadas, procurando características particulares microestruturais que possam correlacionar com o grau de reatividade obtidos nos ensaios tecnológicos.

No que diz respeito aos parâmetros de rede das células unitárias das principais fases, o programa de refinamento é capaz de fornecer esses parâmetros para cada uma das fases das amostras, a partir de cada difratograma.

Com os parâmetros de rede das principais fases dos agregados e com uma revisão das estruturas dos principais silicatos em rochas graníticas (Ex: Quartzo, Feldspato, Mica) e com potencial de reatividade diferenciados dos agregados, obtidos dos ensaios tecnológicos, será possível, como objetivo, demonstrar:

- 1) A diferença dos arranjos tetraedros de SiO_2 em todos os principais minerais
- 2) As diferenças dos álcalis nos minerais, principalmente:
 - a. no número de coordenação
 - b. e sua ligação com a cadeia de silício.
- 3) Estudar o número de sítios onde a valência das ligações Si-O e Na-O-Si são anormais (Subligadas e Superligadas)
- 4) Demonstrar a relação entre a expansão e as principais ocorrências nos itens acima

CAPÍTULO III: A influência da estrutura dos poros e microfissuração em agregados grãos graníticos no desenvolvimento de RAA

Ensaio e técnicas: Análise Digital de Imagens (Histogramas de trincas, poros, tamanho grão, contorno de grão, esfericidade, presença de veios) através imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por EDS.

As feições obtidas das imagens digitais serão analisadas em conjunto com a potencialidade variada de reatividade dos agregados, obtidas dos ensaios tecnológicos, identificando características que possa ser correlacionada.

4. ORIGINALIDADE DA PESQUISA

A região nordeste do Brasil vem nos últimos anos demandando uma quantidade grande de caracterização de agregados quanto ao potencial de reatividade. Essa demanda é função da maior conscientização para o problema em função de casos reais surgidos, bem como devido ao aumento de obras imobiliárias e de infraestrutura e da existência de uma norma brasileira que trata sobre o tema, que entrou só em vigor a partir de 2008.

Sob o ponto vista tecnológico, essa identificação do potencial de reatividade se resume, basicamente, no ensaio acelerado das barras de argamassa, utilizando o método de ensaio da NBR 15577 - parte 4, e, eventualmente, o ensaio petrográfico pelo método da NBR 15577 – parte 3, associado ao ensaio das barras.

Entretanto, apesar do ensaio de expansão das barras de argamassa ser o mais utilizado, em função da rápida resposta, apenas em 30 dias, como já foi descrito anteriormente, pode ocorrer problemas em distinguir se um agregado é potencialmente reativo ou potencialmente inócuo. Essa tendência é função da condição bastante agressiva imposta pelo ensaio e que difere bastante das condições reais de exposição, podendo existir casos de falsos positivo e em menor intensidade falsos negativos.

O ensaio tecnológico mais confiável, que se sobrepõe ao método das barras é obtido pela expansão de prismas de concreto, realizado pelo método da NBR 15577 – parte 6, entretanto esse ensaio leva 1 ano para ser finalizado.

Nessa pesquisa, na sua parte inicial, foram caracterizados 15 agregados graúdos sob o ponto de vista RAA, situados em 3 estados distintos da região Nordeste. Nessa caracterização foram realizados todos os ensaios preconizados na norma NBR 15577 – parte 1, isto é, ensaio de expansão em barras de argamassa e em prismas de concreto e ensaio petrográfico.

Muito provavelmente foram os primeiros ensaios na região, em que em uma pesquisa, o ensaio de prisma de concreto foi realizado em conjunto com os ensaios de expansão de barras de argamassas e com a petrografia. Com as informações geradas, pôde-se obter algumas informações relevantes entre as expansões nos dois métodos de ensaio, em conjunto à classificação petrográfica.

Por outro lado, na grande maioria das pesquisas conduzidas no Brasil e até no mundo, relacionadas com reatividade álcali agregado, a abordagem dos agregados é realizada petrograficamente, identificando os minerais como potencialmente reativos ou potencialmente inócuos.

Mas quais as características sob o ponto de vista microestrutural que podem levar esses minerais e as rochas a serem mais ou menos susceptíveis a desenvolverem RAA?

A originalidade dessa pesquisa está na resposta a essa pergunta, sendo inédita no Brasil e no mundo pelos recursos que serão utilizados. A partir do potencial de reatividade e classificação petrográfica, obtida na primeira fase da pesquisa, esses resultados serão correlacionados com o estudo do efeito microestrutural das principais fases presentes, bem como com grau de microfissuração presente nesses agregados.

Esse estudo microestrutural poderá identificar especificidades na estrutura cristalina de algumas fases presentes nessas rochas, atacadas e não atacadas com solução alcalina, bem como na estrutura das rochas, que podem levar a potencialização da dissolução dessas fases no interior dos agregados.

Para tal estudo será empregada técnica de DRX, com refinamento microestrutural pelo método de Rietveld, utilizando como recurso o programa Topas 4.2. para avaliação e a técnica de MEV, com programa de análise de imagem para avaliação da microfissuração das amostras de agregados. Além de recursos de técnicas complementares como FRX e EDS.

5. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL GERAL

A pesquisa está baseada na coleta e ensaios em amostras de 15 agregados graúdos de pedreiras comerciais localizadas nos Estados de Pernambuco, Alagoas e Sergipe v, respectivamente, com 06, 05 e 04 agregados. As pedreiras, com suas respectivas localizações, estão mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1. Pedreiras com suas respectivas localizações utilizadas no estudo

Pedreira	Ref.	Estado	Município	Localização
01	55	Alagoas	São Jose do Quitunde	Fazenda Saudinha
02	56	Sergipe	Itabaiana	Povoado de Cajaíba
03	57	Sergipe	Itabaiana	Povoado de Cajaíba
04	58	Alagoas	Atalaia	Fazenda Tatuassu
05	59	Alagoas	Rio Largo	Rodovia BR 101-Km 75
06	60	Sergipe	Itabaiana	Povoado Mundo Novo
07	61	Alagoas	Rio Largo	Fazenda Canoé
08	62	Sergipe	Muribeca	Povoado Saco das Varas
09	63	Alagoas	Arapiraca	Povoado Genipapo
10	64	Pernambuco	Jaboatão dos Guararapes	Estrada Eixo integração
11	65	Pernambuco	Vitória de Santo Antão	Rod. BR 232-Km 39
12	66	Pernambuco	Ipojuca	Rod. PE 60 Km 16
13	67	Pernambuco	Jaboatão dos Gurarapes	Rua Sítio Severino - Comportas
14	68	Pernambuco	Jaboatão dos Guararapes	Ac. Barreto Menezes – Cajueiro Seco
15	69	Pernambuco	Jaboatão dos Gurararapes	BR 101 – Km 91,2

Para cada uma das 15 pedreiras foram coletadas, aproximadamente, 50 kg de agregados de diâmetro máximo de 25mm e algumas pedras de mão, entre 15 a 25cm de comprimento, sendo adotado o planejamento experimental mostrado no fluxograma da figura 5.1.

A seguir serão descritos mais detalhadamente o planejamento experimental das 3 etapas da pesquisa, que são independentes entre si.

5.1. Planejamento dos ensaios tecnológicos

Os 03 ensaios tecnológicos foram realizados estritamente obedecendo as respectivas normas brasileiras, a NBR 15.577-4, para determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, a NBR 15.577-5; para determinação da expansão em prisma de concreto e a NBR 15.577 – parte-3; para a análise petrográfica e verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.

Os ensaios das barras de argamassa e prismas de concreto foram realizados nas instalações da TECOMAT-Engenharia, laboratório acreditado ao INMETRO e sediada na cidade de Recife. O método das barras de argamassa é um ensaio realizado comercialmente pelo laboratório da empresa, enquanto o ensaio de prismas de concreto foi montado especificamente para pesquisa em questão.

Já o ensaio petroográfico, que requer equipamentos específicos e mão de obra especializada, foi realizada no laboratório da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, que está situado na Cidade de São Paulo e é um laboratório de referência no Brasil nessa área. Pequenas amostras com dimensão da brita coletada foram transportadas para o laboratório e lá foram preparadas as lâminas e analisadas.

5.2. Planejamento dos ensaios com material em pó

Nessa etapa da pesquisa, os agregados foram transformados em pó, passando na peneira 400 mesh. Uma parte uma pequena quantidade foi atacada com solução alcalina (1M) a 80°C e com tempo de exposição de 14 dias.

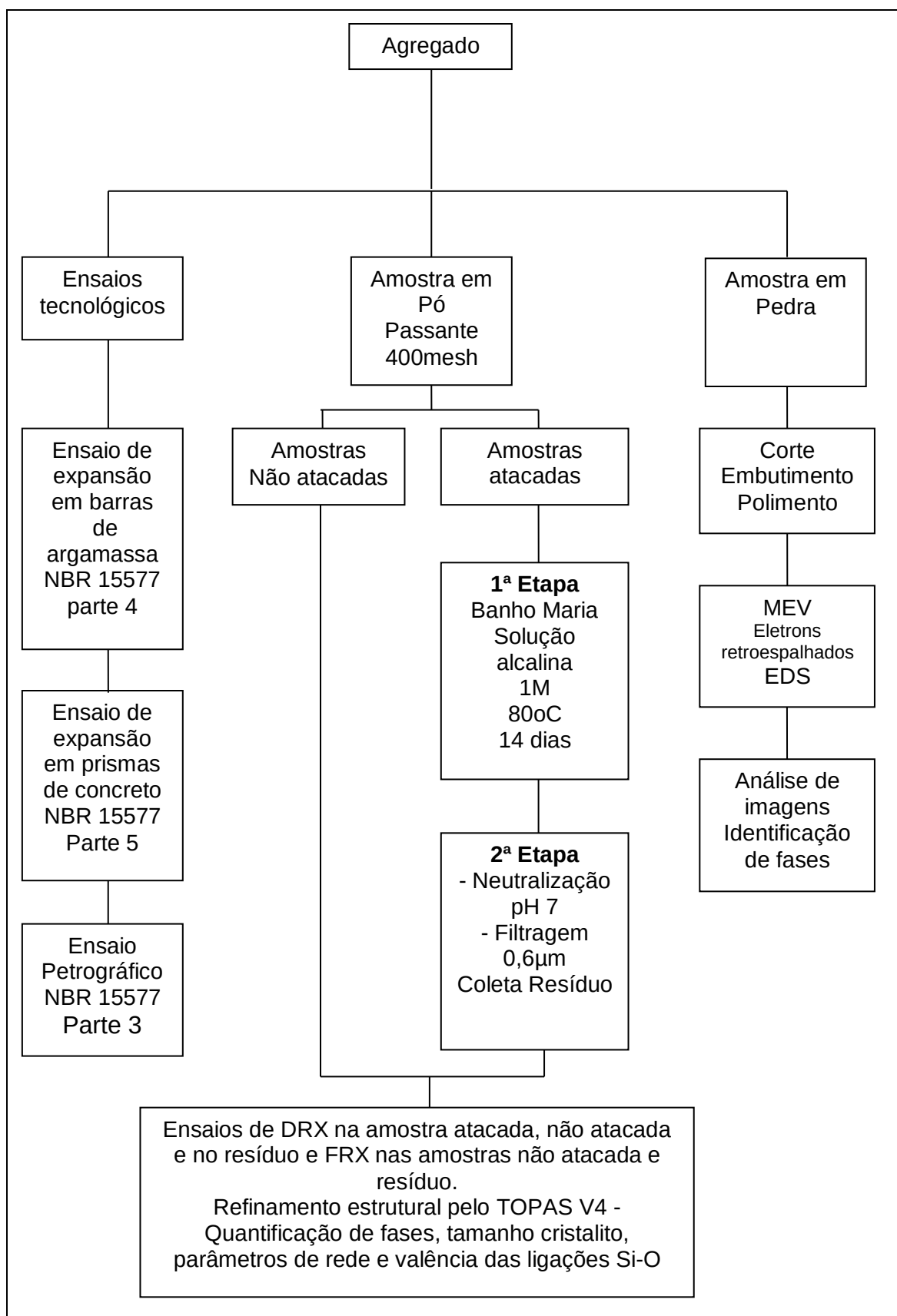


Figura 5.1. Fluxograma do programa experimental

Esse ataque gera dissolução de fases presentes da rocha, que irão para a solução alcalina. A princípio, quanto maior a reatividade da rocha a reação álcali-agregado, maior será a perda de fases cristalinas em detrimento ao aumento de fase amorfa.

Essas alterações ocorridas, dentre outras, serão analisadas no ensaio de DRX, que serão realizadas tanto nas amostras “in natura”, quanto nas amostras atacadas pela solução.

Entretanto, a acuidade dessa análise no DRX, nas amostras atacadas, seria bastante comprometida em função da elevada quantidade do hidróxido de sódio da amostra atacada. Em função disso, após a filtragem, o sistema amostra/solução foi neutralizado com ácido clorídrico, produzindo NaCl, que foi em seguida filtrado.

Além disso, os produtos das fases solubilizadas devem ter sido precipitados após a neutralização, na forma de fase cristalina ou amorfa, ficando retido pelo filtro. Esses produtos precipitados, em conjunto com a amostra remanescente, não atacada, será analisada no ensaio de DRX.

Não existe procedimento normalizado para essa metodologia de preparação, o qual será descrito a seguir.

- As amostras sofreram uma redução prévia das partículas para diâmetro passante na peneira 100 μ m, através de um britador cônico e moinho de bolas;
- Após essa moagem prévia, para finalizar a sua dimensão, as amostras passaram por um moinho de disco, sendo reduzidas para um diâmetro inferior a 400 μ m e armazenadas em recipientes plásticos;
- Com essa amostra em pó, foi realizado ensaio de fluorescência de raio X (FRX), para determinação dos percentuais de elementos presentes dos agregados na forma de óxidos fundamentais;
- Aproximadamente 2g de cada amostra de agregado foram misturadas a uma solução de 1M de hidróxido de cálcio (40g de NaOH para cada 1L de água destilada). A proporção amostra/solução foi de 1:20, sendo essa

mistura colocada em um Erlenmeyer plástico com capacidade de 100ml. Para a perfeita vedação do Erlenmeyer durante todo o processo de ataque, os mesmos foram reforçados com resina e fibra de vidro na sua superfície externa, bem como foi adaptado um sistema rosca/tampa/borracha de vedação para suportar as condições de pressão interna durante o ensaio, sem fuga de vapor;

- Os erlenmeyers com e as amostras, solução alcalina e duas esferas de aço de 8mm de diâmetro, foram colocados em banho maria com agitação (≈ 160 ciclos/min), permanecendo por 14 dias a uma temperatura de 80°C ;
- Após os 14 dias, a amostra com solução alcalina foi depositada em um béquer plástico, sendo removida as esferas e aço e adicionada água destilada para que o volume total, amostra mais líquido, totalizasse 200ml;
- Imediatamente após a colocação da mistura no béquer e o complemento com água destilada, a solução foi neutralizada ($\text{pH} \approx 7$) com adição ácido clorídrico (HCl), com auxílio de um PHmetro;
- Após a colocação da amostra e solução no béquer, a mesma foi filtrada sucessivamente utilizando filtro de fibra de vidro, com 32mm de diâmetro e abertura de $0,6\mu\text{m}$;
- Para essa filtragem sucessiva foi empregada água destilada, sendo realizada com auxílio de um porta-filtro e bomba a vácuo. A filtração só foi interrompida quando a condutividade da solução passante foi inferior $300\mu\text{s/cm}$, para garantir a eliminação de quase a totalidade de NaCl da amostra atacada, a qual foi produzida pela operação de neutralização;
- Após a filtragem tanto a amostra retida no filtro, quanto a solução passante pelo filtro foram acondicionadas na estufa a 105°C até a sua completa secagem;
- Após a secagem, foram determinadas as massas da amostra retida e do resíduo e estocadas em ependorf de 5ml de capacidade de armazenamento;

- Nas amostras “in natura”, sem ataque alcalino, na amostra atacada e no resíduo foram realizados ensaios de DRX e FRX.

Para o ensaio de DRX o equipamento empregado foi um Bruker D2 Phaser, com filamento de Cobre (Cu) e detector lynxeye, operando em uma voltagem e amperagem de 30Kv e 10mA, respectivamente. Nos ensaios, em todas as amostras e resíduos foi utilizado ângulo 2theta variando de 5° a 70°, tendo sido utilizado o módulo rotacional para o porta-amostra.

No caso das amostras atacadas e não atacadas, os ensaios foram realizados no porta-amostras “zero background” de cristal silício. Nesses ensaios foi empregado incremento de 0,0101° e tempo por incremento de 0,5s, levando o ensaio a uma duração aproximada de 115 minutos.

Para o resíduo da filtragem, no ensaio de DRX foi empregado porta amostra “Front fill”, com incremento de 0,0202°, e tempo por incremento de 0,25s, totalizando em torno de 29 minutos de ensaio.

Ainda para as amostras e resíduos foram realizados ensaios de FRX, empregando o equipamento Sequencial X-ray Fluorescence Spectrometer, Modelo XRF-1800 da Shimadzu. para determinação dos elementos presentes a partir dos seus óxidos fundamentais.

5.3. Planejamento dos ensaios com as partículas dos agregados

O ensaio no MEV foi realizado com a amostra na forma de brita, tendo sido adotada a seguinte metodologia para preparação das amostras.

- As partículas dos agregados foram cortadas com auxílio de disco de corte diamantado de 127mm x 0,4mm x 12,7mm (D200), utilizando equipamento cutoff da STRUERS. Duas faces planas e paralelas foram cortadas em baixa rotação, sendo as superfícies cortadas refrigeradas a óleo;
- Após o corte as amostras foram colocadas por 3min em banho ultrassônico para limpeza das superfícies cortadas, sendo posteriormente embutidas, empregando resina epoxídica apropriada para o processo a frio;

- Finalizado embutimento, as superfícies a serem examinadas foram lixadas e polidas, utilizando máquina de lixamento e polimento metalográfico da FORTEL (Modelo PLF);
- Para o lixamento, que foi realizado a úmido, foram empregadas lixas de gramatura sucessivamente mais finas (400, 600, 800, 1000 e 1200). No processo de lixamento, a superfície foi alternada sucessivamente em 90°, para melhorar e uniformizar o acabamento;
- Finalizado o lixamento, as amostras passaram por um processo de polimento, utilizando o mesmo equipamento para o lixamento. No polimento foi utilizado pano para polimento metalográfico com pasta de diamante, sendo empregadas 3 pastas de diamante, 3 μ , 1 μ e 1/4 μ ;
- Finalizado o polimento da amostra, foi dado novo banho ultrassônico de 3 minutos para a limpeza da superfície;
- Após a limpeza da superfície, as amostras foram metalizadas em um EMITECH K550, utilizando partículas de ouro, para possibilitar o aterramento e melhorar a qualidade das imagens;

As amostras foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) QUANTA 450 da FEI, utilizando recurso de elétrons retroespalhados para identificação de fases por diferenças de tonalidade de cores.

As imagens foram analisadas em um programa de análise de imagens desenvolvido pelo próprio grupo de pesquisa em que está inserida essa pesquisa. Esse programa, a partir de imagens retroespalhadas obtidas do MEV, é capaz de identificar diferenças de tonalidades de cores, possibilitando identificar diferentes fases, incluindo poros e microfissuras, bem como quantificá-las.

6

CAPÍTULO I

**AGREGADOS GRAÚDOS UTILIZADOS PARA CONCRETO NA
REGIÃO NORDESTE E SUA SUSCETIBILIDADE EM
DESENVOLVER REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO**

6.1. Introdução

Nessa etapa do trabalho os 15 agregados estudados serão submetidos aos ensaios descritos e recomendados pela normalização brasileira, com o objetivo de se ter uma radiografia da reatividade potencial desses agregados.

Esses agregados representam sob o ponto de vista, tanto mineralógico, quanto de reatividade potencial, o comportamento de uma área importante da região nordeste do Brasil, sendo uma mais particularmente, a Região metropolitana de Recife. A RMR é alvo de interesse já há um certo tempo, em função de inúmeros casos de fissuração de elementos de concreto, principalmente blocos de coroamento de fundações de edifícios.

Um outro aspecto importante nessa etapa é a avaliação comparativa dos 03 ensaios normativos, pois as obras de construção civil no país empregam, em sua grande maioria, o ensaio acelerado das barras de argamassa para classificar o agregado como potencialmente inócuo ou reativo. Entretanto, esse ensaio é questionado bastante, devido as suas incertezas, que depende muito da litologia das rochas existentes em uma determinada região.

6.2. Revisão Bibliográfica

Será feita uma revisão bibliográfica sobre a evolução dos métodos de ensaio utilizados para avaliação do potencial de reatividade dos agregados, bem como a evolução desses métodos desde os primórdios do descobrimento da RAA no início da década 40

6.2.1. Métodos de ensaio para avaliação do potencial de reatividade álcali agregado no mundo e no Brasil

Desde o descobrimento da reação álcali agregado, no final da década de 30 do século passado, o meio técnico e científico busca o desenvolvimento de ensaios tecnológicos com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade ou suscetibilidade dos agregados de desenvolverem reação álcali agregado em concretos de cimento Portland.

Esses ensaios são fundamentais para prevenir a RAA em obras de engenharia, possibilitando a não utilização de agregados reativos ou a adoção de medidas mitigadoras em concretos que empreguem agregados reativos, quando não são possíveis de serem substituídos.

Como é sabido, essa reação é lenta, e em condições naturais de exposição pode levar anos ou décadas para que apareça os primeiros sintomas. Essa afirmação também é válida, caso os métodos de ensaio utilizassem as mesmas condições naturais de exposição, o que inviabilizaria enormemente, sob o ponto de vista tecnológico, qualquer ação para prevenção da RAA em obras de engenharia.

Em função dessa particularidade, todos os métodos de ensaios utilizados para caracterizar agregados quanto a sua reatividade potencial à RAA devem, de uma forma ou de outra, acelerar a reação e, com isso, obter respostas rápidas para a tomada de decisão.

Para isso, deve-se atuar em uma ou mais variáveis que influenciam a cinética da reação, acelerando-a para obtenção de respostas em um curto intervalo de tempo, dias ou meses, em vez de anos ou décadas. No caso da RAA, esses métodos utilizam ações conjugadas de aumento da temperatura, elevada umidade e alcalinidade e o aumento superfície específica dos agregados, com a diminuição de suas partículas, que são as principais variáveis que influenciam na cinética da reação e a taxa de expansão.

O ensaio tecnologicamente “ideal” para a engenharia, seria aquele em que ter-se-ia 100% de certeza de classificar um agregado como potencialmente reativo ou inócuo, quando em campo ele fosse reativo ou inócuo, respectivamente. A busca por esse ensaio “ideal” é o objetivo de qualquer pesquisador na área.

Entretanto esse ensaio 100% infalível dificilmente será alcançado, em função da complexidade do mecanismo, que pode ser mensurado pela grande variabilidade de comportamento de agregados no tocante a reatividade, pela existência de composições variadas de cimentos e dosagens em campo, além de condições diversas de exposições em relação às condições padronizadas em laboratório, dentre outros.

Em resumo, a indústria da construção civil deseja um ensaio com resposta rápida, em poucos dias se possível, em um mecanismo que naturalmente se desenvolve lentamente, e que tenha 100% de confiabilidade, isto é, não possua margem de erro na interpretação.

Infelizmente, o que se tem observado ao longo de todos esses anos de estudo é que, quanto mais rápida se deseja a resposta, menor será a confiabilidade desses ensaios. Essas falhas na interpretação são caracterizadas pelo surgimento de resultados falsos positivos ou falsos negativos em relação ao desempenho desses agregados em campo.

Diante do que foi exposto e em função dos ensaios realizados nessa pesquisa, será feito um breve histórico no tocante a evolução dos métodos de ensaios para avaliação do potencial de reatividade de agregados empregados em concretos de cimento Portland.

Essa evolução dos ensaios desde os primórdios do descobrimento da RAA teve sempre como objetivo principal a busca de ensaios mais precisos e rápidos para a caracterização dos agregados quanto à RAA.

6.2.2. Histórico de métodos de ensaio no mundo

Um dos primeiros métodos normatizados no mundo, relativos à identificação de agregados potencialmente reativos, foi o ASTM C227 (ASTM, 2010)⁴² em 1950. Esse ensaio começou a ser desenvolvido no início da década de 40 na Califórnia, nos Estados Unidos, pelo próprio STANTON⁴³, descobridor da RAA.

O método das barras se baseava na medida de expansão linear, ao longo do tempo, de corpos de prova de argamassa de dimensões (25x25x285)mm, tornando-se conhecido mundialmente como o “método das barras de argamassa”. Como empregava argamassa para avaliação e não o concreto, os agregados gráudos a serem avaliados tinham de ser fragmentados até que se

⁴² AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Method for Potencial Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method). ASTM C227. Philadelphia. 2010 (Extinta 2018)

⁴³ Stanton, T. E., 1943, “Studies to Develop an Accelerated Test Procedure for the Detection of Adversely Reactive Cement Aggregate Combinations,” ASTM Proceedings, Vol. 43, pp. 875–904.

transformassem em agregado miúdo, que seria utilizado para confecção das argamassas.

As barras de argamassa deveriam ser confeccionadas, atendendo a uma proporção fixa de cimento/agregado e a relação água/cimento variável, pois a quantidade de água adicionada à argamassa estava condicionada a uma consistência fixa.

O cimento Portland a ser utilizado deveria ser o de maior teor de álcalis disponíveis na região ou no laboratório responsável pelo ensaio e não havia uma exigência específica, apenas que deveria atender a requisitos normativos. No caso dos agregados, os mesmos deveriam ser moídos e utilizados na argamassa em frações granulométricas definidas pela norma.

Nesse ensaio as barras eram acondicionadas em recipiente hermeticamente fechado, com lâmina de água em seu fundo, que não poderia entrar em contato com as barras, mas que garantiriam um ambiente com umidade relativa superior a 95%. Além dessa umidade alta, a temperatura interna deveria ser mantida no intervalo de $(38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$.

Essa norma sugeria medidas de comprimento mensais até 12 meses ou mais, para obtenção de informações adicionais, entretanto, para avaliação do potencial de reatividade, a norma fixava um limite de expansão máximo de 0,10%, aos 06 meses ou de 0,05%, aos 03 meses.

Com a disseminação desse método e seu uso estendido para avaliar a reatividade de muitos agregados ao redor do mundo, gradativamente foi se observando a falta de confiabilidade do mesmo em identificar agregados deletérios, tornando-se evidente a impossibilidade da universalização desse ensaio.

ASTM C227 (ASTM, 2010) possuía uma certa efetividade em reconhecer os agregados de alta reatividade e que foram os primeiros associados a danos em estruturas nos Estados Unidos. Esses primeiros agregados eram de origem silicosa e que continham minerais bastante susceptíveis a reagirem com os álcalis, como opalas, calcedônias, vidros vulcânicos, que levavam a taxas de expansões muito rápidas.

Por outro lado, nos agregados de baixa reatividade, como os encontrados no nordeste do Brasil, o método ASTM C227 (ASTM, 2010) tinha muita dificuldade de identificar o potencial de reatividade o que refletia no surgimento de uma incidência grande de resultados falsos negativos^{44,45}.

Um dos problemas citados para a baixa expansão existente no ensaio seria a existência acentuada de lixiviação dos álcalis pela superfície das barras, devido à condensação que ocorre na superfície dessas barras^{46,47}, o que leva a redução da expansão. Um outro aspecto para o problema seria a eliminação das partículas com dimensões abaixo de 0,15mm, especificada pelo método⁴⁸.

Um outro método normatizado que foi utilizado concomitantemente com o método ASTM C227 (ASTM, 2010) foi o ASTM C289 (ASTM, 2007)⁴⁹, que foi introduzido na normalização americana 02 anos depois, em 1952. Nesse segundo método, diferente do método das barras de argamassa, a avaliação da reatividade era determinada a partir da quantidade de sílica dissolvida e da redução do pH da solução, quando 2,5g de amostra com partículas com dimensão entre 150µm a 300µm, de um determinado agregado ensaiado, era imerso em uma solução de 1N de NaOH, a 80°C durante 24 horas.

A coordenada obtida dos valores da sílica dissolvida e da redução do pH, ambos em milimoles por litro seria plotada em um gráfico, no qual foi dividido em 03 zonas. A primeira zona, do lado esquerdo do gráfico, indicaria que o agregado é considerado inócuo. Se o dado cair na segunda zona, o agregado seria

⁴⁴ OBERHOLSTER, R.E.. Results of an international interlaboratory test program to determine the potential alkali reactivity of aggregates by the ASTM C227 mortar prism method. Conference paper of the 7th International Conference on Alkali-aggregate Reaction, Ontario, Canada, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1987, pp. 368-373.

⁴⁵ STARK, D. Alkali-silica reactions: Some reconsiderations. *Cement Concrete Aggregate*, 2 (2), pg 92-94. 1980.

⁴⁶ SHAYAN, A.; QUICK, G. W.; LANCUCKI, C. J.; WAY, S. J.. Investigation of some greywacke aggregates for alkali-aggregate reactivity. Conference Papers of the 9th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete Society Publications CS.104, Vol.2, London, 1992, pp.958-979.

⁴⁷ ROGER, C. A.; HOOTON, R. D.. Reduction in mortar and concrete expansion with reactive aggregates due to alkali leaching. (Pyrex). *Cement, concrete & Aggregates*, 13 1 (1991) 42-49.

⁴⁸ SORRENTINO, D.; RANC, R.; CARIOU, B.. Methodology of an industrial research laboratory to assess the reactivity of aggregates. Focus on reproducibility problems. Proceedings of the 8th International Conference, Alkali-aggregate Reaction, Kyoto, Japan, Elsevier Applied Science, London, 1989, pp.307-312.

⁴⁹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method). ASTM C289. Philadelphia, 2007, (Extinta 2016)

classificado como deletério. Haveria uma terceira zona, aonde o agregado seria classificado como potencialmente deletério.

Esse método era frequentemente empregado em conjunto com ASTM C227 (ASTM, 2010) e tinha limitações maiores do que esse primeiro, gerando problemas na identificação de reatividade em um percentual grande de agregados^{50,51,52}. No Brasil, esse método também foi avaliado em um trabalho dissertação⁵³ em que foi também encontrada péssima correlação com muitos agregados.

Entretanto, apesar de há muito tempo esses métodos serem conhecidos como ineficientes para prevenir a RAA, a ASTM C289 (ASTM, 2007) só veio a ser cancelada em 2016, enquanto a ASTM C227 (ASTM, 2010) dois anos depois, em 2018.

Em função da percepção gradativa de que esses métodos falhavam em demasia na detecção da reatividade dos agregados, muitos pesquisadores de países diversos começaram a desenvolver outros métodos de ensaios.

Dentre esses métodos surgidos, em função das deficiências dos 02 métodos descritos, podem ser citados os ensaios em autoclave, que foram classificados como ultra acelerados.

Dentre esses métodos em autoclave podem ser citados o método GBRC⁵⁴, o Laval⁵⁵ e o método Nishibayashi⁵⁶, que empregavam barras de argamassa com

⁵⁰ WIGUM, B. J.. Accelerated Tests for Assessing the Potencial Exhibited by Concrete Aggregates for Alkali-aggregate Reaction. *Cement and Composites* 19. 1997. 451-476.

⁵¹ GRATTAN-BELLEW, P. E.. Test methods and criteria for evaluating the potencial reactivity of aggregates. *Proceedings of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction*, Kyoto, Japan, Elsevier Applied Science, Londres, 198, pp. 279-294.

⁵² RANC, R.; ISABELLE, H.; CLEMENT, J. V.; SORRENTINO, D.. Limits of Application of the ASTM C227 Mortar bar Test. Comparison with two other standards on Alkali aggregate Reactivity. *ASTM Cement, Concrete and Aggregates*, Vol 16, Number 1, Junho 1994, pp 63-72.

⁵³ REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: AVALIAÇÃO DO MÉTODO QUÍMICO DE ENSAIO. Dissertação de mestrado: Paulo Henrique Borba Rolim. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC). Universidade Federal de Santa Catarina. Junho -2010.

⁵⁴ TAMURA, H.. A test method on rapid identification of alkali reactivity aggregate (GBRC method). In *Conference Alkali-Aggregate Reactions*, Ed: P. E. Grattan-Bellew. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1987, pg: 304-308.

⁵⁵ FOURNIER, B.; BÉREBÉ, M. A. B.; BERGERON, G.. A rapid autoclave mortar bar method to determine the potencial alkali-silica reactivity of St. Lawrence low-lands carbonate aggregates. *Cement Concrete and Aggregates*, 13. 1991. Pg: 58-71;

cimento e agregados estudados. Nessas barras, com a mesma dimensão das barras utilizadas no método da ASTM C227 ou maiores, 40 x 40 x 160 mm, eram medidas a expansão linear dos corpos de prova. A duração de ensaio poderia ser tão curta quanto 5h, entretanto, as temperaturas de ensaio eram bem elevadas, acima de 110°C e pressões entre 0,10 a 0,15MPa.

Esses métodos em autoclave foram desenvolvidos e avaliados na década de 80 e 90 e foram considerados promissores, apesar de apresentaram divergências quanta a sua efetividade na avaliação do potencial de reatividade dos agregados quando avaliados por diversos pesquisadores^{57,58,59}.

Com a proliferação de muitos métodos de ensaios para medir o potencial de reatividade de agregados, começou a se avaliar a necessidade de se adotar um consenso a respeito do assunto, com o objetivo de se uniformizar os ensaios e os critérios de avaliação.

Comitês específicos formados na RILEM e na América do Norte, pela ASTM e pela CSA, entidade normalizadora canadense, revisaram seus métodos e todos chegaram a um consenso quanto a metodologia a ser utilizada, que é baseada em 03 estágios de avaliação.

O primeiro estágio de avaliação seria o ensaio petrográfico do agregado, o segundo seria o emprego do método acelerado das barras de argamassa e em terceiro, quando possível, o método dos prismas de concreto, que leva 01 ano para se obter resultados.

Apesar desse consenso no âmbito normativo, ainda na atualidade, pesquisadores continuam a estudar o emprego de novos métodos ou mesmo alterar parâmetros

⁵⁶ NISHIBAYASHI, S.; YAMURA, K.; MATSUSHITA, H.. A rapid method of determining the álcali-aggregate reaction in concrete by autoclave. Concrete Alkali-aggregate reaction in concrete by autoclave. Concrete Alkali-Aggregate reactions. Ed: P. E. Grattan-Bellew. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1987, pg: 299-303.

⁵⁷ SHAYAN, A.. The pessimum effect in a accelerated mortar bar test using 1M NaOH solution at 80oC. Cement Concrete and Composites, 14. 1992. Pg: 249-256.

⁵⁸ BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B.; DUPONT, N.; MONGEAU, P.; FRENETTE, J.. A simple autoclave mortar method for assesseing potencial álcali-aggregate reactivity in concrete. In Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, Londres, 1992, pg: 81-91.

⁵⁹ GRATTAN-BELLEW, P. E.. Acrritical Review of Ultra-accelerated Tests for Alkali-silica Reactivity. Cement and Concrete Composites. 19. 1997. Pg: 403-414.

dos métodos existentes, com o objetivo de obter maior confiabilidade e rapidez em classificar um agregado como potencialmente reativo ou inócuo.

Como exemplo, um dos métodos pesquisados, mais recentemente, como alternativa para os ensaios consagrados citados acima é o método que utiliza corpos de prova cilíndricos⁶⁰, que está sendo estudado na Universidade do Texas. Ele emprega composição de concreto igual ao ensaio de prismas de concreto, entretanto, o concreto ao longo do ensaio permanece dentro de moldes plásticos com o objetivo de minimizar a lixiviação dos álcalis pela superfície dos corpos de prova, que é um dos problemas citados por diversas pesquisas com relação a esse método já consagrado.

Foram usados na pesquisa cilíndricos de diversos diâmetros, temperaturas de 38°C, 50°C e 60°C e medidas expansões até 730 dias, obtendo resultados promissores em um intervalo de ensaio bem inferior ao preconizado no ensaio de prisma de concreto.

A seguir serão feitas considerações sobre os métodos de ensaios já consagrados e que fazem parte do corpo de normas de entidades normalizadoras de diversos países referentes a reação álcali agregado.

6.2.2.1 Análise petrográfica

A análise petrográfica busca identificar, qualitativamente e em menor escala, quantitativamente, minerais potencialmente reativos e, a partir dessa análise, inferir se o agregado possui problemas no tocante ao desenvolvimento da RAA.

Consiste na análise das rochas empregadas em concreto de cimento Portland por meio da preparação de finas lâminas confeccionadas com o material a ser analisado. Essas lâminas são tão delgadas, que permite a passagem de luz, sendo analisadas em microscópios óticos de luz transmitida. Esses microscópios permitem aumentos de até 1000 vezes, entretanto nas análises petrográficas a amplificação pode variar de 25 a 250 vezes.

⁶⁰ Stacey, S.; Folliard, K.; Drimalas, T.; Thomas, M. D.A.. **An Accelerated and more accurate test method to ASTM 1293: The concrete cylinder Test.** Proceedings...15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. São Paulo, Brasil. . 2016.

Essa técnica permite identificar o tamanho e a quantificação estimada dos minerais presentes, avalia a textura da rocha, isto é, a distribuição desses minerais, bem como, identifica o seu grau de alteração.

A partir de experiência adquirida ao longo desses quase 80 anos de RAA, através da comparação da análise petrográfica de rochas/agregados com as mais variadas intensidades de reatividade em campo e em laboratório, o petrógrafo classifica o agregado como potencialmente reativo ou inócuo.

Essa análise é meramente qualitativa, sendo impossível quantificar o nível de reatividade no tocante ao potencial de expansão, que é fornecido através de outros ensaios que medem a expansão em condições padronizadas de ensaio. Essa técnica identifica a existência de minerais reconhecidamente com potencial de serem atacados pelos álcalis e pode também estimar o percentual desses minerais na rocha, o que permite diminuir o caráter subjetivo da análise petrográfica.

Entretanto essa avaliação quantitativa dos minerais, é utilizada em menor escala, em função da pobre concordância interlaboratorial que se tem obtido, especialmente quando o petrógrafo não tem familiaridade com as rochas analisadas⁶¹.

Para reduzir a influência do petrógrafo, tem sido introduzida metodologias para identificar agregados reativos aos álcalis, bem como atlas petrográficos de tipos de rochas reativas, com o objetivo de orientar petrógrafos que não tem experiência no assunto.

Dentre essas metodologias utilizadas para a análise petrográfica pode ser citada a recomendação produzida pela RILEM AAR 1.1⁶², como também a norma ASTM C

⁶¹ LINDEGÅRD, J.; NIXON, P. J.; BORCHERS, L.; SCHOUENBORG, B.; WIGUN, B. J.; HAUGEN, M.; AKESSON, U.. The EU "PARTNER" Project-European standart tests to prevent álcali reactions in aggregates: Final results and recomendations, Cement Concrete Research, 40 (4). 2010. Pg: 611-635.

⁶² RILEM Recomendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reations in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committe 219-ACS, RILEM State-of-the-Art Reports. Ed: NIXON, P.J.; SIMS, I.. 17, DOI. 10.1007/978-94-017-7252-5.

RILEM Recomendemmed Test Method: AAR-1.1, Detection of Potencial Alkali-Reactivity Part 1: Petrographic Exammination Method. Pg: 35-60.

294⁶³ (ASTM, 2019), a BS EN 932-3⁶⁴ (BS EN, 2010). Além de metodologias para realização de ensaio petrográfico em agregados, tem sido publicados atlas petrográficos de tipos de rochas reativas para subsidiar a interpretações de petrógrafos que não tem familiaridade com RAA^{65,66,67}.

RILEM AAR-0⁶⁸ recomenda que a análise petrográfica do agregado seja um ensaio auxiliar para outros ensaios e não seja empregado sozinho para caracterizar o seu potencial de reatividade. Essa recomendação é função de precisão duvidável desse ensaio para avaliar a sua reatividade.

Por outro lado, diferentemente da RILEM, a CSA⁶⁹ permite que a análise petrográfica seja um ensaio conclusivo, classificando um agregado como potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

6.2.2.2. Método acelerado das barras de argamassa

Esse método é o mais difundido dentre os métodos disponíveis e faz parte das diretrizes recomendadas pelos comitês já citados, sendo a segunda etapa para avaliação do potencial de reatividade dos agregados, depois da análise petrográfica.

⁶³AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates. ASTM C 294. Philadelphia, 2019.

⁶⁴EUROPEAN STANDARDS. Tests for general properties of aggregates Procedure and terminology for simplified petrographic description. BS EN 932-3. Pilsen Czech Republic. 1997.

⁶⁵FERNANDES, I.; RIBEIRO, M. A.; BROEKMANS, M. A. T. M.; SIMS, I. Petrographic atlas: characterization of aggregates regarding potencial reactivity to álcalis. RILEM TC 219-ACS Recommended Guidance AAR-1.2, for use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method, Springer, Dordrecht, 2016. Paris, páginas: 204.

⁶⁶AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standart Guide for Petrographic of Aggregates for Concrete. ASTM C295/C295M-19. Philadelphia, 2019.

⁶⁷ BRITISH STANDART. Testing aggregates. Method for qualitative and quantitative petrographic examination of aggregates. Londres. 1994.

⁶⁸ RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reations in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committe 219-ACS, RILEM State-of-the-Art Reports. Ed: NIXON, P.J.; SIMS, I. 17, DOI. 10.1007/978-94-017-7252-5.

RILEM Recomendemmed Test Method: AAR-0, Outline Guide to the use RILEM Methods in the Assessment of Alkali-Reactivity Potencial of Aggregates. Pg: 5-34.

⁶⁹ CANADIAN STANDART ASSOCIATION. Concrete materials and methods of concrete construction / Test methods and standard practices for concrete. CSA A23.1-19/CSA A23.2. Mississauga, Ontário, Canada. 2019.

Foi desenvolvido, no início da década de 80, no Nacional Building Research Institute (NBRI) da África do Sul, por Oberhorster⁷⁰, sendo mundialmente conhecido pelo método AMBT, com também pelo método acelerado das barras de argamassa, tendo sido incorporado, ao longo dos anos, a inúmeros corpos normativos de países.

Sua concepção, no tocante a argamassa empregada, as dimensões dos corpos de prova e no dispositivo de medição, é muito similar ao método das barras de argamassa, idealizado por Stanton⁴⁰ e normalizado pela ASTM C227⁴¹ (ASTM, 2010) e que já foi extinto.

Este método usa de barras de argamassa de dimensões (25 x 25 x 285)mm e para acelerar a cinética da reação em relação ao método da ASTM C227⁴¹ (ASTM, 2010), desenvolvido por Stanton⁴⁰, as mesmas devem ser mergulhadas em uma solução de hidróxido de sódio a uma temperatura de 80°C. Com esse procedimento, o tempo de ensaio foi reduzido drasticamente, de 03 a 06 meses para apenas alguns dias, dando possibilidade para a escolha de agregados em obras concreto de cimento Portland, o que era impossível quando a avaliação era realizada pelo método da ASTM C229⁴¹ (ASTM, 2010). Essa rapidez na resposta é a grande vantagem desse método de ensaio, sendo o grande responsável pela sua disseminação no meio técnico.

O limite para classificar se um agregado seria potencialmente reativo ou inócuo por esse método, foi objeto de muitas pesquisas, antes que o mesmo fosse normalizado por alguma entidade de normalização. Mesmo após a sua difusão e normalização por muitos países, o método continua a ser objeto de pesquisas e questionamentos em relação a sua efetividade em identificar agregados potencialmente reativos ou inócuos.

Em 1983, nos primórdios do desenvolvimento do método acelerado das barras de argamassa, o próprio Oberholster⁷¹ utilizando vários tipos de rochas apresentou

⁷⁰ OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G.. An accelerated method for testing the potencial reactivity of siliceous aggregates. Cement Concrete Resource, 16. 1986. Pg: 181-189

⁷¹ OBERHOLSTER, R. E. Alkali reactivity of siliceous rock aggregates: Diagnosis of the reaction, testing of cement and aggregate and prescription of preventivemeasures. Proceedings of the 6th International

um limite, aos 10 dias de duração do ensaio, de 0,08% de expansão para agregado inócuo, de 0,08% a 0,20% para agregados de baixa expansividade e acima de 0,20% agregados de alta reatividade. Esses ensaios foram comparados, na época, com o método de ensaio das barras de argamassa ASTM C227 (ASTM, 2010) e com prismas de concreto. Já em 1986, isto é, 3 anos depois, o próprio Oberholster e Davies⁷² correlacionando também com método ASTM C 227 (ASTM, 2010), definiu um limite de 0,11% aos 12 dias de idade para classificar o agregado como inócuo ou reativo.

Davies e Oberholster⁷³ em uma investigação interlaboratorial utilizando vários agregados propuseram, em 1987, com medição da expansão aos 12 dias de idade, limite de 0,10% para classificar os agregados como inócuos, entre 0,10% e 0,25% como agregados de baixa expansão e acima de 0,25% agregados elevada expansão.

Já em 1988 e 1989, Shayan^{74,75} propôs que os agregados avaliados pelo método acelerado das barras de argamassa utilizassem as idades de 10 dias e 22 dias para classificação. Os agregados estariam classificados como inócuos quando a expansão não ultrapassasse o limite de 0,10%, aos 22 dias. O agregado teria uma expansividade baixa se a expansão superasse 0,10%, aos 22 dias e uma expansão elevada se o limite de 0,10% fosse superado aos 10 dias de ensaio.

Já Hooton e Roger, em 1989, através de um trabalho experimental afirmaram que o ensaio acelerado das barras de argamassa parecia ser o mais promissor em distinguir os agregados reativos dos inócuos. No trabalho, o método foi capaz de identificar a reatividade de todos os 12 agregados estudados, que

Conference on Alkalies in concrete: Research and Practice. University of Denmark. Copenhagen, 1986. Pg: 419-433.

⁷² OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G.. An accelerated method for testing the potential álcali reactivity of siliceous aggregates. Cement and Concrete Research, 16. 1986. Pp: 181-189.

⁷³ DAVIES, G.; OBERHOLSTER, R. E.. An interlaboratory test programme on the NBRI accelerated test to determine the álcali reactivity of aggregates. Nacional Building Research Institute, Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, 1987. P.16.

⁷⁴ SHAYAN, A.; DIGGINS, R. G.; IVANUSEC, J.; WESTGATE, P.L. Accelerated testing of some Australian and overseas aggregates for álcali aggregate reactivity. Cement and Concrete Research, 18. 1988. pp. 843-851.

⁷⁵ SHAYAN, A. Experiments with accelerated tests for predicting álcali-aggregate reactivity. Proceedings of the 8th International Conference Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Kyoto, Japan. Elsevier Applied Science, London, 1989. Pp. 321-326.

comprovadamente em campo tinham problemas de reatividade. Os autores, no trabalho, sugeriram que expansões menores que 0,10%, aos 14 dias de ensaio, indicaria agregado inócuo. Já valores acima de 0,25%, na mesma idade de ensaio, o agregado seria classificado como reativo. Interessante que os autores concluíram que se as expansões estivessem no intervalo entre 0,10% a 0,25%, não poderia se concluir sobre a reatividade, estando em uma zona duvidosa. Nesse caso, deveria se realizar mais investigações sobre o agregado.

Um outro pesquisador, Grattan-Bellew⁷⁶, em 1989, também avaliando o método acelerado das barras de argamassa, fixou também o limite 0,10%, aos 14 dias, para o agregado como inócuo. Entretanto, o pesquisador citou que diferentes magnitudes de expansão poderiam ser definidas por rochas com diferentes potenciais de reatividade. Por exemplo, o limite geral de 0,10%, a 14 dias citado por ele, deveria ser modificado para 0,20% de expansão, caso o agregado fosse um argilito ou um “greywackes” ou 0,20% para outros tipos de agregados ou mesmo menor do que 0,10% para calcários.

Já Berube et al⁷⁷, em 1992, ensaiou uma quantidade grande de agregados, isto é, 142 amostras e em todos os agregados comprovadamente reativos o método foi eficaz, com exceção de apenas um agregado reconhecidamente reativo em Quebec. Por outro lado, ele afirmou que o método comprovou ser muito severo para muitos agregados que possuem bom desempenho em campo, isto é, incidência elevada de resultados falsos positivos.

Juntamente com os estudos de pesquisadores desde o início da década de 80, a Canadian Standards Association (CSA), em 1988, e American Society for Testing and Materials, 1989, começaram a avaliar preliminarmente o método acelerado das barras de argamassa. Em 1994, aproximadamente 5 a 6 anos após os primeiros estudos, as 02 entidades adotaram formalmente o ensaio, sendo

⁷⁶ GRATTAN-BELLEW, P. E.. Test methods and criteria for evaluating the potencial reactivity of aggregates. Proceedings of the 8th International Conference, Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, Elsevier Applied Science, London. 1989, pp.279-294.

⁷⁷ BERUBE, M. A.; FOURNIER, B.; MONGEAU, P.; DUPOND, N.; QUELLET, C.; FRENETTI, J.. Effectiveness of the accelerated mortar bar method, ASTM C-9 proposal P214 or NBRI, for assessing potencial AAR in Quebec-Canada. Conference Papers of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Concrete Society Publication CS.104, Volume 1, London, 1992, pp: 92-101.

denominados oficialmente de ASTM C1260⁷⁸ (ASTM, 2014) pela ASTM, o CSA A23.2-25A ⁷⁹ (CSA, 2014) pela CSA, cujas versões mais atualizadas datam de 2014.

Além dessas importantes entidades normalizadoras, que adotaram o método da AMBT como método padrão para avaliação do potencial reatividade de agregados para uso em concreto, pode ainda ser citado a Australian Standard (AS), com o método AS 1141.60.1⁸⁰ (AS, 2014), o AASHTO T303⁸¹ (AASHTO, 2008), o RILEM AAR-2⁸², dentre outros.

6.2.2.3. Método dos prismas de concreto

Esse método de ensaio, sob o ponto de vista de medição da expansão, é similar ao método das barras de argamassa e consiste na medição periódica do comprimento do corpo de prova exposto a condições que aceleram a cinética da reação, utilizando o mesmo aparato de ensaio.

Entretanto, a esse método emprega corpos de prova maiores, utiliza concreto, em proporções na mesma ordem de grandeza dos concretos de obras, em vez de argamassa e as condições de exposição são muito menos agressivas. Essas diferenças levam a uma maior confiabilidade nos resultados obtidos, no ensaio de prisma de concreto do que no método da barra de argamassa, em reproduzir o comportamento real de expansão do concreto nas estruturas. Em contrapartida,

⁷⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1260-14. **Standard Test Method for Potencial Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)**. Philadelphia. 2014.

⁷⁹ CANADIAN STANDARDS SOCIETY. CSA A 23.2-25A. Test methods for detection of alcali-silica reactivity aggregate by accelerated of mortars bar, 2014. Pp.425-433.

⁸⁰ AUSTRALIAN STANDARD. AS 1141 60.1. Methods for sampling and testing aggregates – potencial álcali-silica reactivity – Accelerated mortar bar method. Committee CE-012 (Aggregates and Rocks for Engineering Purposes. 2014.

⁸¹ AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T303. Standard method Test for Accelerated Detection of Potentially Deleterious Expansion of Mortar Bar Due to Alkali-Silica Reaction. Washington, DC, 2008. 6p.

⁸² RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 219-ACS, RILEM State-of-the-Art Reports. Ed: NIXON, P.J.; SIMS, I. 17, DOI. 10.1007/978-94-017-7252-5.

RILEM Recommended Test Method: AAR-2, Detection of Potencial Alkali-Reactivity. Accelerated Mortar-Bar Test Method for aggregates, pp.: 61-78.

tem-se mas mais tempo para uma resposta quanto a reatividade do agregado, o que é uma grande desvantagem.

Esse método consiste na moldagem de corpos de prova prismáticos, sendo mais comum a utilização de seções transversais de 75 x 75, podendo o comprimento variar 250 a 300mm. Apesar de mais como esses corpos de prova, existem entidades normalizadoras, como a Norwegian CPT, que utiliza prismas de 100 x 100 x 500.

Diferentemente do método das barras de argamassa, o método dos prismas emprega mistura de concreto, portanto, possui na sua composição um agregado miúdo e graúdo. Nesse método, caso a avaliação do potencial de reatividade esteja recaindo sobre o agregado graúdo, o agregado miúdo utilizado na composição deve ser comprovadamente inócuo e vice-versa.

A dosagem de concreto utilizada por entidades normalizadas pode ter pequenas variações no consumo de cimento, podendo variar está entre 420Kg e 440Kg por m³ de concreto. Os cimentos utilizados devem ter elevada quantidade de álcalis equivalentes (Na₂Oeq), entre 0,8% a 1,3%. Alguns corpos normativos importantes, como a ASTM C 1293-8b⁸³ (ASTM, 2014), CSA A23.2-14A⁸⁴ (CSA, 2014), AS 1141 60.2⁸⁵ (AS, 2014) fixam a quantidade de álcalis equivalente no concreto. Nesse procedimento, na mistura do concreto adiciona-se uma determinada quantidade de NaOH na água de amassamento, em função da quantidade de álcalis equivalente presente no cimento empregado, para que a quantidade de álcalis total no concreto tenha o equivalente a 1,25% de NaOeq em relação a massa de cimento.

Os corpos de prova são estocados em recipientes hermeticamente fechados, durante 1 ano, a uma temperatura geralmente de 38°C, em ambiente com elevada umidade, sem, no entanto, terem contato direto com água.

⁸³ AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1293-14. **Standard Test for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali Silica**. Philadelphia. 2014.

⁸⁴ CANADIAN STANDARDS SOCIETY. CSA A23.2-14A. **Potencial expansivity of aggregates (Procedure for length change due to álcali-aggregate reactions in concrete prisms at 38oC)**, 2014. Pp.350-352.

⁸⁵ AUSTRALIAN STANDARD. Methods for sampling and testing aggregates – potencial álcali-silica reactivity – Concrete prism method. Committee CE-012 (Aggregates and Rocks for Engineering Purposes. 2014.

As expansões limites para classificar os agregados como potencialmente inócuos ou reativos pode variar, em função do corpo normativo, entretanto, geralmente varia entre 0,03% a 0,05%.

A literatura⁸⁶ ainda ressalta uma particularidade negativa nesse método de ensaio, que seria a existência de lixiviação dos álcalis pela superfície dos prismas ao longo do ensaio devido a elevada umidade relativa do ambiente em que os cp's estão acondicionados. Essa lixiviação ou perda de álcalis em corpo de prova de seção transversal de apenas 75 x 75mm, leva a uma redução do potencial de expansão do concreto devido à RAA.

Apesar desse método ser mais confiável em identificar agregados reativos dos não reativos, Fournier⁸⁷ mostrou que a variabilidade em ensaios multi-laboratoriais pode ser relativamente elevada. O autor citou que, dentre os fatores que podem levar a esse problema, seria os agregados miúdos não reativos muito finos utilizados para avaliar a reatividade potencial de agregados graúdos.

6.2.3. Normalização brasileira com relação à RAA

Até 2008 a engenharia civil brasileira só dispunha de duas normas brasileiras que faziam referência a reação álcali agregado. A primeira foi a NBR 9773⁸⁸ (ABNT, 1987), que era exatamente o método das barras de argamassa, introduzido por Stanton⁴³, na década de 50, similar a ASTM C227 (ASTM, 2010)⁴².

A segunda norma foi a NBR 9774⁸⁹ (ABNT, 1987) equivalente ao método químico, cuja principal referência normativa foi a norma americana ASTM C289 (ASTM, 2007)⁴⁹.

⁸⁶ LINDGÅRD, J.; THOMAS, M. D. A.; SELLEVOLD, E. J.; PEDERSEN, B.; ANDIÇ-ÇAKIR, O.; JUSTNES, H.; RØNNING, T.F.. Alkali-silica reaction (ASR) – performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion, *Cement Concrete Research*. 53, 2013, pg: 68 a 90.

⁸⁷ FOURNIER, B; ROGERS, C. A.; MACDONALD, C. A.. Multilaboratory study of the concrete prism and accelerated mortar bar expansion tests with Spratt aggregate. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-aggregate Reaction (AAR) in Concrete*, May 2012, Austin (Texas).

⁸⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Reatividade potencial de álcalis em combinação com cimento – agregado-Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

⁸⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Verificação da reatividade potencial pelo método químico -Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

Essas normas quando entraram em vigor pela ABNT em 1987, ambas já estavam sendo questionadas a nível internacional, levando rapidamente a um descrédito no meio técnico.

Só a partir de 2006, a ABNT formou o comitê de RAA, com o objetivo de atualizar a normalização brasileira sobre o tema, entrando com convergência com normas de outros países mais atualizadas. Após 2 anos de debates do comitê, em 2008, surgiu a NBR 15577, sendo dividida em 06 partes.

Atualmente a NBR 15577 já está em sua segunda versão, que entrou em vigor em 2018, tendo sido criada mais parte, ficando com 07, sendo referente ao método de ensaio acelerado de prisma de concreto. A NBR 15577⁹⁰ - parte 1 ABNT (2018) que se refere ao guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.

A parte 01 é a principal parte, que faz a ligação entre as demais, descreve conceitos, determina quais são ensaios normativos, que são descritos nas demais partes. Uma evolução grande no guia em relação a versão de 2008, foi a classificação dos agregados em 04 níveis de reatividade, em vez da classificação como potencialmente reativo ou potencialmente inócuo, como na versão anterior. Essa classificação está sendo mostrada na tabela 6.1.

Essa questão de resultados falsos positivos e negativos pode ser mais bem visualizados no gráfico da figura 19.1. Nesse gráfico foram plotados os resultados de expansão no ensaio acelerado das barras de argamassa (eixo horizontal) x prismas de concreto (eixo vertical).

Com esses 04 níveis de reatividade, foi refinada a análise de risco e as medidas mitigadoras desse guia em relação a versão anterior, de 2008.

⁹⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado-Reatividade Álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.

A segunda parte da NBR 15577⁹¹- parte 2 (ABNT, 2018) se refere aos procedimentos referentes à coleta, preparação dos agregados e frequência para realização dos ensaios relativos à reatividade potencial dos agregados.

Tabela 6.1. Limites para classificação da reatividade potencial de agregados pelos métodos de ensaios da NBR 15577-4 (ABNT, 2018) e NBR 15577-6 (ABNT, 2018). (NBR 15577 parte 1 (ABNT,2018))

Classificação da reatividade potencial do agregado ^c	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias ^a %	Expansão dos prismas de concreto aos 365 dias ^b %
Potencialmente inócuo grau 0	Menor que 0,19%	Menor que 0,04%
Potencialmente reativo grau 1	Entre 0,19 e 0,40%	Entre 0,04 e 0,12%
Potencialmente reativo grau 2	Entre 0,41 e 0,60%	Entre 0,13 e 0,24%
Potencialmente reativo grau 3	Acima de 0,60%	Acima de 0,24%
^a valores com base na experiência brasileira ^b Valores extraídos da ASTM 1778 (ASMT, 2016) ^c Até o momento de edição dessa norma, não se dispunha de dados estatísticos suficientes para classificar o grau de reatividade do agregado segundo o método acelerado de prisma de concreto NBR 15577-7 (ABNT, 2018)		

A NBR 15577⁹² - parte 3 (ABNT, 2018) se refere aos procedimentos para a realização de ensaio petrográfico nos agregados com ênfase na detecção de fases potencialmente reativas. As demais partes da NBR 15577, isto é, a parte 4, 5, 6 e 7 se referem aos ensaios de expansão.

A NBR 15577⁹³ - parte 4 é o ensaio acelerado das barras de argamassa brasileiro, conhecido mundialmente pelo ensaio AMBT, já discutido anteriormente. A NBR 15577⁹⁴ - parte 5 é o mesmo ensaio da parte 4, entretanto, nesse caso, não se deseja avaliar o potencial de reatividade do agregado. Nessa situação, o agregado já foi classificado como potencialmente reativo e se deseja saber, se um

⁹¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados–Reatividade álcali agregado Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

⁹² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados–Reatividade álcali agregado Parte 3: Análise petrográfica para avaliação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

⁹³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados–Reatividade álcali agregado Parte 4: Determinação de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado,** Rio Janeiro, 2018.

⁹⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados–Reatividade álcali agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado,** Rio Janeiro, 2018.

determinado cimento ou combinação de um cimento com adição mineral no concreto, é capaz de mitigar essa reação deletéria.

A NBR 15577⁹⁵-parte 6 é o ensaio de prisma de concreto já comentado é que, como as demais normas internacionais, reconhece que esse método de ensaio se sobrepõe ao método acelerado das barras de argamassa para classificar o agregado como potencialmente inócuo ou potencialmente reativo. É um ensaio muito pouco utilizado pelo mercado da construção civil para controle tecnológico dos agregados, devido ao tempo para finalização do ensaio, que é 1 ano.

Em face desse inconveniente no prazo de resposta do ensaio de prisma de concreto, pesquisadores tem estudado acelerar esse ensaio já faz algum tempo. O ensaio em vez de ser realizado a uma temperatura de 38°C é acelerado a 60°C, reduzindo o tempo de ensaio de 52 semanas para apenas 15 semanas. Fournier⁹⁶ dentre outros pesquisadores, já em 2004, encontrou uma boa correlação com o ensaio a 38°C.

Em função dessa boa correlação, muitos tem adotado esse método em seu corpo normativo, dentre eles o Brasil nessa última revisão da NBR 15577. Com a introdução desse método, essa norma passou a ter 07 partes e não 06 partes, sendo essa última denominada de NBR 15577⁹⁷-parte 07.

Um dos aspectos que pode ser ressaltado nos métodos de expansão empregados pela ABNT, para determinação do potencial de reatividade de agregados, foi a introdução do emprego do cimento padrão para realização desses ensaios. Nenhuma outra norma estrangeira especifica tantos requisitos para cimento, como faixa de finura e de teor de álcalis presente, além da exigência de não ter adição mineral, que mitigue a reação e que dever possuir expansão em autoclave inferior a 0,2%, como as demais normas internacionais.

⁹⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados–Reatividade álcali agregado Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto** Rio Janeiro, 2018.

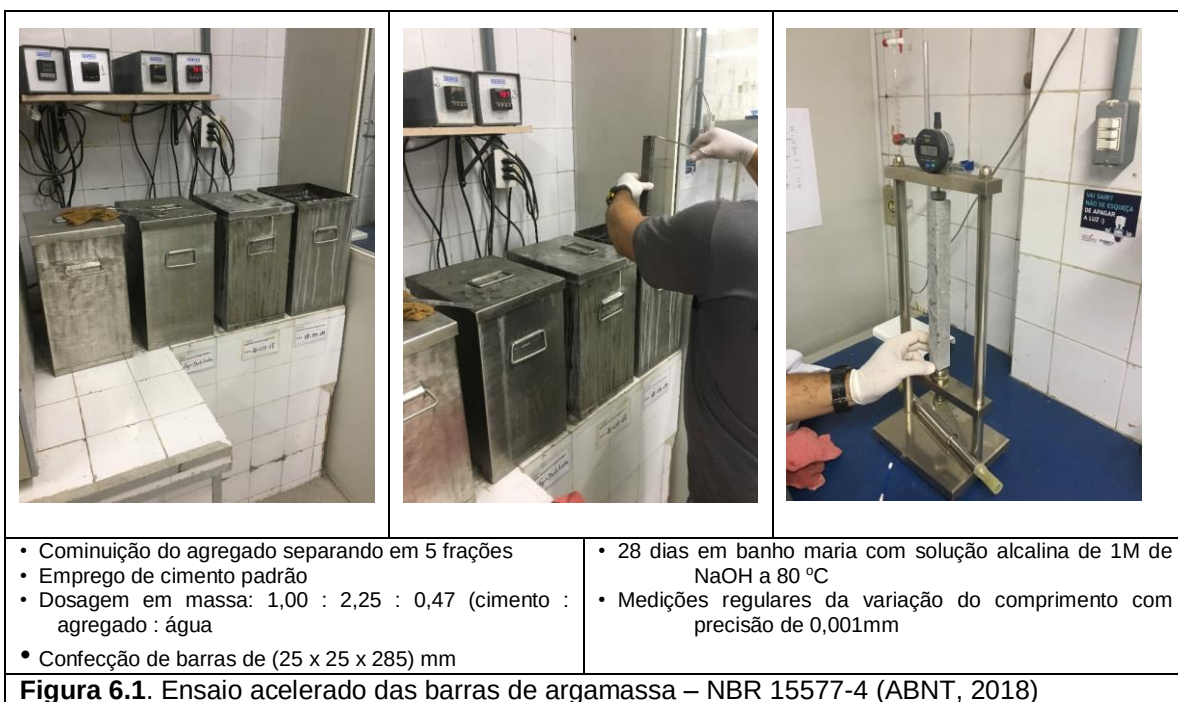
⁹⁶ FOURNIER, B.; CHEVRIER, R.; DEGROSBOIS, M.; LISELLA, R.; FOLLIARD, K., IDEKER, J., SHERATA, M.; THOMAS, M. D. A.; BAXTER, S.. **The accelerated concrete prism test (60°C): variability of the test method and proposed expansion limits**. In Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (AAR_ in Concrete, Beijing (China), October 2004. Pp.314 – 323.

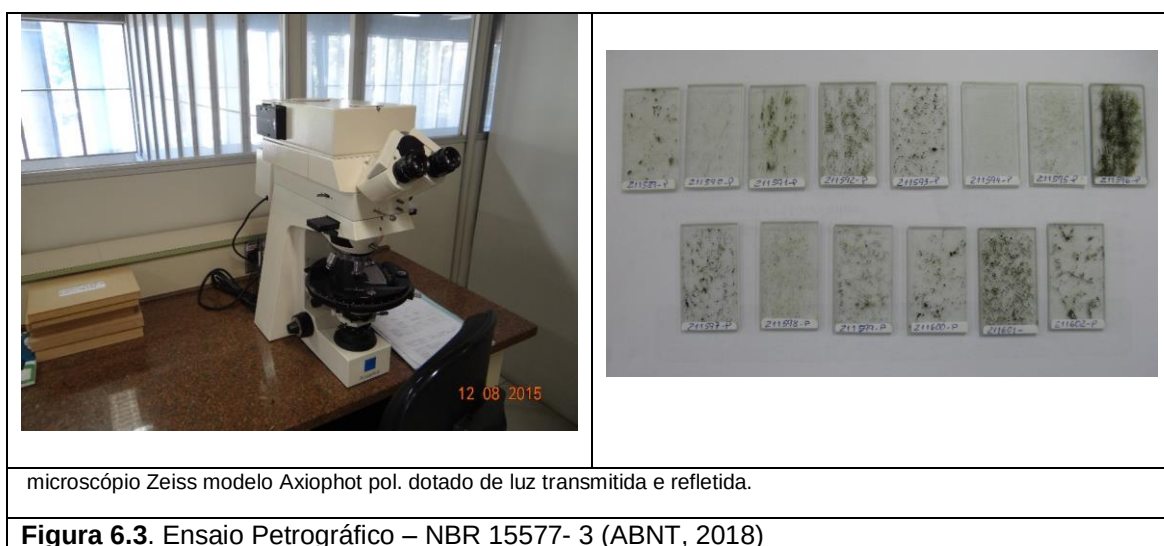
⁹⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados–Reatividade álcali agregado Parte 5: Determinação da expansão em prismas acelerados de concreto**. Rio Janeiro, 2018.

6.3. Programa experimental

Ensaio normativos nos 15 agregados estudado
:

- Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado NBR 15577⁹³ – parte 4, utilizando o banho em solução alcalina a temperatura de 80°C e relógio comparador acoplado a base de medição, conforme visualizados na figura 6.1.
- Determinação da expansão em prismas de concreto NBR 15577⁹⁵ – parte 6, empregado caixas de aço inoxidável hermeticamente vedadas e acondicionadas em estufa ventilada com temperatura interna fixada em 38oC e relógio comparador acoplado a base de medição, conforme visualizados na figura 6.2.
- Análise petrográfica para avaliação da potencialidade reativa de agregados na presença de álcalis no concreto NBR 15577⁹² – parte 3, lâminas de agregado e microscópio ótico, mostrados na figura 6.3.





Para análise foi utilizado os limites definidos pela NBR 15577⁹⁰-1 (ABNT, 2018) para classificação dos níveis de reatividade dos agregados, referentes ao ensaio acelerado das barras de argamassa, quanto do ensaio de prisma de concreto, os quais são mostrados na tabela 6.1.

6.4. Resultados

Os resultados obtidos para os 15 agregados estudados no que se refere à expansão acelerada das barras de argamassa e a expansão dos prismas de concreto estão mostrados nos gráficos das figuras 6.4 a 6.18. Além desses gráficos são mostradas as principais características obtidas no ensaio petrográfico (NBR 15577⁹⁵-6 (ABNT, 2018), bem como a classificação do potencial de reatividade definida pelo petrógrafo.

Em cada figura pode ser visualizada evolução da expansão durante o período de execução dos ensaios, que foi de 28 dias para o ensaio acelerado das barras de argamassa (lado esquerda) e de 365 dias para o ensaio de prismas de concreto (lado direito), os quais são definidos pela metodologia dos respectivos ensaios.

Nesses gráficos estão em linhas vermelhas horizontais os limites normativos que classificam os agregados como potencialmente inócuo (R0), potencialmente reativos com níveis R1, R2 e R3, conforme mostrado na tabela 6.1.

Além dos ensaios de expansão, as figuras mostram os principais parâmetros petrográficos em que o petrógrafo utilizou para classificar o agregado como potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

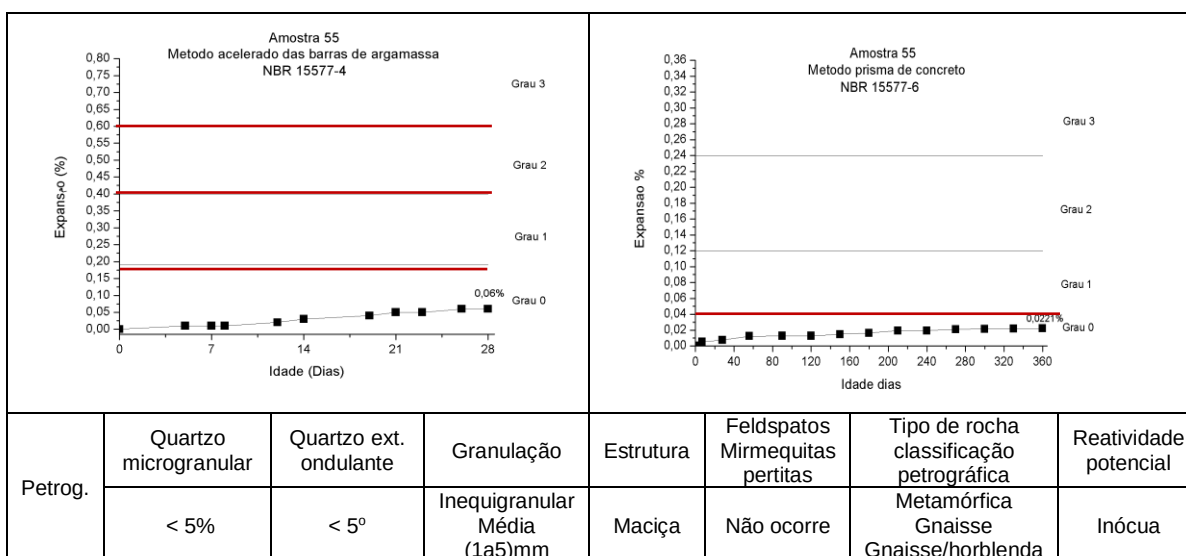


Figura. 6.4. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 55 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

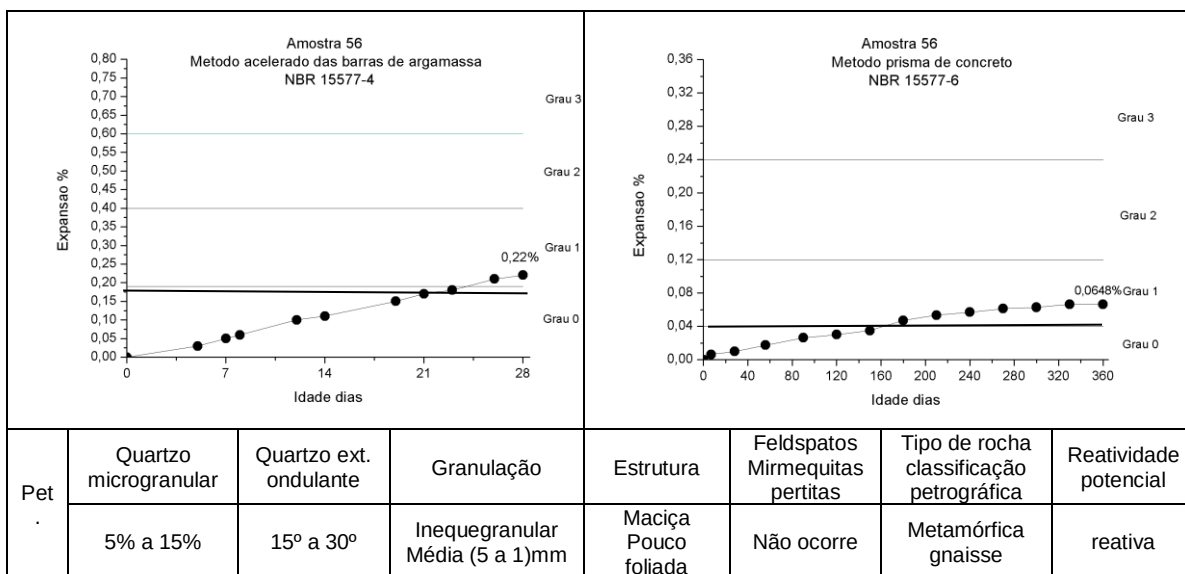


Figura 6.5. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 56 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

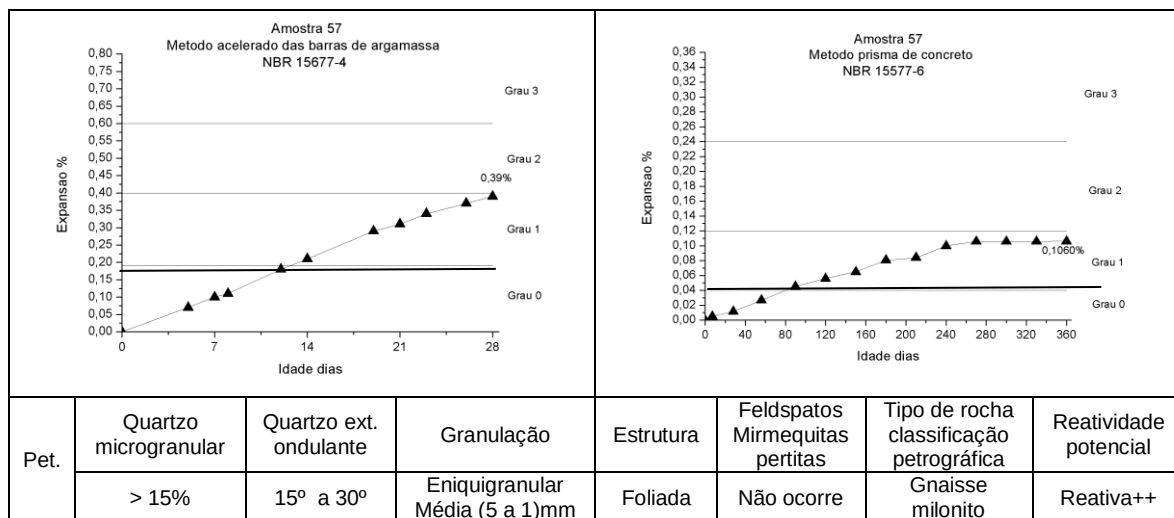


Figura 6.6. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 57 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

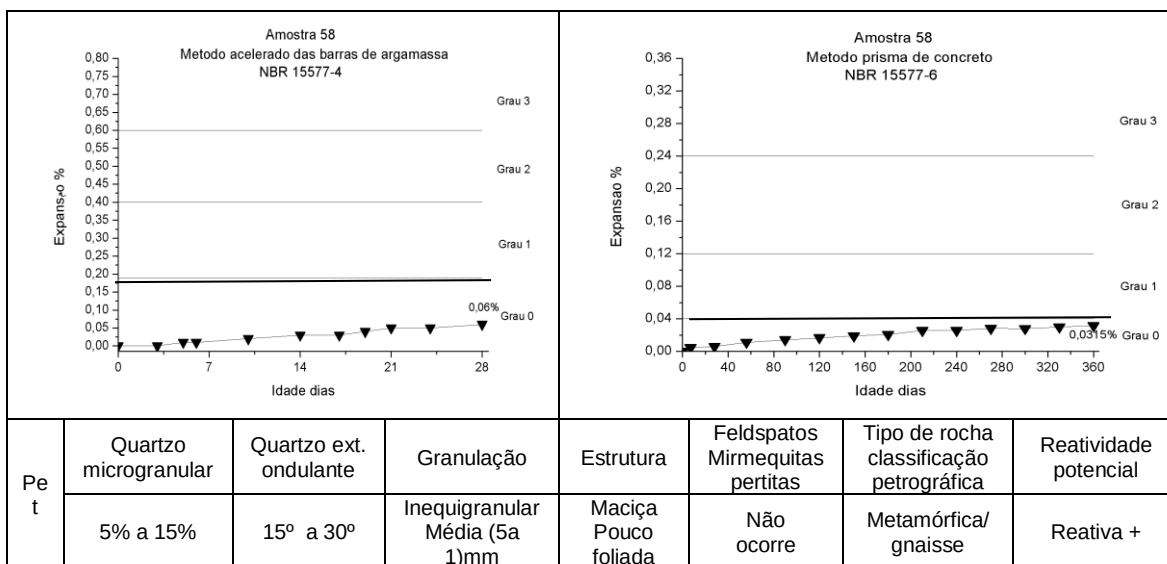


Figura 6.7. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 58 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

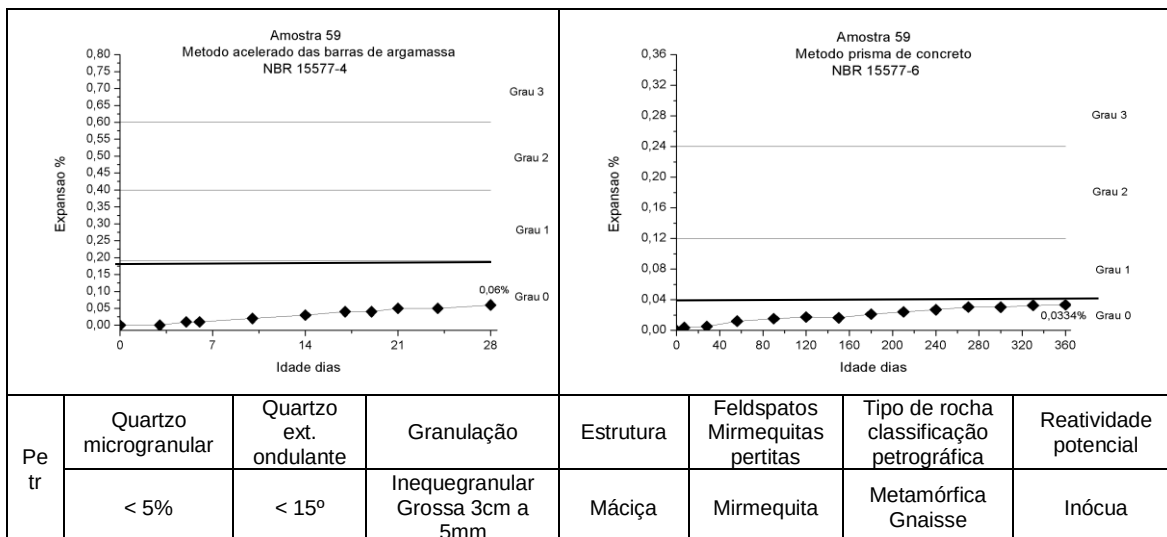


Figura 6.8. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 59 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

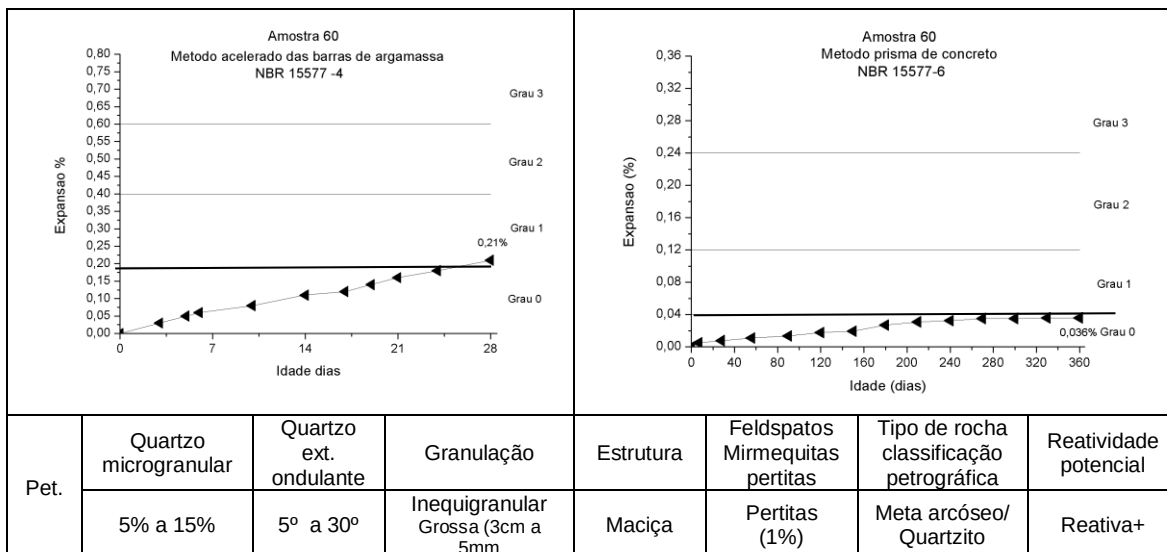


Figura 6.9. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 60 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

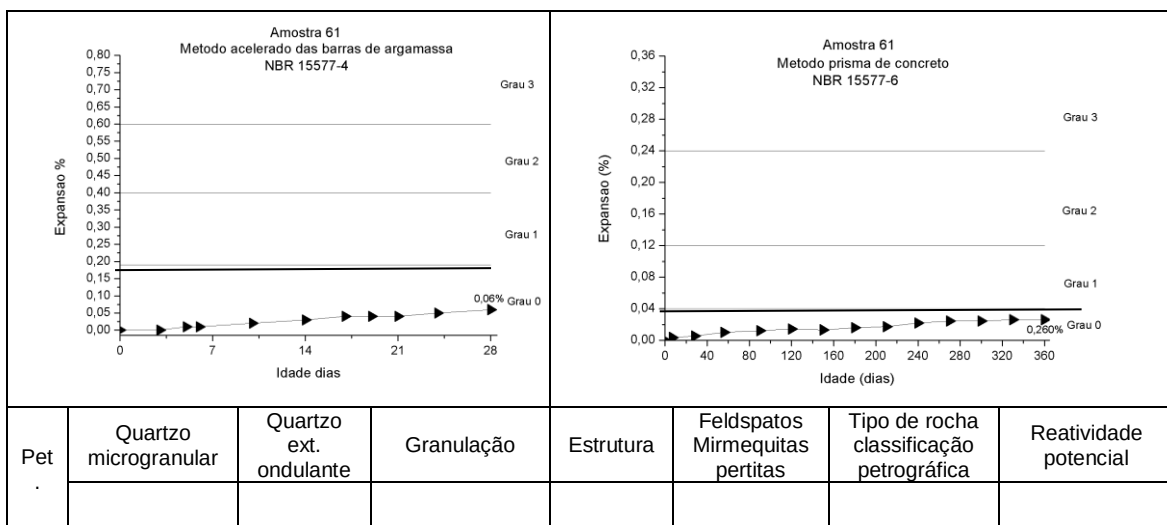


Figura 6.10. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 61 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

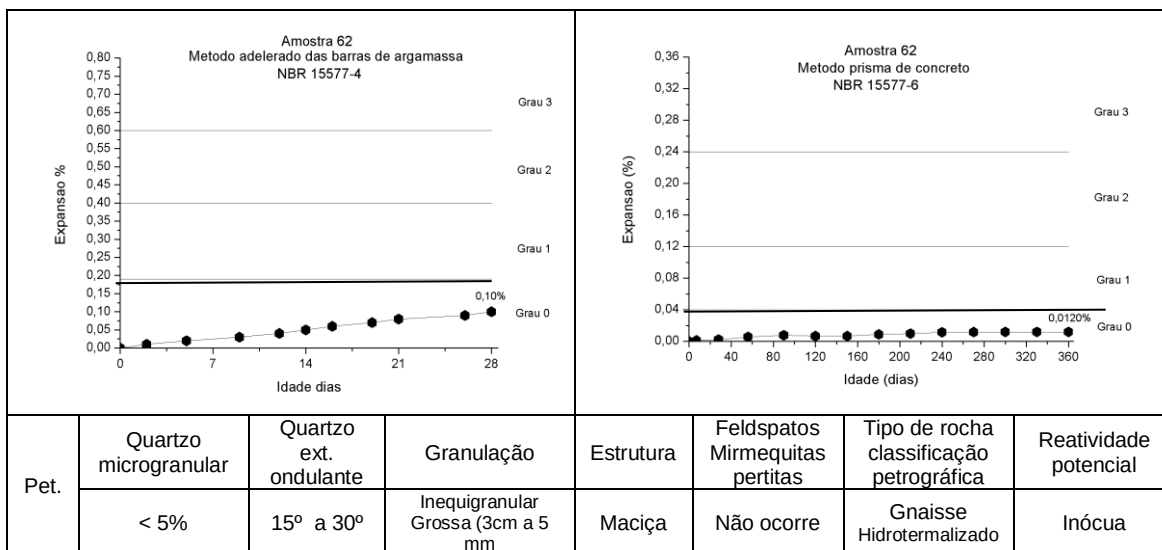


Figura 6.11. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 62 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

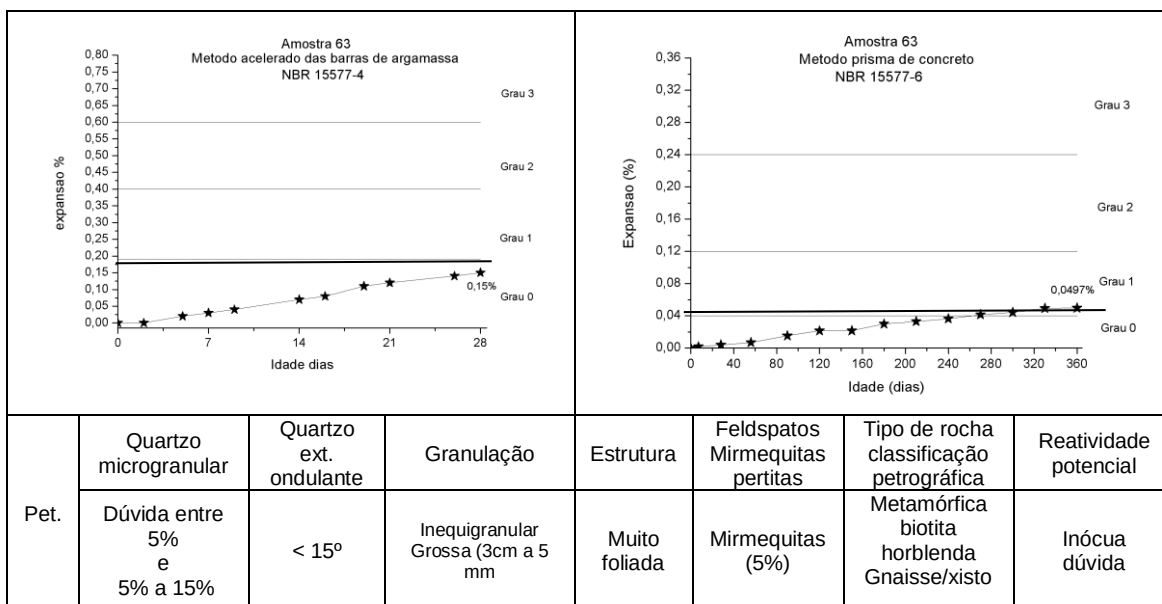


Figura 6.12. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 63 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

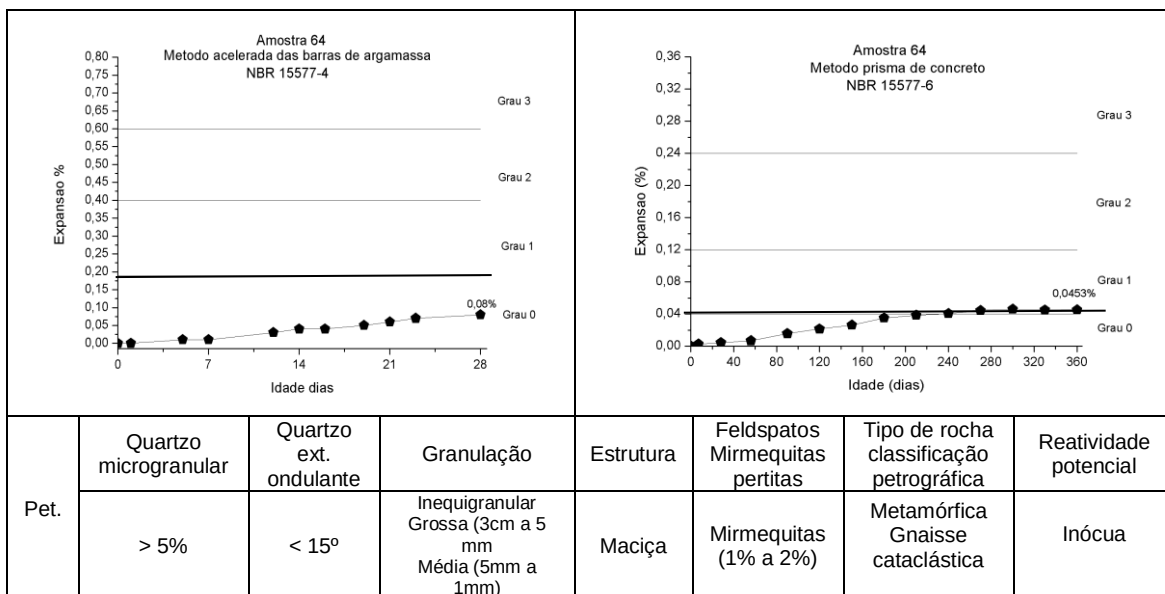


Figura 6.13. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 64 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

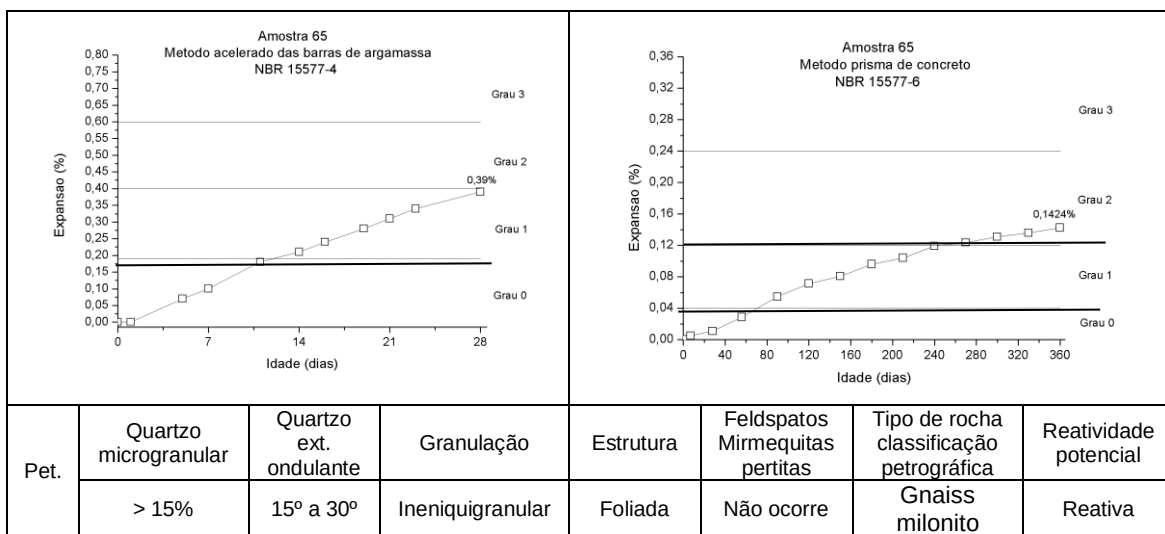


Figura 6.14. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 65 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

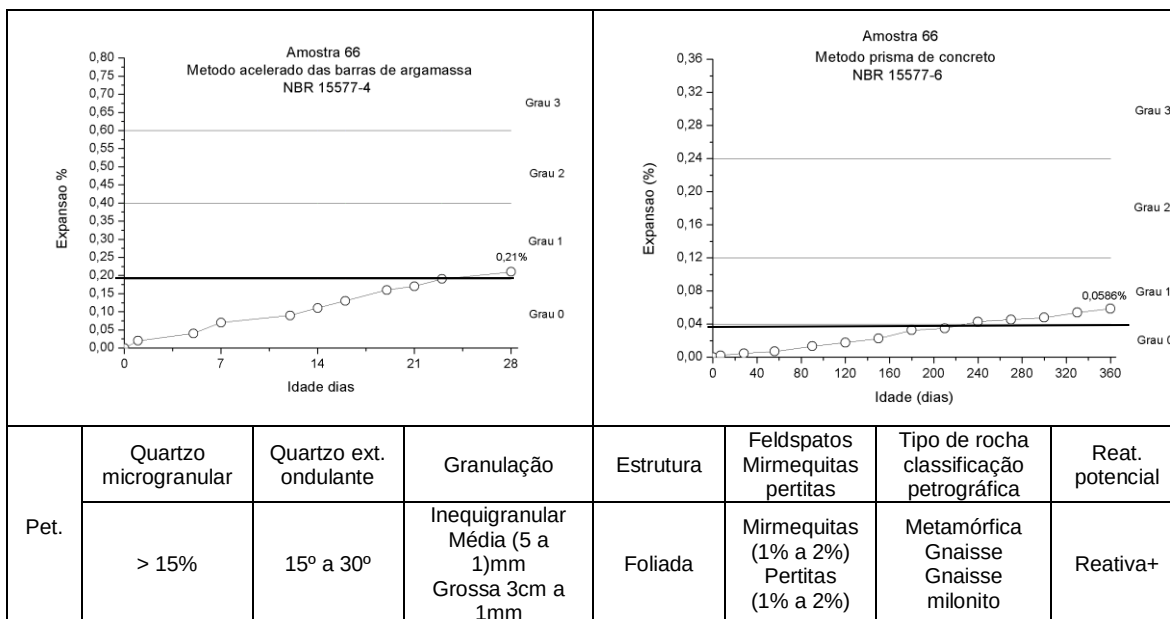


Figura 6.15. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 66 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

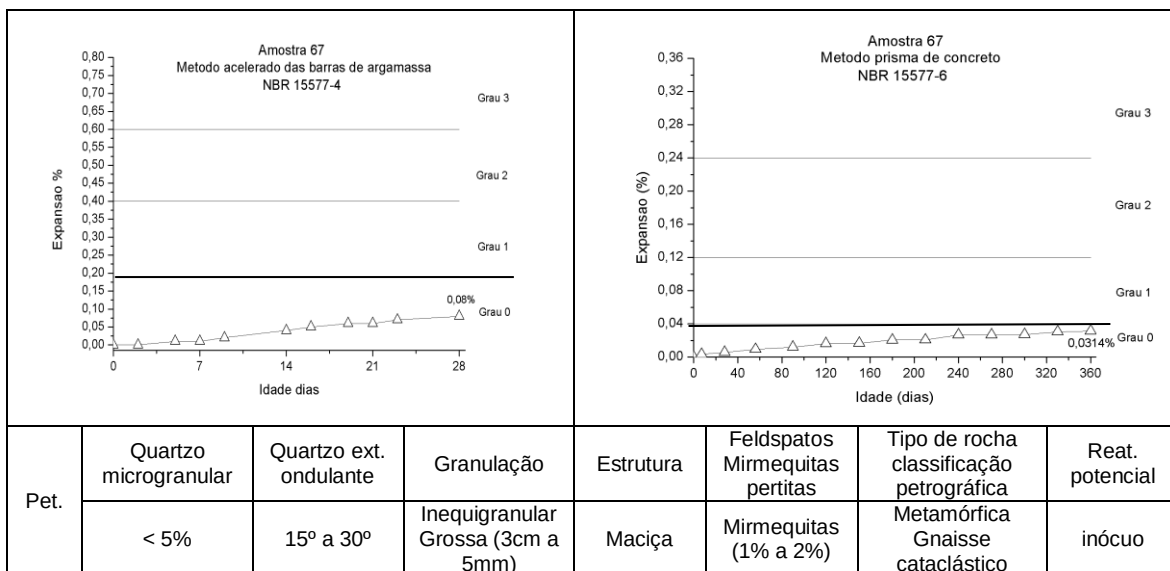


Figura 6.16. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 67 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

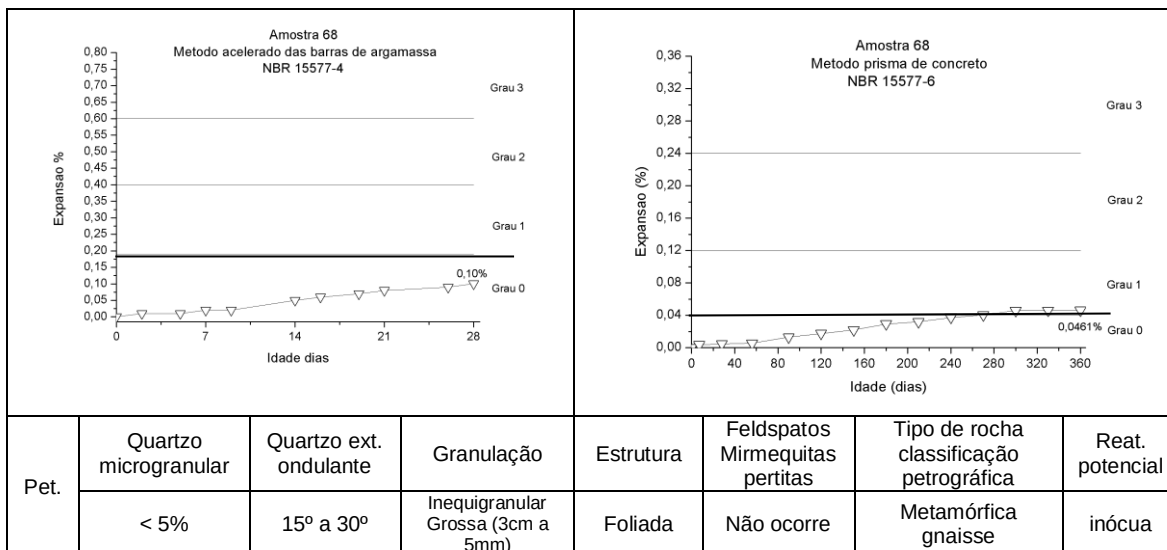


Figura 6.17. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 68 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

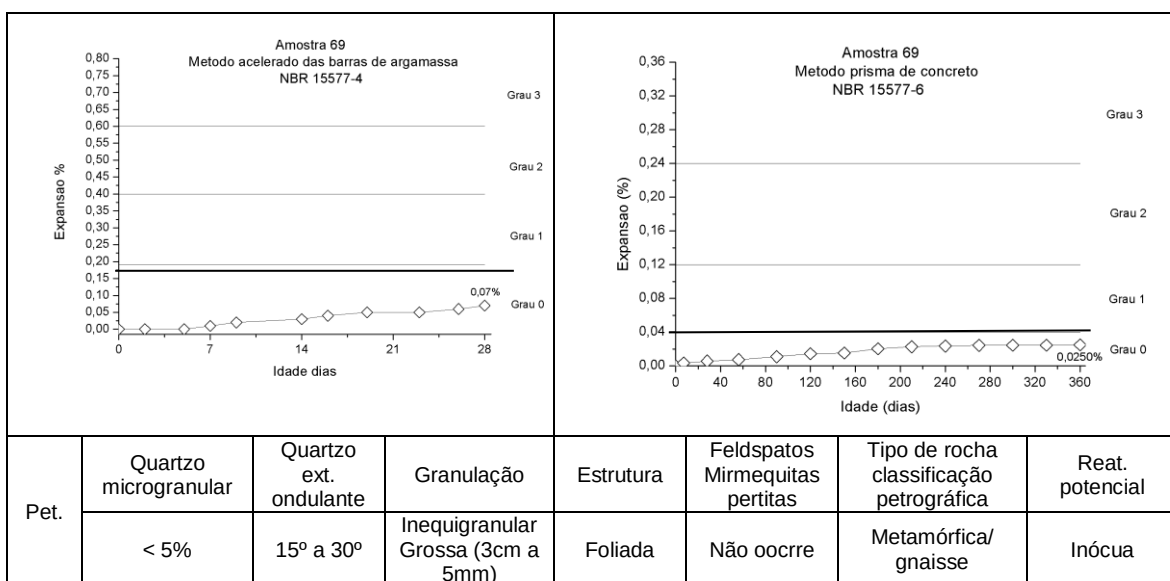


Figura 6.18. Resultados da evolução da expansão com o tempo expansão da amostra 69 pelo método acelerado das barras e pelo método dos prismas de concreto.

O único agregado em que não foi realizado o ensaio petrográfico foi o da amostra 61, em função da insuficiência de amostra e a dificuldade de se fazer uma nova coleta.

A tabela 2.1 mostra o resumo dos resultados obtidos dos 15 agregados estudados, mostrando os valores de expansões nas idades de referência, tanto para o ensaio acelerado das barras de argamassa NBR 15577⁹³-4 (ABNT, 2018), quanto para o ensaio de prisma de concreto NBR 15577⁹⁵-6 (ABNT 2018). Além desses valores, foi colocada as classificações de potencial de reatividade para cada um dos ensaios, a partir das classificações constantes na NBR 15577⁹⁰-1 (ABNT, 2018). Além dessas classificações normativas, os agregados também foram caracterizados no tocante a sua potencialidade reativa em relação ao ensaio petrográfico, em função das feições observadas pelo petrógrafo, cuja classificação possui um certo grau subjetividade, conforme já abordado anteriormente.

Sob o ponto de vista normativo, o ensaio de prisma de concreto se sobrepõe aos ensaios acelerados das barras de argamassa e petrográfico, este último, por sinal, é definido como sendo meramente auxiliar pela normalização brasileira. Portanto, na tabela 6.2, os resultados do potencial de reatividade dos 15 agregados foram ordenados em ordem decrescente de expansão com relação ao ensaio de prisma de concreto, bem como a classificação final foi exatamente a mesma classificação obtido pelo ensaio de prisma.

Os resultados permitiram ter uma visão sobre o potencial de reatividade de agregados de 03 estados da Região Nordeste, podendo se estender a outros estados da região à medida que as formações geológicas possuem certo grau de similaridade.

Além da identificação de agregados com níveis distintos de reatividade sob a luz da NBR 15577⁹⁰-1 (ABNT, 2018), eles possibilitaram avaliar o grau de confiabilidade do ensaio acelerado das barras de argamassa, que o ensaio tecnológico efetivamente empregado em obras.

Tabela 6.2. Resumo dos resultados de reatividade dos agregados utilizando o método acelerado das barras de argamassa (NBR 15577– 4), o método dos prismas de concreto (NBR 15577-6), o método petrográfico (NBR 15577 – 3) e a classificação final estabelecida pela NBR 15577 1.

Ref.	Barras de argamassa NBR 15577 - 4		Prismas de concreto NBR 15577-6		Petrografia	Classificação final Potencialmente
	Exp %	Classificação Potencialmente	Exp %	Classificação Potencialmente	Classificação Potencialmente	
65	0,39	Reativo Grau R1	0,1424	Reativo Grau R2	Reativo	Reativo Grau R2
57	0,39	Reativo Grau R1	0,1060	Reativo Grau R1	Reativo	Reativo Grau R1
56	0,22	Reativo Grau R1	0,0648	Reativo Grau R1	Reativo	Reativo Grau R1
66	0,21	Reativo Grau R1	0,0586	Reativo Grau R1	Reativo	Reativo Grau R1
63	0,15	Inócuo Grau R0	0,0498	Reativo Grau R1	Inócuo	Reativo Grau R1
68	0,10	Inócuo Grau R0	0,0461	Reativo Grau R1	Inócuo	Reativo Grau R1
64	0,08	Inócuo Grau R0	0,0453	Reativo Grau R1	Inócuo	Reativo Grau R1
60	0,21	Reativo Grau R1	0,0360	Inócuo Grau R0	Reativo	Inócuo Grau R0
58	0,06	Inócuo Grau R0	0,0315	Inócuo Grau R0	Reativo	Inócuo Grau R0
59	0,06	Inócuo Grau R0	0,0334	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0
67	0,08	Inócuo Grau R0	0,0314	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0
61	0,06	Inócuo Grau R0	0,0260	Inócuo Grau R0	-	Inócuo Grau R0
69	0,07	Inócuo Grau R0	0,0250	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0
55	0,10	Inócuo Grau R0	0,0220	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0
62	0,10	Inócuo Grau R0	0,0120	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0

6.5. Análise dos resultados

A partir dos resultados dos ensaios de reatividade consagrados pela literatura internacional e contidos na norma NBR 15577⁹⁰-1 (ABNT, 2018), observa-se que dos 15 agregados ensaiados, 07 agregados apresentaram níveis de expansão pelo método do prisma de concreto, que os classificam como potencialmente reativos.

Como a norma brasileira sobrepõe o ensaio de prisma de concreto em relação aos demais ensaios normativos, essa seria a classificação final do potencial desses agregados.

Desses 07 agregados classificados como potencialmente reativos, 04 agregados estão localizados na Região Metropolitana de Recife no Estado de Pernambuco (RMR), sendo, portanto, potenciais fornecedores de agregados para concreto na capital e nas cidades no entorno da capital.

Vale ressaltar que dos 15 agregados empregados no estudo, já mostrados na tabela 02, 06 foram coletados no estado de Pernambuco, sendo que todos estão localizados na RMR, podendo-se concluir que 67% deles apresentaram algum nível de reatividade.

No que se refere ao Estado de Sergipe, dos 04 agregados estudados, 03 pertencem a Região Metropolitana de Aracajú, capital do estado de Sergipe. Desses 04 agregados, 02 foram classificados como potencialmente reativos e pertencem a RMA, indicando que 75% dos agregados amostrados nessa região são potencialmente reativos.

Com relação ao Estado de Alagoas, dos 05 agregados ensaiados, apenas 01 foi classificado como potencialmente reativo, estando situado no Município de Arapiraca, segunda cidade do Estado de Alagoas. Os outros 04 agregados, que foram coletados de pedreiras localizadas próximas ou pertencentes a municípios da Região Metropolitana de Maceió (RMM), foram classificados como potencialmente inócuos.

6.5.1. Níveis de reatividade pelo método dos prismas de concreto NBR 15577-6

Ainda analisando a reatividade potencial pelos resultados obtidos no ensaio de prisma de concreto, observa-se que de todos os 07 agregados classificados como potencialmente reativos, apenas 01 agregado, o de referência 65, apresentou classificação “*reativo grau R2*”, com expansão de 0,1424%, situado entre 0,13% e 0,24%.

Esse agregado 65 está localizado na RMR e é comprovadamente reativo em campo, em função de inúmeros casos rastreados da utilização desse agregado em concretos de estruturas diagnosticadas com RAA, podendo-se afirmar que os casos de maior intensidade de fissuração estão associados a esse agregado.

Todos os demais 06 agregados classificados como potencialmente reativos estão classificados como “*reativos grau 1*”, isto é, com expansão nos prismas de concreto situados no intervalo entre 0,04% e 0,12%.

Vale ressaltar que o 2º e 3º agregados de maior potencial de reatividade, isto é, os de referência 57 e 56, com expansões de 0,1060% e 0,0648%, estão localizados na RMA. Esses 2 resultados indicam que os concretos produzidos e utilizados na cidade de Aracajú e nas cidades pertencentes a região metropolitana, já tenham casos de estruturas afetadas pela RAA.

O 4º caso de agregado com potencial de reatividade é o de referência 66, localizado na RMR e, similarmente ao agregado de referência 65, existem casos de estruturas diagnosticadas e que utilizaram esse agregado. Entretanto, os casos diagnosticados com esse agregado, de um modo geral, apresentam menor intensidade de fissuração, estando compatível com os resultados obtidos no ensaio de prisma.

Os demais agregados potencialmente reativos, o de referência 63 localizado na Cidade de Arapiraca, com expansão de 0,0498% e os 2 agregados situados na RMR, com expansões de 0,0461% e 0,453%, respectivamente, estão próximos ao limite de classificação entre agregado potencialmente reativo e potencialmente inócuo.

Os demais agregados foram classificados como potencialmente inócuos, variando a expansão de 0,0360% a 0,0120%. Alias o agregado de menor potencial de reatividade está localizado na RMR.

6.5.2. Níveis de reatividade pelo método acelerado das barras de argamassa NBR 15577- 4

Pelo método acelerado das barras de argamassa, pelo critério normativo, 05 agregados deram potencialmente reativos e 08 potencialmente inócuos, podendo ser visualizados na tabela 6.2.

Todos esses 05 agregados potencialmente reativos apresentaram classificação “*reativo grau R1*”, isto é, com expansão aos 28 dias de exposição a solução alcalina variando entre 0,19% e 0,40%.

Os agregados que apresentaram maior nível de expansão foram o de referência 65 e 57, localizados, respectivamente, na RMR e RMA, com expansões iguais de 0,39%, isto é, quase no limite de classificação entre “*reativo Grau R1*” e “*reativo Grau R2*”, cuja a faixa de expansão está entre 0,40% e 0,60%.

O agregado de referência 65, como já dito, é um agregado classificado como reativo, em função de inúmeros casos de estruturas afetadas por RAA em que esse agregado foi utilizado. Em função dessa notoriedade, algumas pesquisas já foram realizadas ao longo desses anos em que esse agregado foi empregado como referência. Na maioria dos ensaios realizados, esse agregado apresentou expansões entre 0,40% e 0,50%, o que levaria a sua classificação como “*reativo Grau 02*”. Como exemplo pode-se citar o estudo realizado para identificação do potencial de reatividade dos agregados da RMR, realizado em 2006³⁰, tendo sido obtida uma expansão de 0,40% para esse agregado. Nessa pesquisa, o método acelerado das barras de argamassa foi a ASTM 1260, pois na época a normalização brasileira não dispunha desse método de ensaio.

Com relação ao agregado de referência 57, pertencente a RMA, não se tem histórico publicado de casos de reatividade, apesar de que é possível que em

algumas estruturas localizadas na região de Aracajú e que tenham utilizado esse agregado, já possam ter sintomas diagnósticos ou não com RAA.

O 3º, 4º e 5º agregados de maior potencial de reatividade pelo método acelerado das barras de argamassa apresentaram níveis de expansão bem inferiores aos dois primeiros, sendo os de referências 56, 66 e 60, com expansões de 0,22%, 0,21% e 0,21% e localizados na RMA, RMR e RMA, respectivamente.

Os demais agregados apresentaram expansões inferiores a 0,19%, sendo classificados como potencialmente inócuos, isto é, *“inócuo Grau 0”*.

6.5.3. Análise petrográfica NBR 15577- 3

A análise petrográfica identifica agregados como potencialmente inócuos ou potencialmente reativos, a partir de determinados percentuais de fases deletérias e características petrográficas, cuja NBR 15577⁹² – parte 3 (ABNT, 2018), fornece orientações para essa classificação, conforme já citado anteriormente.

Apesar de que na avaliação a norma especifica percentuais mínimos de fases para classificação do potencial de reatividade, a avaliação ainda leva um certo grau de subjetividade, que recai sobre a experiência do petrógrafo que está realizando o ensaio.

A partir dessas informações obtidas da análise, o ensaio petrográfico identificou dentre os 14 agregados analisados, 06 como agregados potencialmente reativos, que foram os agregados de referência 65, 57, 56, 66, 60 e 58.

A partir da análise petrográfica e das orientações constantes na NBR 15577⁹²-3 (ABNT, 2018), em função dos percentuais presentes de fases reativas para classificação do agregado como potencialmente reativo ou inócuo, observa-se que a fase reativa presente é o quartzo microcristalino.

O petrógrafo não observou nos 14 agregados analisados nenhuma outra fase constante na tabela A.1 da NBR 15577⁹²-3 (ABNT, 2018) que poderia classificá-los como potencialmente reativos, quais sejam opala, trimidita ou cristobalita, Vidros vulcânicos, tanto ácidos como intermediário ou básico e calcedônia.

As rochas dos 14 agregados foram classificadas como metamórficas, isto é, são rochas que, por definição, sofreram algum tipo de transformação a partir de uma rocha original. Essas transformações podem ter origens químicas e físicas, devido ao fato dessas rochas terem sido submetidas a temperaturas e pressões elevadas em contato ou não com fluídos, podendo ter ocorrido fusão parcial, mas não total para serem classificadas como metamórficas.

Dentre essas rochas metamórficas que podem apresentar níveis de reatividade potencial, a NBR 15577⁹²-3 (ABNT, 2018) citam o gnaiss, o quartzito, o filito, a ardósia e as rochas miloníticas e cataclásticas.

A reatividade dessas rochas está relacionada a presença de tipos de quartzos alterados, que foram formados pelo processo de metamorfismo a partir de quartzos existentes da rocha original. Essas variações de quartzos, bem como o seu percentual na rocha metamórfica irá depender da intensidade e dos tipos de transformações que ocorreram ao longo do processo de formação da rocha.

A NBR 15577⁹²-3 (ABNT, 2018) cita como minerais ou fases reativas presentes nessas rochas o quartzito macrogranular associado ou não ao quartzito deformado e o quartzito microcristalino ou criptocristalino. Esses quartzitos estão associados a graus de metamorfismo em que as rochas foram submetidas.

Para dar um caráter quantitativo para avaliação petrográfica, a NBR 15577⁹²-3 (ABNT, 2018) fornece indicativos de percentuais máximos de fases potencialmente reativas para que o petrógrafo classifique o agregado como potencialmente reativo ou inócuo.

Esses percentuais de valores aceitáveis para classificação do agregado como potencialmente inócuo são de 5% de quartzito microgranular ou deformado, 3 % de calcidônia, 1 % de tridimita ou cristobalita, 3 % de vidro vulcânico e 0,5 % de opala, sendo que acima desses valores os agregados poderão ser classificados como potencialmente reativos. Além dessas fases, para avaliação o petrógrafo deve estimar o quartzito mirmequítico, o qual deve ser acrescentado na estimativa da quantidade de quartzito microgranular ou microcristalino.

Apesar desses limites a NBR 15577⁹²-3 (ABNT, 2018) cita que o petrógrafo, com base em sua experiência e nas demais feições presentes, pode admitir classificação distinta.

Além dessas orientações, o petrógrafo em sua avaliação deve mencionar e considerar quanto à reatividade da rocha, as texturas que possam indicar deformação, isto é, processo de metamorfismo da rocha que originou o agregado. Como exemplos a norma cita, sombra de pressão, quartzo deformado, apesar de atualmente extinção ondulante nos quartzos deformados não pode ser utilizada como parâmetro para classificação da reatividade da rocha. Deve citar também minerais triturados, textura “mortar”, geminação deformada, mica fish, pertita em chama, interlobada (grãos com contatos suturados) e outros que podem ser levados em consideração pelo petrógrafo para avaliação subjetiva do potencial de reatividade do agregado.

Diante dessas considerações normativas, a tabela 6.3 mostra o resumo das principais características petrográficas obtidas pelo petrógrafo para classificação do potencial de reatividade dos 14 agregados graúdos avaliados.

Através da observação da tabela 5 fica evidente que os agregados analisados apresentam apenas uma fase reativa descrita na NBR 15577⁹²-3 (ABNT, 2018), que é o quartzo microgranular ou microcristalino, fase essa encontrada comumente entre rochas que sofreram menor ou maior grau de metamorfismo, levando a quebra, moagem dos grãos originais desse mineral. Como consequência, ocorre um aumento significativo da superfície específica desses grãos e a sua susceptibilidade a dissolução em meio alcalino.

Na análise realizada na ABCP pelo petrógrafo Marcelo Pecchio, bastante experiente em análises petrográficas para identificação de rochas potencialmente reativas, foi solicitado uma quantificação expedida dos agregados classificados como potencialmente reativos, a partir das características petrográficas observadas. Esse refinamento não é exigido pela NBR 15577⁹²-3 (ABNT, 2018), que determina apenas que os agregados sejam classificados como potencialmente inócuos ou reativos.

Tabela 6.3. Características petrográficas dos agregados e a classificação quanto a reatividade estabelecida pelo petrógrafo

Ref.	Quartzo microgranular %	Quartzo extinção ondulante %	Granulação	Estrutura	Feldspatos Mirmequitas pertitas	Tipo de rocha classificação petrográfica	Reat. potencial
55	< 5%	< 5°	Inequigranular Média (1a5)mm	Maciça	Não ocorre	Metamórfica Gnaiss Gnaiss/horblenda	Inócua
56	5% a 15%	15° a 30°	Inequigranular Média (5 a 1)mm	Maciça Pouco foliada	Não ocorre	Metamórfica gnaiss	Reativa+
57	> 15%	15° a 30°	Inequigranular Média (5 a 1)mm	Foliada	Não ocorre	Gnaiss milonito	Reativa++
58	5% a 15%	15° a 30°	Inequigranular Média (5a 1)mm	Maciça Pouco foliada	Não ocorre	Metamórfica/ gnaiss	Reativa +
59	< 5%	< 15°	Inequigranular Grossa 3cm a 5mm	Maciça	Mirmequitas	Metamórfica Gnaiss	Inócua
60	5% a 15%	5° a 30°	Inequigranular Grossa (3cm a 5mm)	Maciça	Pertitas (1%)	Meta arcóseo/ Quartzito	inócua
61	Não foi realizado ensaio petrográfico do agregado						
62	< 5%	15° a 30°	Inequigranular Grossa (3cm a 5 mm)	Maciça	Não ocorre	Gnaiss Hidrotermalizado	Inócua
63	Dúvida entre 5% e 5% a 15%	< 15°	Inequigranular Grossa (3cm a 5 mm)	Muito foliada	Mirmequitas (5%)	Metamórfica biotita horblenda Gnaiss/xisto	Inócua dúvida
64	> 5%	< 15°	Inequigranular Grossa (3cm a 5 mm Média (5mm a 1mm))	Maciça	Mirmequitas (1% a 2%)	Metamórfica Gnaiss cataclástica	Inócua
65	> 15%	15° a 30°	Inequigranular	Foliada	Não ocorre	Gnaiss milonito	Reativa+++
66	> 15%	15° a 30°	Inequigranular Média (5 a 1)mm Grossa 3cm a 1mm	Foliada	Mirmequitas (1% a 2%) Pertitas (1% a 2%)	Metamórfica Gnaiss Gnaiss milonito	Reativa+
67	< 5%	15° a 30°	Inequigranular Grossa (3cm a 5mm)	Maciça	Mirmequitas (1% a 2%)	Metamórfica Gnaiss cataclástico	inócua
68	< 5%	15° a 30°	Inequigranular Grossa (3cm a 5mm)	Foliada	Não ocorre	Metamórfica gnaiss	inócua
69	< 5%	15° a 30°	Inequigranular Grossa (3cm a 5mm)	Foliada	Não ocorre	Metamórfica/ gnaiss	Inócua

6.5.4. Análise comparativa entre os ensaios normativos

A tabela 6.4 mostra os resultados dos ensaios de expansão, acelerado em barras de argamassa e prisma de concreto e o ensaio petrográfico. Pela NBR 15577⁹⁰- parte 1, com os 03 ensaios normativos realizados nos agregados estudados, a classificação que prevalece é o ensaio de prisma.

Com isso, os agregados classificados como potencialmente reativos seriam 7, os agregados de referência 65, 57, 56, 66, 63, 68 e 64, com todos sendo classificados como potencialmente reativos Grau R1, com exceção do agregado 65, que estaria no Grau R2.

Caso o estudo contemplasse apenas o ensaio acelerado das barras de argamassa, apenas 05 agregados estariam classificados como potencialmente reativos, quais sejam os de referência 65, 57, 56 e 66. Esses agregados, no ensaio acelerado de barras de argamassa, possuem a mesma classificação com relação aos prismas de concreto, isto é, potencialmente reativos, enquanto os de referência 63, 68 e 64 deram potencialmente inócuos, entretanto, são potencialmente reativos no ensaio de prisma de concreto.

Esses agregados de referência 63, 68 e 64 seriam classificados como potencialmente inócuos, caso a avaliação tivesse sido realizada apenas através do ensaio acelerado de barras de argamassa, que é o mais usual em controle tecnológico de agregado. Nesses casos, esses resultados seriam denominados de “*falsos negativos*”, isto é, seriam classificados erroneamente como potencialmente inócuos, mas na realidade seriam potencialmente reativos. Essa situação estaria a favor do consumidor, mas estaria penalizando o fornecedor de agregado

Por outro lado, o agregado de referência 60, apresentou-se potencialmente reativo pelo método acelerado das barras de argamassa, entretanto, seriam classificados como potencialmente inócuos pelo prisma de concreto, caracterizando o resultado como “falso positivo”. Nesse caso, a penalização estaria em cima do consumidor, beneficiando o fornecedor de agregado.

Essa questão de resultados falsos positivos e negativos pode ser mais bem visualizados no gráfico da figura 6.19. Nesse gráfico foram plotados os resultados de expansão no ensaio acelerado das barras de argamassa (eixo horizontal) x prismas de concreto (eixo vertical).

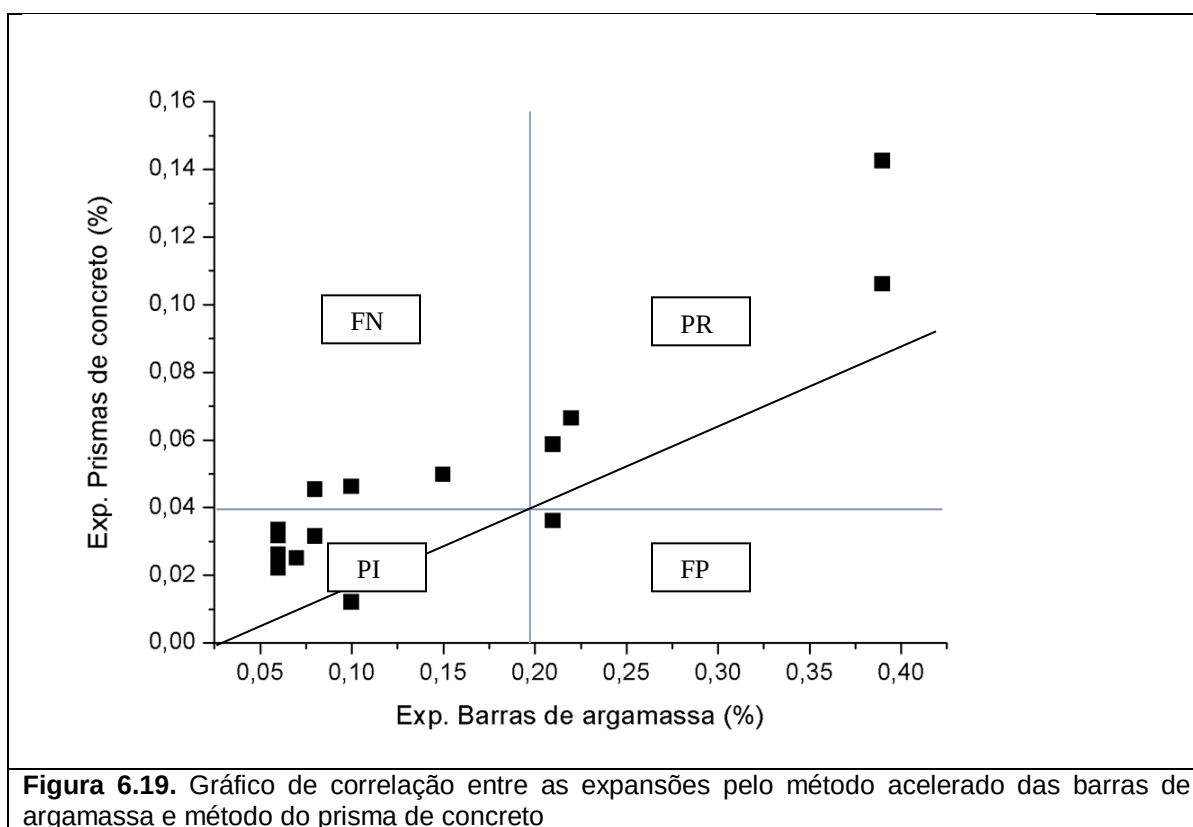
Tabela 6.4. Análise comparativa entre os resultados da reatividade dos agregados estudados reatividade nos ensaios normalizados

Ref.	Barras de argamassa NBR 15577 - 4		Prismas de concreto NBR 15577-6		Petrografia	Classificação final Potencialmente
	Exp %	Classificação Potencialmente	Exp %	Classificação Potencialmente	Classificação Potencialmente	
65	0,39	Reativo Grau R1	0,1424	Reativo Grau R2	Reativo	Reativo Grau R2
57	0,39	Reativo Grau R1	0,1060	Reativo Grau R1	Reativo	Reativo Grau R1
56	0,22	Reativo Grau R1	0,0648	Reativo Grau R1	Reativo	Reativo Grau R1
66	0,21	Reativo Grau R1	0,0586	Reativo Grau R1	Reativo	Reativo Grau R1
63	0,15	Inócuo Grau R0	0,0498	Reativo Grau R1	Inócuo	Reativo Grau R1
68	0,10	Inócuo Grau R0	0,0461	Reativo Grau R1	Inócuo	Reativo Grau R1
64	0,08	Inócuo Grau R0	0,0453	Reativo Grau R1	Inócuo	Reativo Grau R1
60	0,21	Reativo Grau R1	0,0360	Inócuo Grau R0	Reativo	Inócuo Grau R0
58	0,06	Inócuo Grau R0	0,0315	Inócuo Grau R0	Reativo	Inócuo Grau R0
69	0,06	Inócuo Grau R0	0,0334	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0
67	0,08	Inócuo Grau R0	0,0314	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0
61	0,06	Inócuo Grau R0	0,0260	Inócuo Grau R0	-	Inócuo Grau R0
69	0,07	Inócuo Grau R0	0,0250	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0
55	0,06	Inócuo Grau R0	0,0220	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0
62	0,10	Inócuo Grau R0	0,0120	Inócuo Grau R0	Inócuo	Inócuo Grau R0

O gráfico foi dividido em 04 quadrantes, tendo como referência os limites normativos para o ensaio acelerado das barras de argamassa (linha vertical – 0,19%) e para o ensaio de prisma de concreto (linha horizontal – 0,04%).

O 3º quadrante (PI) e o 1º quadrante (PR) estão localizados os resultados potencialmente inócuos e potencialmente reativos, respectivamente, tanto no ensaio acelerado em barras de argamassa, quanto no ensaio de prisma de concreto.

No 2º quadrante (FP) estão os agregados potencialmente inócuos, obtidos no ensaio de prisma de concreto, mas que no ensaio acelerado de barras de argamassa são classificados como potencialmente reativos. Nesses casos os resultados no ensaio acelerado de barras de argamassa são denominados de falso positivo.



No 4º e último quadrante estão os agregados potencialmente reativos no ensaio de prisma de concreto, mas que no ensaio acelerado de barras de argamassa os agregados seriam classificados como potencialmente inócuos. Nesses casos, o

ensaio acelerado de barras de argamassa estaria fornecendo resultados falsos negativos.

No gráfico 6.19 pode ser observado que existem 3 agregados no 4º quadrante, indicando que os ensaios acelerados de barras de argamassa apresentaram falsos negativos, enquanto 1 agregado está no 2º quadrante, indicando resultado falso positivo no ensaio acelerado das barras de argamassa.

O gráfico ainda mostra que existe uma tendência de resultados falsos negativos dos agregados estudados e, em uma análise mais global, que essa tendência pode se estender para os agregados da região. Essa tendência é mostrada, devido a maioria dos pontos estarem situados acima da reta que passa na origem e na interseção entre os limites normativos. Dos 15 agregados, apenas 2 tiveram pontos situados abaixo dessa reta, isto é, 13,3% das amostras.

O que pode ser observado ainda no gráfico é que os agregados que apresentaram resultados, tanto falso positivo, quanto falso negativo no ensaio acelerado de barras de argamassa, estão bem próximos dos limites normativos para ambos os ensaios. Esse fato indica, que erros de interpretação no ensaio acelerado de barras de argamassa podem ser aceitáveis, sob o ponto de vista tecnológico.

No que se refere a petrografia, os resultados mostram que a análise possui boa precisão quando os agregados estão nos extremos de reatividade, isto é, que apresentam baixa expansão ou alta expansão. Muito provavelmente em função de que nesses extremos as características petrográficas evidenciam mais notadamente a existência ou não de minerais deletérios.

6.5.5. Taxa de expansão

Um aspecto interessante observado no ensaio de prisma de concreto é a maneira como a expansão se manifesta ao longo tempo. Foi calculada a taxa de expansão em cada intervalo de tempo de medição através da expressão:

$$T_x = \frac{E_t - E_{t-1}}{\Delta t}$$

$$t - (t-1)$$

T_x é a taxa de expansão em mm/dia,

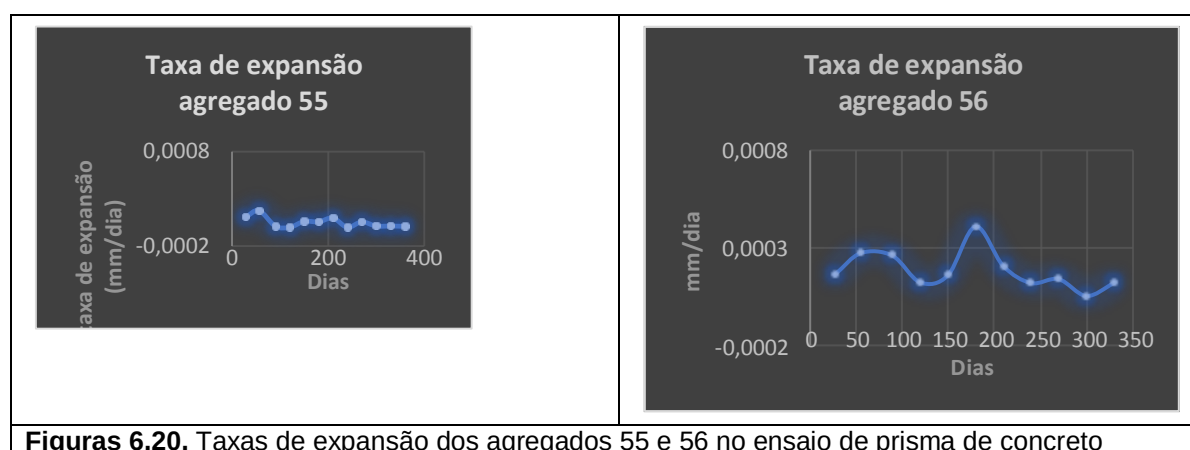
E_t é o valor da medição linear da barra, em mm, em um tempo t durante o ensaio,

E_{t-1} é o valor da medição linear da barra, em mm, em um tempo imediatamente inferior a t ;

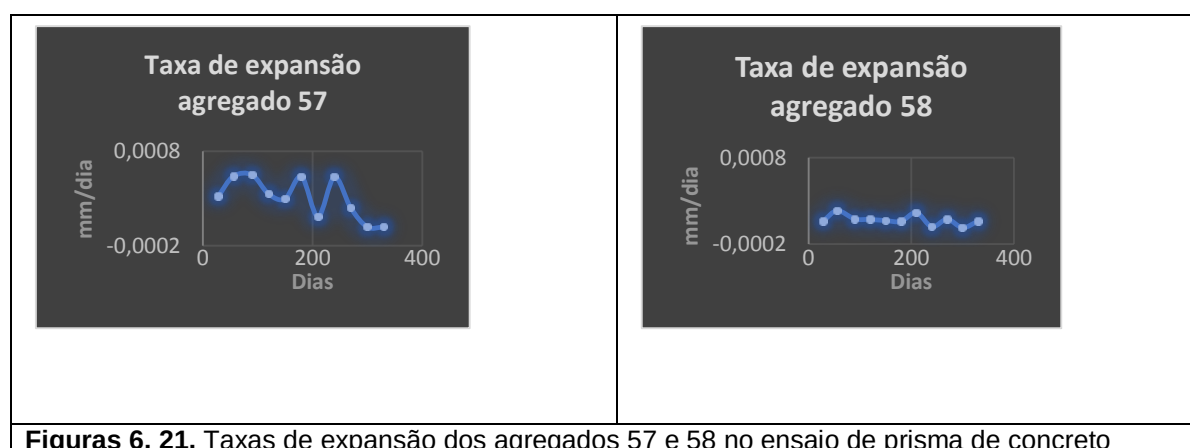
t é o tempo, em dias, a partir do tempo t_0 , que corresponde ao início do ensaio;

$t-1$ é o tempo, em dias, imediatamente inferior ao tempo $t-1$.

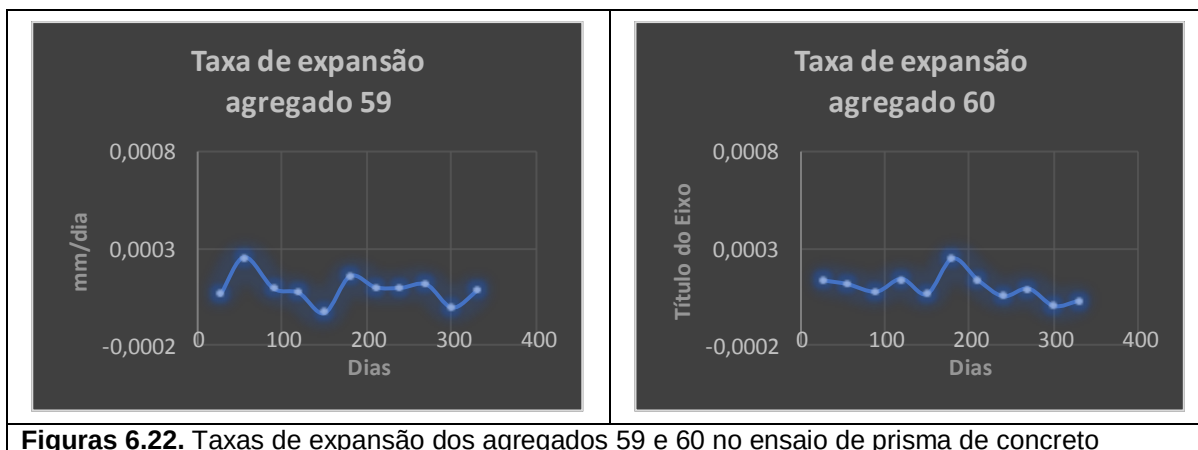
Observa-se nos gráficos das figuras 6.20 a 6.27 que as expansões ao longo de 1 ano de ensaio ocorrem com taxas de expansão variáveis, apresentando fluxos de expansões.



Figuras 6.20. Taxas de expansão dos agregados 55 e 56 no ensaio de prisma de concreto



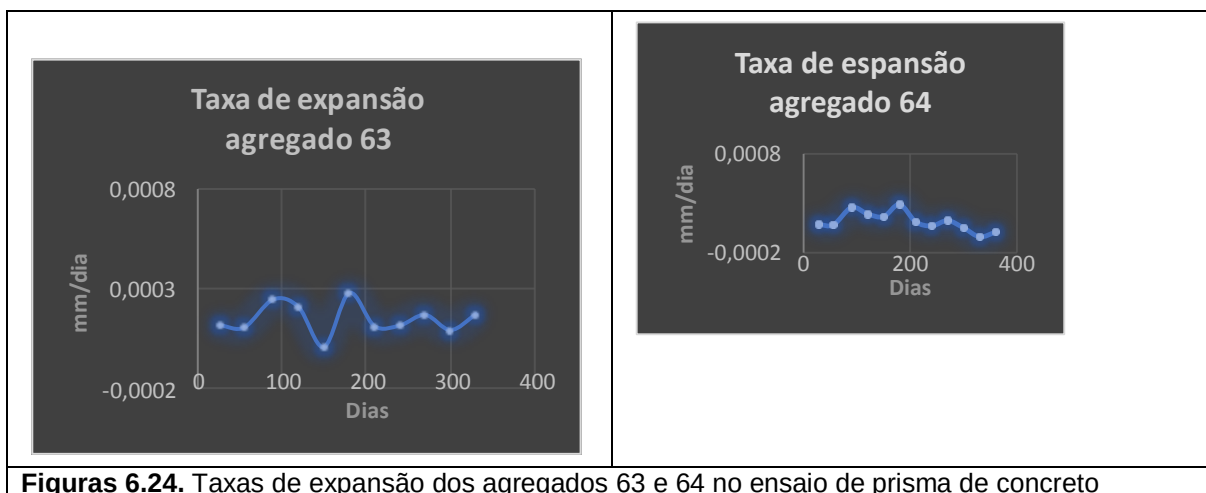
Figuras 6.21. Taxas de expansão dos agregados 57 e 58 no ensaio de prisma de concreto



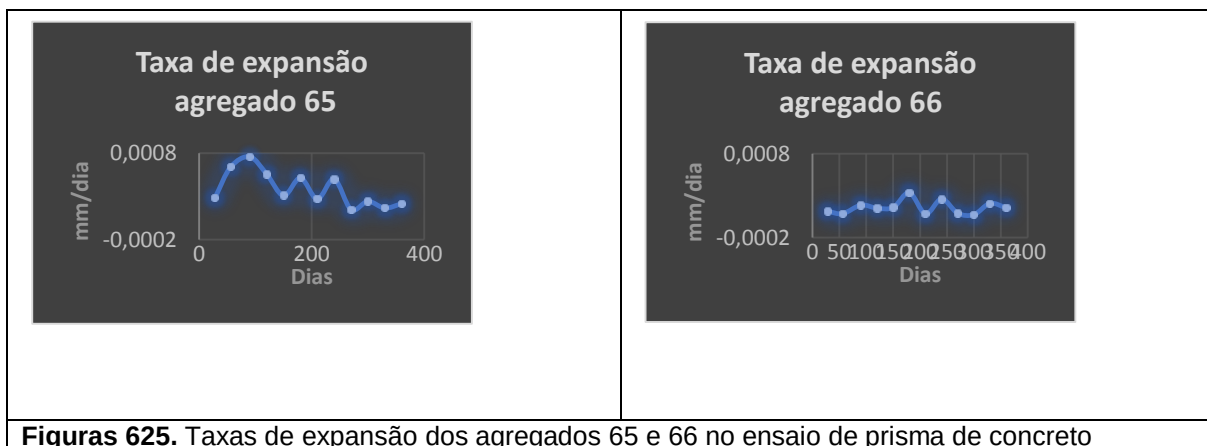
Figuras 6.22. Taxas de expansão dos agregados 59 e 60 no ensaio de prisma de concreto



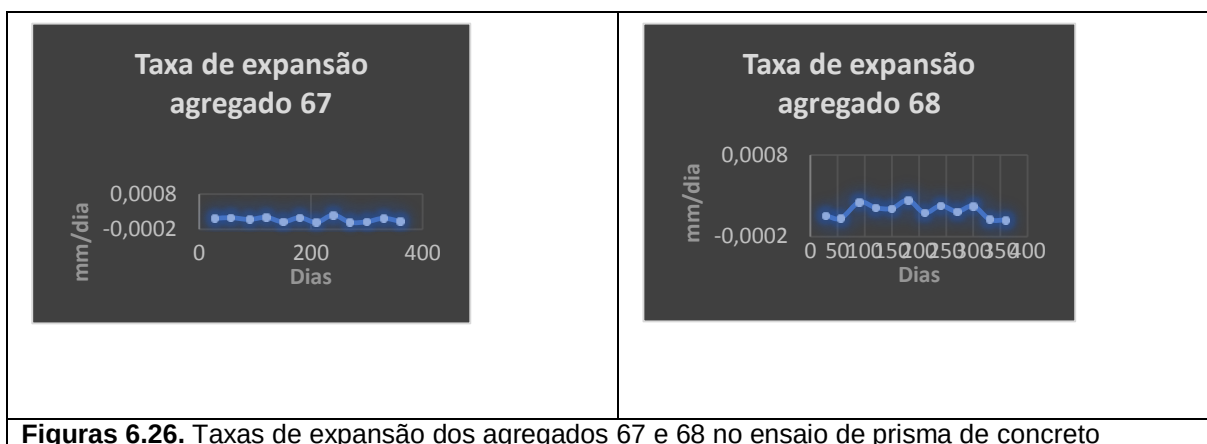
Figuras 6.23. Taxas de expansão dos agregados 61 e 62 no ensaio de prisma de concreto



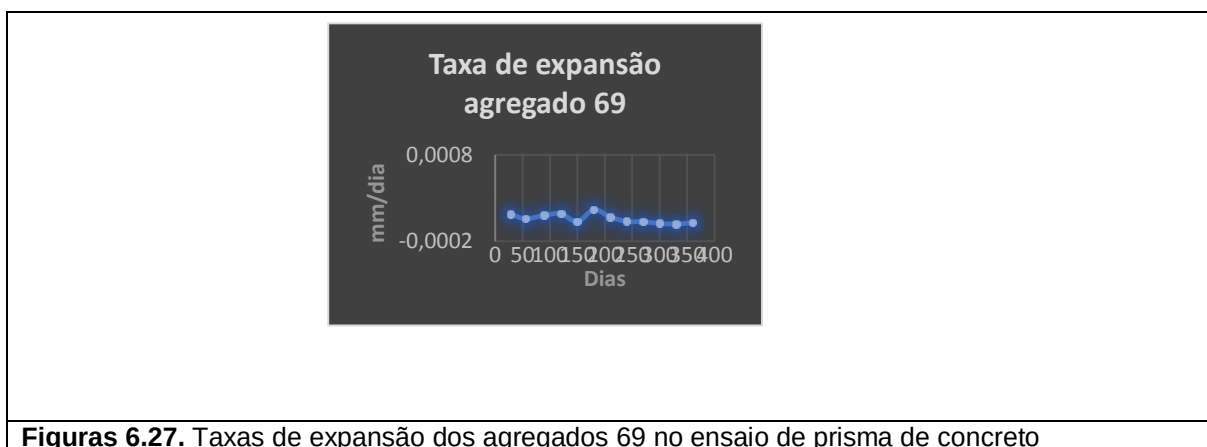
Figuras 6.24. Taxas de expansão dos agregados 63 e 64 no ensaio de prisma de concreto



Figuras 6.25. Taxas de expansão dos agregados 65 e 66 no ensaio de prisma de concreto



Figuras 6.26. Taxas de expansão dos agregados 67 e 68 no ensaio de prisma de concreto



Figuras 6.27. Taxas de expansão dos agregados 69 no ensaio de prisma de concreto

Esses fluxos são maiores e mais nítidos no início do ensaio, principalmente nos agregados de maior potencial de reatividade, como os de referência 57 e 65, tendendo a se estabilizar com o tempo, em função da redução da cinética da reação ou mesmo da maior capacidade do concreto de absorver os produtos da reação, devido ao aumento da microfissuração.

Essa característica na expansão está associada provavelmente a geração de tensões internas no concreto devido à formação do gel. Quando essas tensões chegam a um limite, o concreto não consegue mais absolvê-lo, liberando essa energia acumulada pela formação de microfissuras. Essas microfissuras voltam a ser preenchidas com gel pela continuidade da reação, levando novamente ao aumento de tensão interna e liberação pela formação de microfissuração, em um processo cíclico, que vai se exaurindo com o tempo.

6.6. Conclusões

- Dentre as capitais Aracajú e Maceió, cidades aonde ainda não se tem relatos divulgados de RAA, Aracajú poderá vir a apresentar casos de estruturas afetadas, enquanto na cidade de Maceió os ensaios não evidenciaram tal problema;
- Dos 15 agregados graúdos ensaiados, 07 foram enquadrados como potencialmente reativos pela NBR 15.577-parte 6, isto é 47% dos agregados ensaiados, enquanto 05 agregados graúdos foram classificados como potencialmente reativos pela NBR 15.577-parte 4, representando 33% das amostras;
 - Entretanto, apenas 01 desses 07 agregados foi classificação com Grau 2 de reatividade potencial pela NBR 15.577-parte 6, com expansão entre 0,13% e 0,24%, enquanto os demais foram classificados como Grau 1, com expansão entre 0,04% e 0,12%, evidenciando baixos níveis de reatividade;
 - Para os agregados ensaiados e muito provavelmente para a maioria dos agregados do nordeste brasileiro, que apresentam classificações petrográficas similares, o ensaio acelerado das barras de argamassa, que é o ensaio realizado em 100% das avaliações tecnológicas, subestima a reatividade

potencial no tocante a RAA, podendo ocorrer nessas rochas uma incidência bem maior de falsos negativos em relação aos falsos positivos;

- O ensaio petrográfico possuiu deficiência em classificar o agregado como potencialmente reativo ou potencialmente inócuo, quando a expansão esteve no intervalo próximo a classificação entre potencialmente inócuo (R0) e potencialmente reativo (R1);
- Para os agregados em questão, o ensaio petrográfico teve uma melhor correlação tomando como base o ensaio de expansão acelerada nas barras de argamassa (NBR 15577-parte 4);
- As taxas de expansões no concreto no mecanismo de expansão interna ocorrem na forma de picos, com ciclos de geração de pressão interna com formação de gel, alívio de tensão com propagação de fissuras, preenchimento das novas fissuras com gel, propagação de fissuras e assim sucessivamente.

7

CAPÍTULO II

**DISTRIBUIÇÃO MICROESTRUTURAL DAS FASES
MINERALÓGICAS DE ALGUNS AGREGADOS DA REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL E SEU EFEITO NA REAÇÃO ÁLCALI
AGREGADO**

7.1. Introdução

Nessa segunda etapa serão descritos os ensaios microestruturais realizados bem como mostrados os resultados obtidos e feitas as análises a partir desses resultados.

7.2. Ensaios realizados

Todos os agregados foram caracterizados quimicamente, utilizando a fluorescência de raios X a fim de obter os principais óxidos fundamentais nas 15 amostras e seus percentuais relativos.

Com as amostras em pó, os agregados foram atacados com solução alcalina, utilizando a metodologia descrita no subitem 1.1. Com as amostras cominuídas, atacadas e não atacadas, foi realizada o ensaio de difratometria e com o auxílio do programa TOPAS, de refinamento microestrutural, foi feita avaliação do efeito da distribuição microestrutural na reatividade dos agregados.

7.2.1. Procedimento para ataque alcalino dos agregados

O procedimento adotado para ataque alcalino das amostras moídas dos agregados foi desenvolvido no trabalho de doutorado, não possuindo metodologia normalizada.

A primeira etapa consistiu na moagem dos agregados coletados nas dimensões de agregados graúdos com diâmetro máximo de 25mm. Nessa moagem foi empregado inicialmente pequeno britador de mandíbula para redução do diâmetro dos agregados de 25mm para entorno de 6,3mm. Após essa redução, esse material passou por um moinho de disco, sendo coletada amostras com dimensão abaixo de 325 mesh para dar continuidade ao procedimento de ensaio.

Essas amostras moídas foram atacadas com solução alcalina, utilizando solução de hidróxido de sódio (NaOH). Para esse ataque foi utilizada proporção de 1 : 20 entre pó e solução alcalina, isto é, 2g de pó do agregado e 40ml solução de NaOH, com concentração de 1M. A mistura foi aquecida a 80°C durante 14 dias ininterruptos.

O pó do agregado moído foi pesado em balança digital, com precisão de milésimo de grama e acondicionada em cadinho de porcelana para secagem em estufa a 105°C, conforme figura 7.1.

Para esse ataque, as amostras, juntamente com a solução de NaOH foram misturadas e acondicionadas em erlenmeyer de plástico, com capacidade para armazenamento de 100ml, podendo visualizada a colocação do pó já secado em estufa no recipiente na figura 7.2.

A maior dificuldade encontrada para a realização do ataque com solução alcalina foi garantir a vedação do erlenmeyer. Após várias tentativas se chegou à conclusão que seria impossível, com o sistema de vedação do erlenmeyer, de se evitar a evaporação da solução alcalina durante os 14 dias de ataque a uma temperatura de 80°C.

O erlenmeyer de plástico utilizado já possuía tampa com rosca, entretanto, essa tampa não permitia a estanqueidade do recipiente a uma temperatura de trabalho a 80°C. Diante desse empasse, foi projetado um outro sistema de vedação que consistiu na fabricação de contra rosca, tampa, cilindro de nylon e borracha para garantir a vedação do sistema. O erlenmeyer ainda foi revestido com resina e fibra de vidro na superfície externa.

Nas figuras 7.3 e 7.4 podem ser visualizado o sistema projetado para a vedação. Na figura 7.4 pode ser mostrado ainda que, após o encaixe do cilindro na boca do erlenmeyer e antes do fechamento com a tampa, a interface entre o cilindro de vedação e a contra rosca foi impregnado com veda rosca líquida.

Após a colocação de 2g de pó de agregado e 40ml de solução alcalina no erlenmeyer e a vedação do recipiente o recipiente foi colocado em banho maria com equipamento contendo disposto de agitação e tampa, conforme mostrado na figura 7.5. O banho foi regulado para uma temperatura de 80oC e o frequência de agitação de 45 ciclos por minuto com o objetivo de evitar a decantação do pó no fundo do recipiente. Para auxiliar a dispersão do pó na solução, além do sistema de agitação, foi colocado no interior de cada recipiente 2 esferas de aço inoxidável com 8mm de diâmetro.

Após 14 dias de ataque os erlenmeyer foram removidos do banho maria para dar início a próxima etapa do trabalho, A solução com o pó foi colocada em um Becker

e adicionado 300ml de água destilada, sendo neutralizada a amostra/solução utilizando ácido clorídrico, com auxílio de um medidor de pH digital e pipeta, conforme pode ser visualizado na figura 7.6.

Após o procedimento de neutralização da solução alcalina, o material passou por processo de filtração para separação do NaCl formado na neutralização da amostra do pó de agregado atacado. Para esse procedimento foi empregado microfiltro de fibra de vidro com 30mm de diâmetro com malha de 0,6 micra, utilizando porta filtro a vácuo, bomba a vácuo e beckers, conforme mostrado na figuras 7.7 e 7.8. A filtração foi realizada sucessivamente, com água destilada, até que líquido filtrante tivesse uma condutividade inferior a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, medida em equipamento portátil tipo caneta.

Após a finalização da secagem, a amostra de pó do agregado retida nos microfiltros e a água de filtração e os filtros utilizados na filtração foram secados em estufa, com auxílio de cadinhos de porcelana, e o pó atacado e o sal obtidos foram armazenados em micro tubos plásticos do tipo eppendorfs, podendo o procedimento ser visualizado nas figuras 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12.

Nas amostras em pó atacadas pela solução alcalina e “in natura” dos agregados foram realizados ensaios de DRX em um BRUKER D2, sendo utilizado para análise o programa TOPAS versão 4.2 para refinamento microestrutural.



Figura 7.1. Amostra de agregado em pó sendo pesada em balança



Figura 7.2. Amostra com 2g de agregado em pó sendo colocado do erlenmeyer para ser atacado em solução alcalina



Figura 7.3. Erlenmeyer adaptado para suportar a pressão a uma temperatura de 80° durante 14 dias sem perda da solução por evaporação, sendo composto por contra rosca, anel e tampa de nylon, além de borracha no interior da tampa.



Figura 7.4. Anel do Erlenmeyer sendo vedado com veda rosca líquida em sua borda com a amostra em pó do agregado e solução alcalina já acondicionada em seu interior



Figura 7.5. Detalhe do banho maria com 03 erlenmeyers fixados a placa com dispositivo de agitação pronto para receber lâmina d'água e a campânola (tampa) para ser ligado o dispositivo de aquecimento (termostato digital).

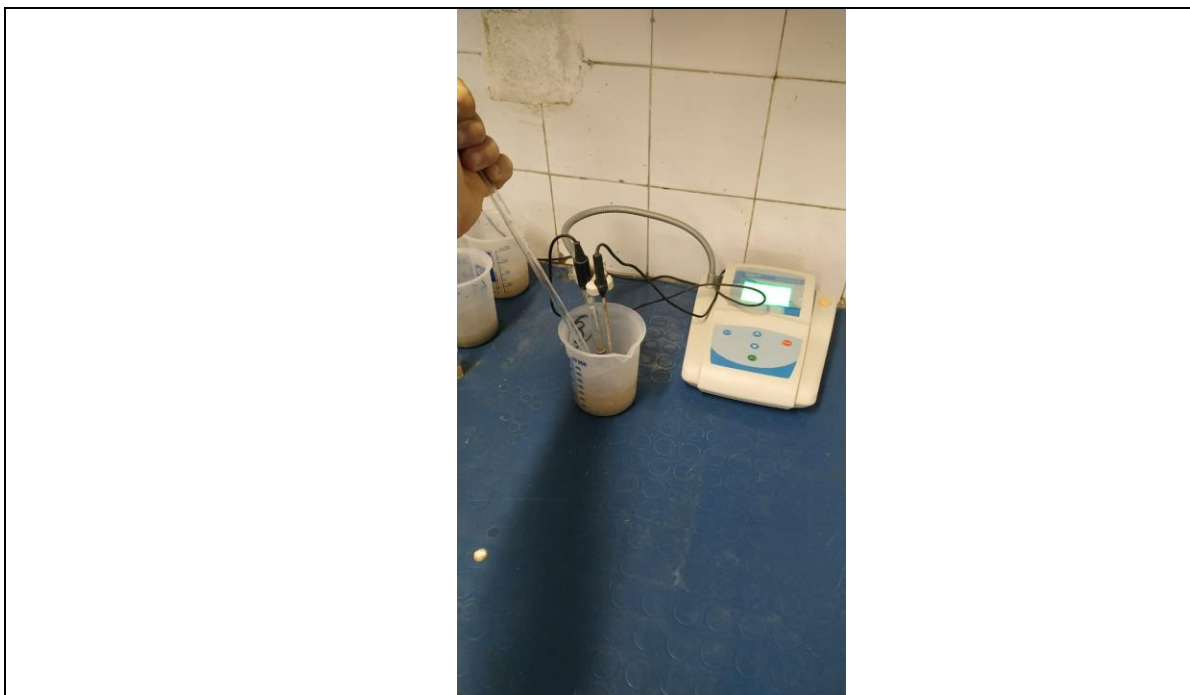


Figura 7.6. Detalhe de amostra já atacada armazenada em um Becker sendo a solução alcalina utilizada no ataque neutralizada com HCl, sendo a operação realizada com auxílio de uma pipeta e um medidor de pH de bancada digital com eletrodo de pH e de temperatura



Figura 7.7. Detalhe do processo de filtragem da solução da amostra atacada. A solução neutralizada com o pó é colocada sobre o microfiltro no portafiltro. A solução por gravidade e auxiliada pelo vácuo da bomba passa pelo microfiltro, ficando retido sobre o microfiltro o pó atacado. O pó atacado sobre o microfiltro foi lavado várias vezes com água destilada para a remoção do NaCl e a água de lavagem armazenada em beckers para medição da condutividade elétrica. O processo de lavagem só era interrompido quando a condutividade elétrica quando a água de lavagem era inferior a 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

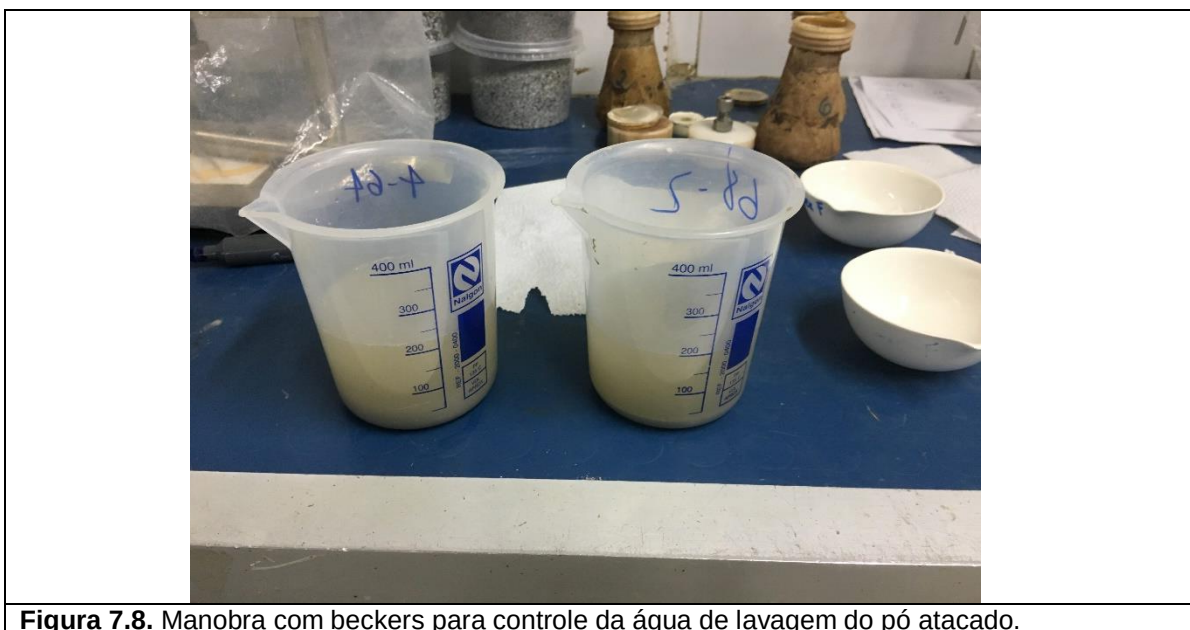


Figura 7.8. Manobra com beckers para controle da água de lavagem do pó atacado.



Figura 7.9. Cadinhos de porcelana dentro da estufa com o da esquerda contendo microfiltros utilizados na lavagem e o da direita com pó atacado com água de lavagem utilizada para descolamento do pó do microfiltro.



Figura 7.10. Pó de agregado atacado após a completa secagem em estufa



Figura 7.11. Cadinho de porcelana a frente contendo água de lavagem com NaCl dissolvido originado da neutralização da solução alcalina.

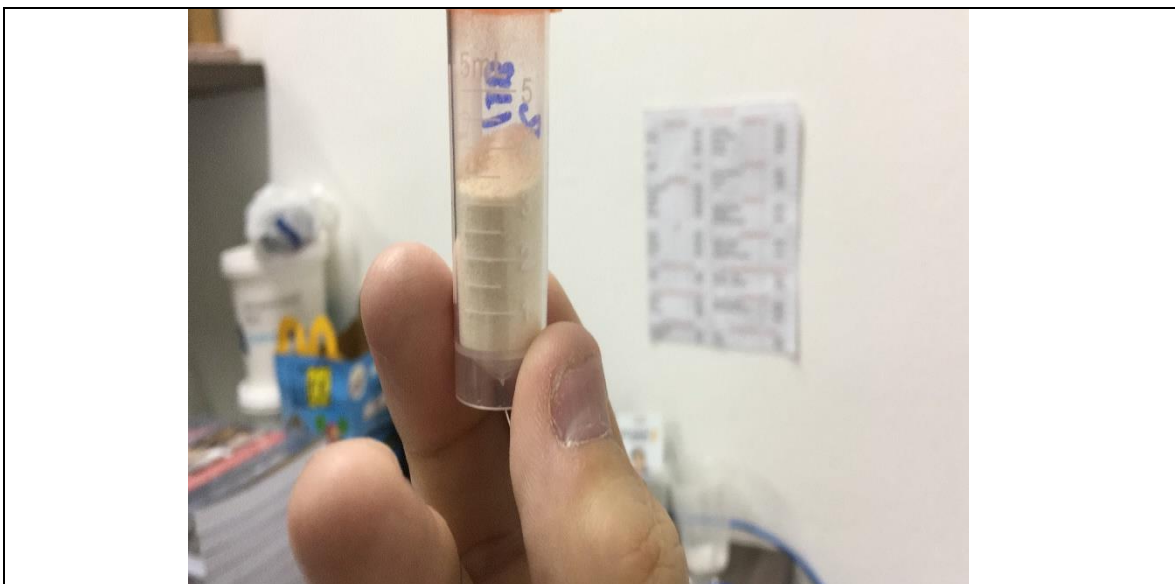


Figura 7.12. Após a secagem em estufa o pó de agregado e o sal foram armazenados em eppendorfs para serem ensaiados no DRX.

7.2.2. Fluorescência de Raio X

A determinação dos óxidos fundamentais foi realizada por fluorescência de raios X em modo qualitativo-quantitativo no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR), UFPB, em espectrômetro modelo XRF-1800 da Shimadzu, no qual os raios X são gerados por meio de tubo com alvo de Rh.

7.2.3. Difração de Raio X

As análises mineralógicas por difração de raios X foram realizadas no Laboratório de Caracterização Microestrutural, UFPB, em difratômetro de raios X D2 Phaser da Bruker conforme Figura 7.13. A radiação utilizada foi $K\alpha$ do Cu (30 KV/10 mA); varredura de 5° a 70° , passo de $0,01^\circ$ e tempo de passo de 0,5 s.

7.3. Resultados

A seguir serão mostrados os resultados referentes aos ensaios microestruturais realizados, que seriam as informações obtidas do ataque e filtragem. Os percentuais de óxidos fundamentais através da FRX e os ensaios de DRX com determinação dos percentuais dos principais minerais presentes nas amostras e grau de cristalinidade das rochas.



Figura 7.13. Equipamento D2 Phaser da Bruker para ensaios de Difratoograma de RaioX - DRX (Fonte – Próprio autor/2018).

7.3.1. Ataque e Filtragem

A tabela 7.1 mostra as principais informações obtidas na metodologia utilizada no ataque das rochas com solução alcalina durante 14 dias de exposição a uma temperatura de 80°C.

Na segunda coluna estão as massas de pó utilizadas para o ataque alcalino, que está próximo de 2g. a terceira coluna mostra a massa dos agregados após o ataque alcalino. No processo de filtragem ocorreram perdas que podem variar de ensaio para ensaio, mostradas na quarta coluna, pois envolvem filtrações sucessivas, com emprego de várias membranas para remoção do NaCl das amostras.

O uso de mais de uma membrana foi função da perda permeabilidade à medida que o pó era filtrado, levando a tempos de filtragem muito longos ocorrendo a necessidade da troca da membrana.

A quinta coluna na tabela se refere ao pH da amostra antes da neutralização e imediatamente após a retirada do banho maria. Os valores de são muito próximos entre si, independente da rocha, girando entorno de 13,00. A sexta coluna se refere ao pH da solução após a neutralização com HCl.

Tabela 7.1.. Informações sobre o procedimento de ataque com solução alcalina realizado nas amostras

Ref.	Massa amostra (g)	Massa amostra seca após o ataque (g)	Perda de massa após a filtragem %	pH antes da neutralização	Ph depois da neutralização	Condutividade elétrica da água de filtragem uS/cm
55	2,150	2,127	1,07	13,22	6,93	105
56	2,036	1,997	1,91	13,14	6,95	104
57	2,130	2,080	2,35	12,99	6,98	80
58	2,056	2,035	1,02	13,05	6,94	77
59	2,152	2,061	4,20	12,95	7,02	127
60	2,120	2,035	4,00	12,87	7,00	83
61	2,125	2,112	0,61	13,04	6,82	82
62	2,128	2,050	3,70	13,00	6,96	120
63	2,171	2,132	1,80	12,64	6,96	80
64	2,212	2,198	0,63	12,94	6,77	95
65	2,125	2,035	4,20	12,98	6,96	110
66	2,164	2,123	1,89	12,63	7,04	91
67	2,091	2,067	1,15	12,98	7,02	73
68	2,125	2,116	0,42	12,98	7,05	150
69	2,106	2,067	1,85	12,94	6,89	140

Por último, a sétima coluna mostra a condutividade elétrica da água destilada após a filtragem. A filtragem foi realizada em ambiente de laboratório climatizado, com temperatura da água destilada de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, utilizando volumes de aproximadamente 200ml por vez. Para cada volume de 200ml de água filtrada que passava pela membrana a condutividade era medida, ocorrendo ou não a troca da membrana, dependendo da sua permeabilidade. A filtragem só era interrompida quando na medição da condutividade o valor era igual ou inferior a 200uS/cm, indicando que a concentração de sais na água de filtragem é inferior a 100mg/L. A condutividade medida na primeira operação de filtragem girou entorno de 4000uS/cm e a água do mar possui uma condutividade média entorno de 53.000uS/cm.

7.3.2. Percentual de óxidos fundamentais por FRX

Nessa tabela 7.2 foram determinados os percentuais de CaO, SiO₂, SO₃, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O e Na₂O e álcalis equivalente, foi obtido a partir dos percentuais de K₂O e Na₂O, utilizando a expressão (%Na₂O + 0,658%K₂O).

Além das informações dos percentuais dos óxidos principais, os agregados foram colocados em ordem decrescente de potencial de reatividade, tomando como referência o ensaio expansão de prismas de concreto. Foi mostrado também as expansões, tanto no método acelerado das barras de concreto, quanto no ensaio de expansão em prismas de concreto.

7.3.3. Difractograma das rochas

As figuras 7.14 a 7.28 mostram os resultados do ensaio de DRX realizados nas 15 amostras de agregados, estando essas figuras ordenadas a partir dos agregados mais reativos para os agregados menos reativos. Nas figuras estão os difratogramas dos agregados não atacados (esquerda) e atacados (direita) com os principais minerais presentes com seus respectivos percentuais, obtidos através do programa TOPAS de refinamento estrutural.

Tabela 7.2. percentuais dos principais óxidos fundamentais das rochas dos agregados estudados

Ref.	Óxidos fundamentais									Expansão %	
	CaO	SiO ₂	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Álcalis Equiv.	Barras	Prismas
65	1,87	75,11	0,14	0,90	11,29	1,79	3,47	4,73	6,59	0,39	0,1424
57	3,05	74,03	0,07	1,28	10,90	2,84	2,27	5,01	5,57	0,39	0,1060
56	1,96	77,63	0,06	0,76	10,20	1,74	2,48	4,71	5,58	0,22	0,0664
66	3,72	68,61	0,09	2,59	11,83	5,19	3,01	3,64	5,41	0,21	0,0586
63	4,69	65,91	0,12	3,51	11,72	6,89	2,43	3,27	4,58	0,15	0,0497
68	2,07	77,17	0,00	0,73	11,87	2,68	1,49	2,96	3,44	0,10	0,0461
64	2,67	69,30	0,07	1,79	11,14	5,93	4,05	3,30	6,22	0,08	0,0453
60	1,68	77,47	0,03	0,44	10,73	1,37	2,55	5,27	6,01	0,21	0,0360
59	3,83	71,13	0,07	1,64	11,13	3,80	2,89	3,82	5,41	0,06	0,0334
58	3,57	71,75	0,10	1,40	11,20	3,66	3,22	4,20	5,98	0,06	0,0315
67	1,76	73,94	0,00	0,71	11,55	2,99	4,56	3,47	6,84	0,08	0,0314
61	2,06	75,40	0,06	0,80	10,76	2,31	3,50	4,36	6,37	0,06	0,0260
69	4,08	68,96	0,08	1,51	11,46	4,97	3,14	3,76	5,61	0,07	0,0250
55	2,19	74,77	0,06	0,43	11,22	1,56	3,76	5,34	7,27	0,06	0,0221
62	2,07	74,84	0,05	1,20	11,35	2,17	2,62	5,01	5,92	0,10	0,0120

Nas figuras também pode ser visualizado tabelas com resumo das principais fases cristalinas, que são o quartzo, biotita e feldspatos, além do somatório das demais fases cristalinas presentes em menor quantidade(outros), com a estimativa de

seus percentuais, tanto das amostras “in natura”, quanto após o ataque de solução alcalina.

Nessas tabelas ainda é mostrado, para ambas as amostras não atacadas e atacadas, o grau de cristalinidade, isto é, quanto representa as fases cristalinas em relação a fase amorfa.

Por último, essas tabelas exibem a relação entre o percentual das fases cristalinas e do grau de cristalinidade das amostras atacadas e não atacadas e os valores de expansão dos agregados, tanto no ensaio acelerado das barras de argamassa, quanto no ensaio de prismas de concreto, com indicativo em vermelho dos agregados potencialmente reativos para o ensaio.

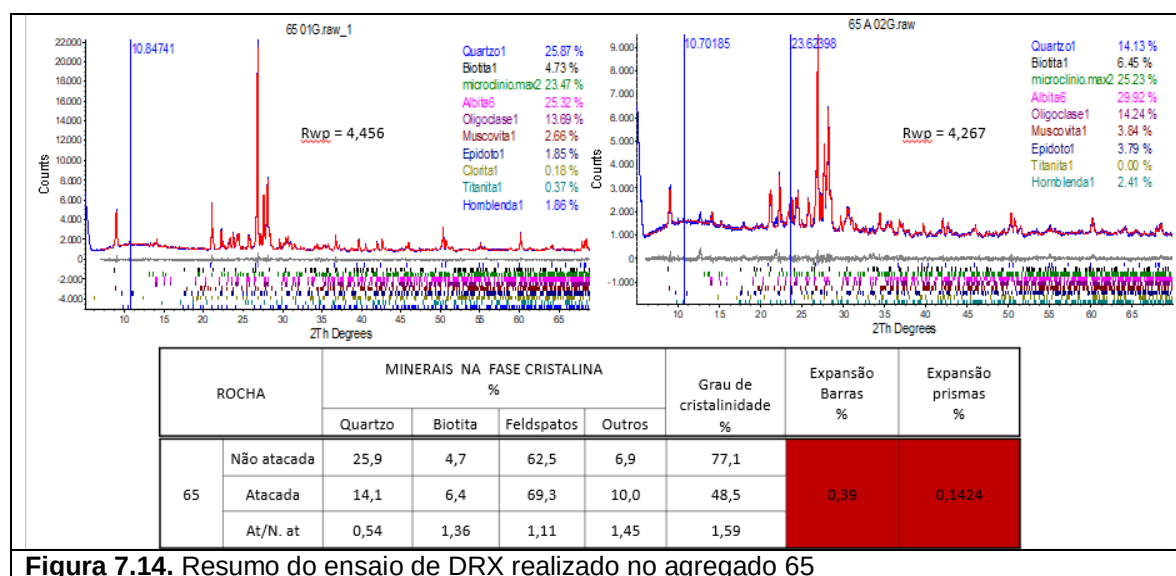


Figura 7.14. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 65

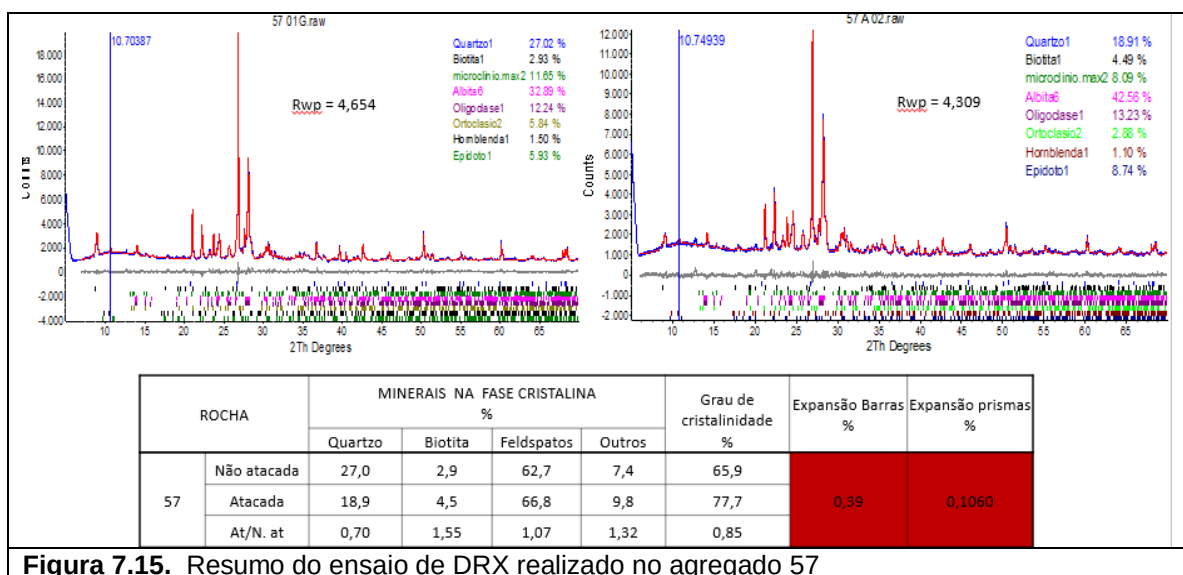


Figura 7.15. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 57

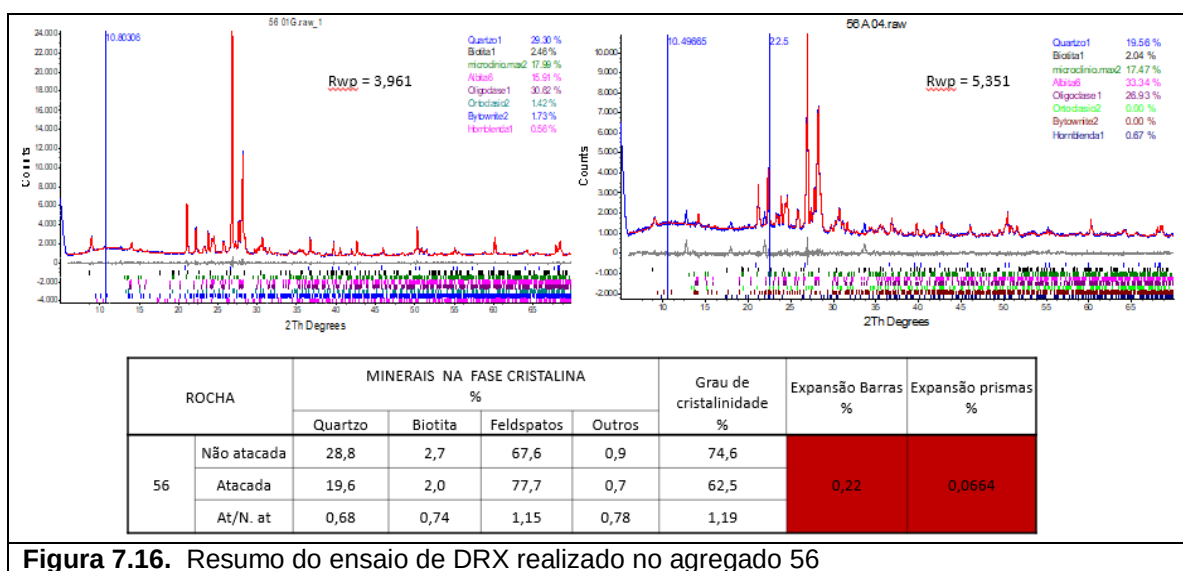


Figura 7.16. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 56

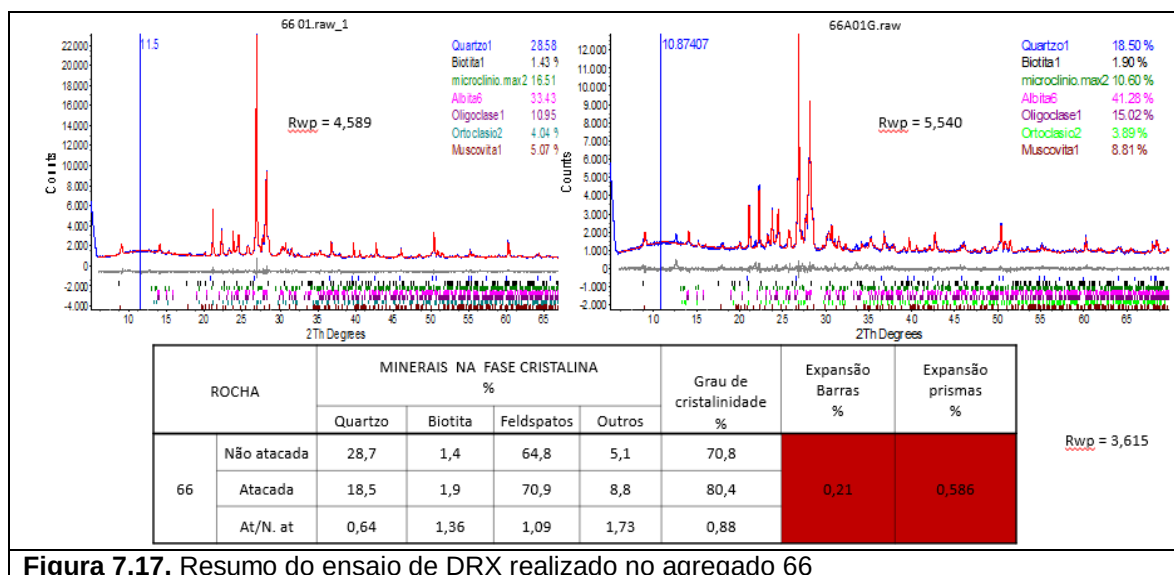


Figura 7.17. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 66

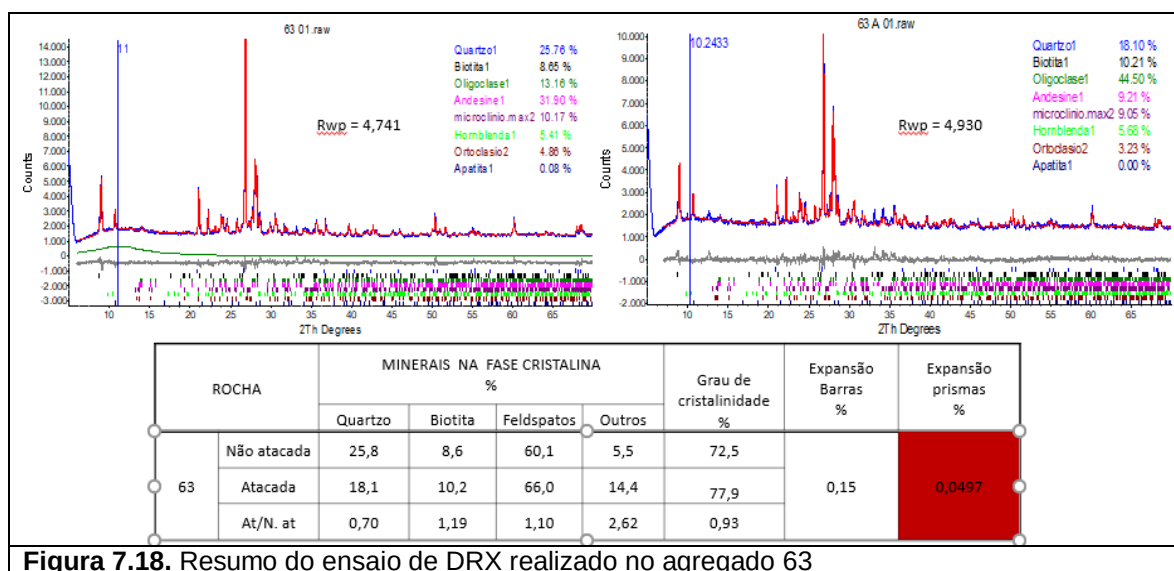


Figura 7.18. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 63

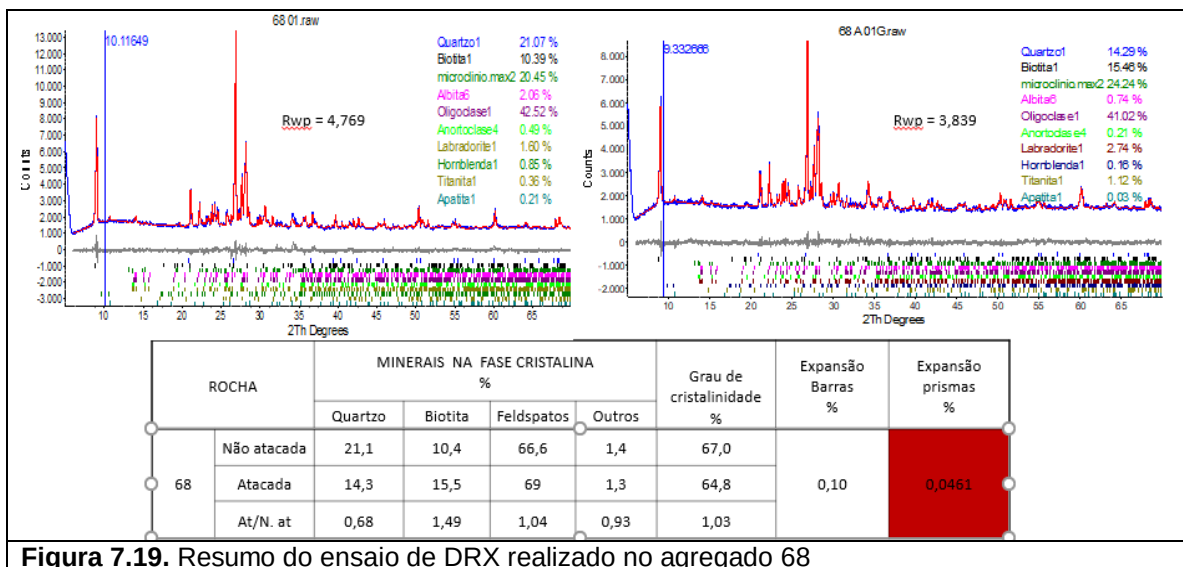


Figura 7.19. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 68

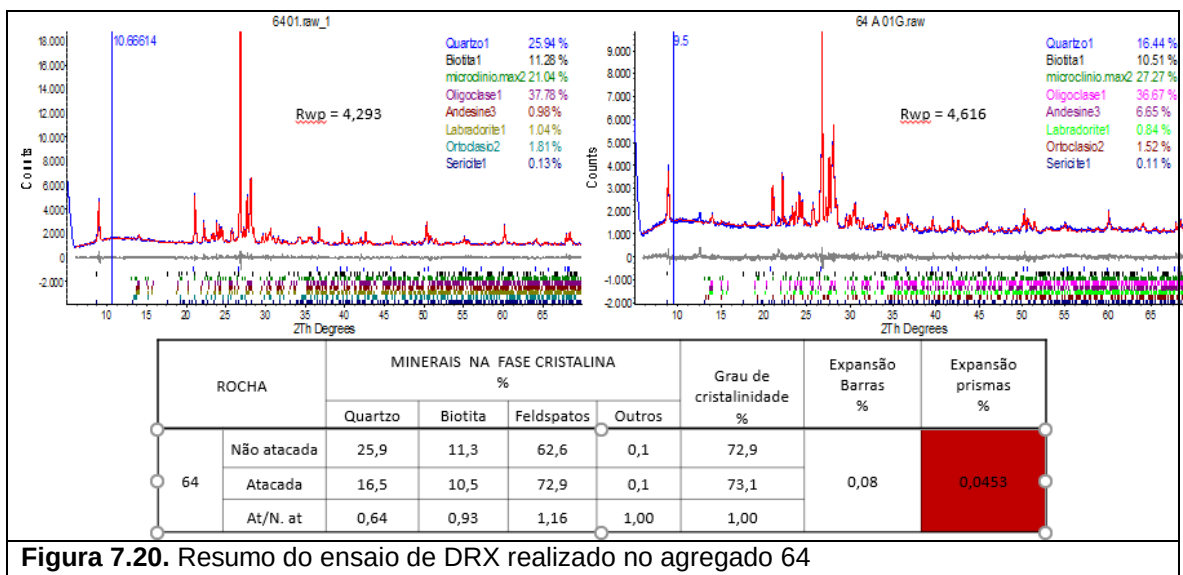


Figura 7.20. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 64

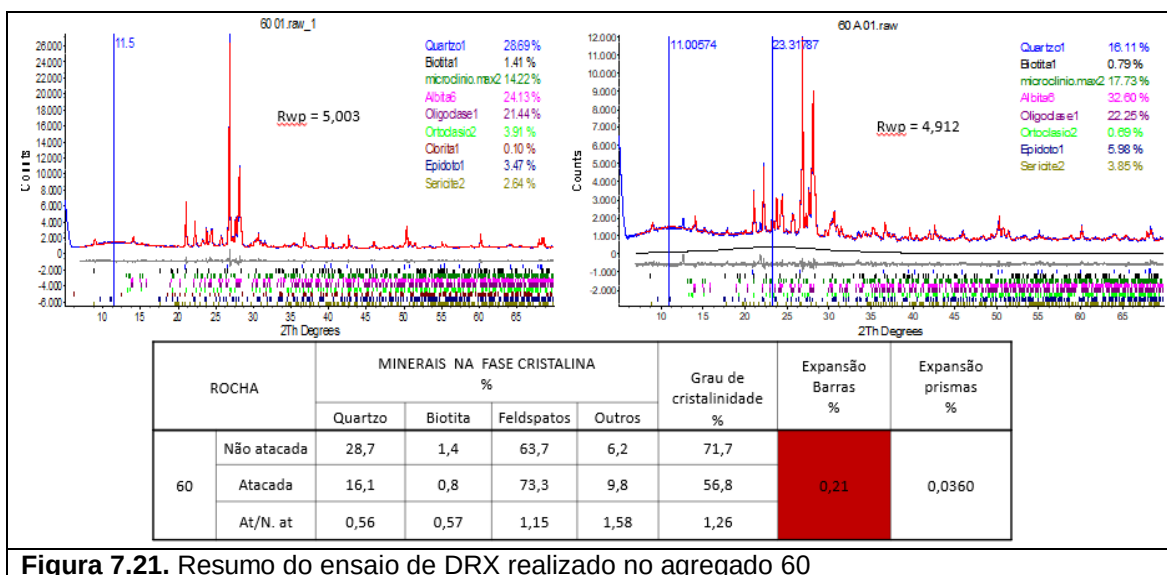


Figura 7.21. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 60

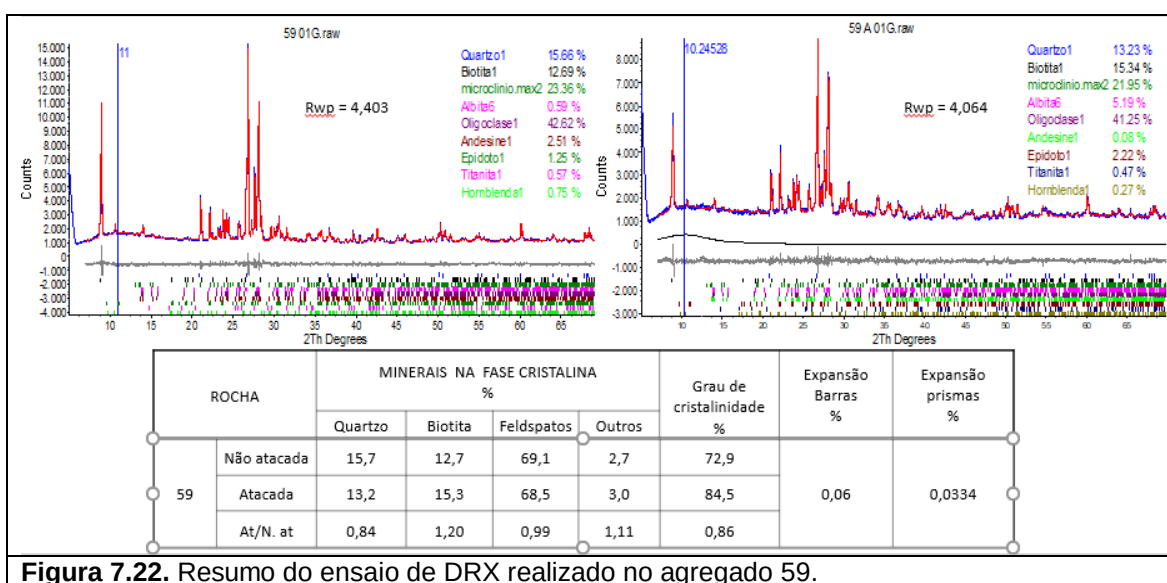


Figura 7.22. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 59.

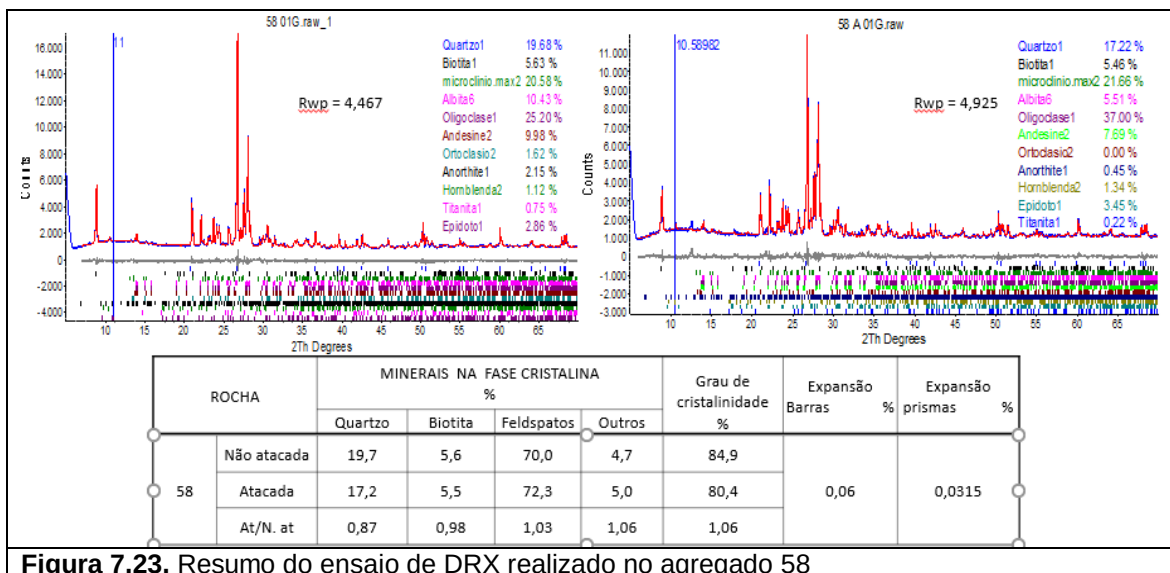


Figura 7.23. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 58

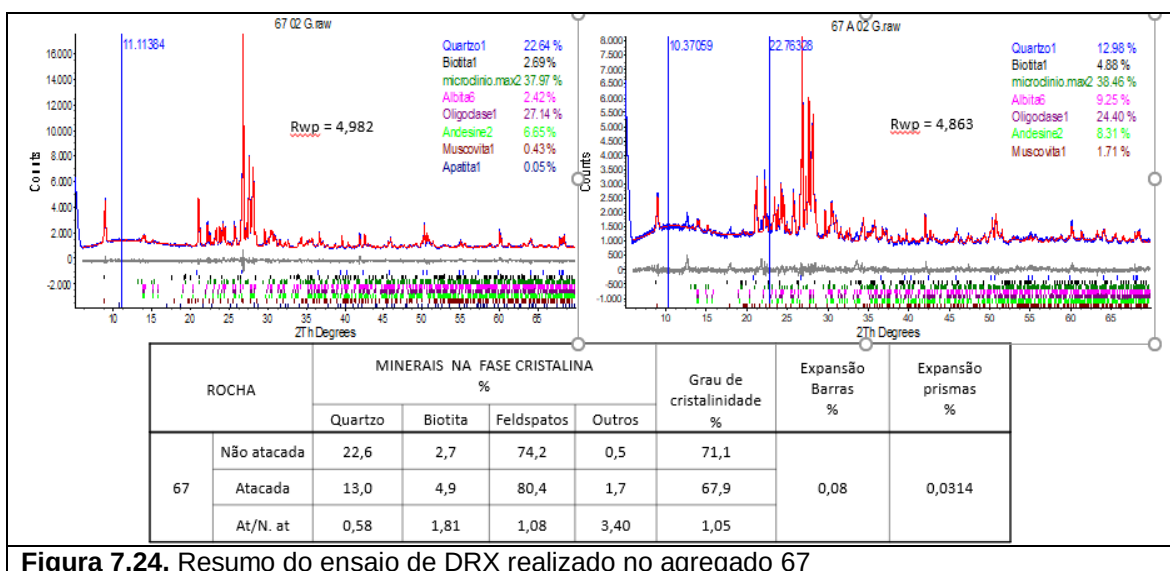


Figura 7.24. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 67

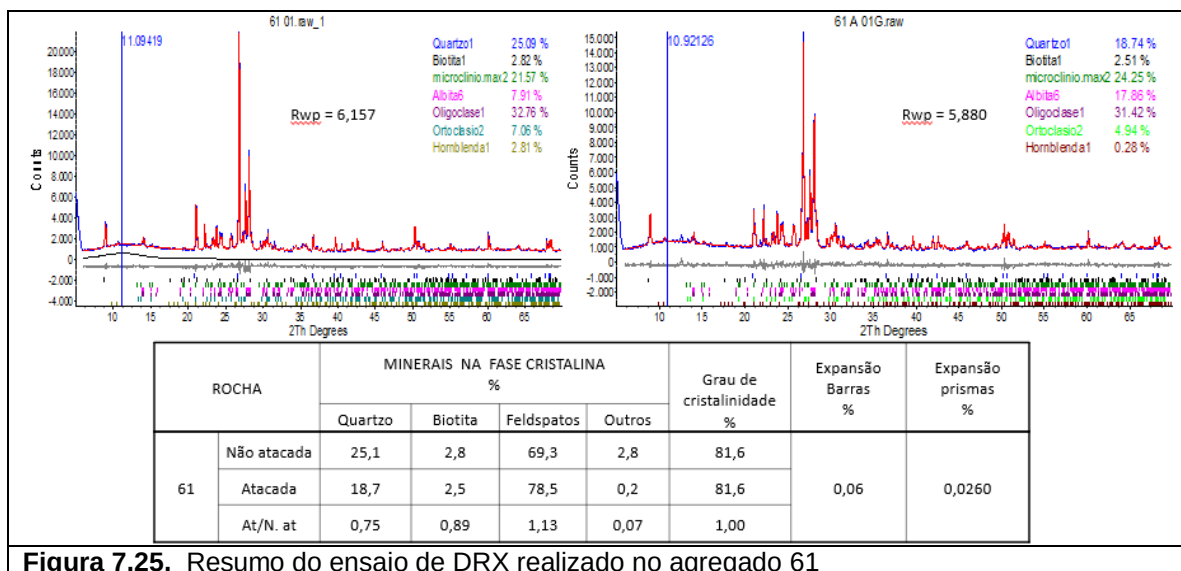


Figura 7.25. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 61

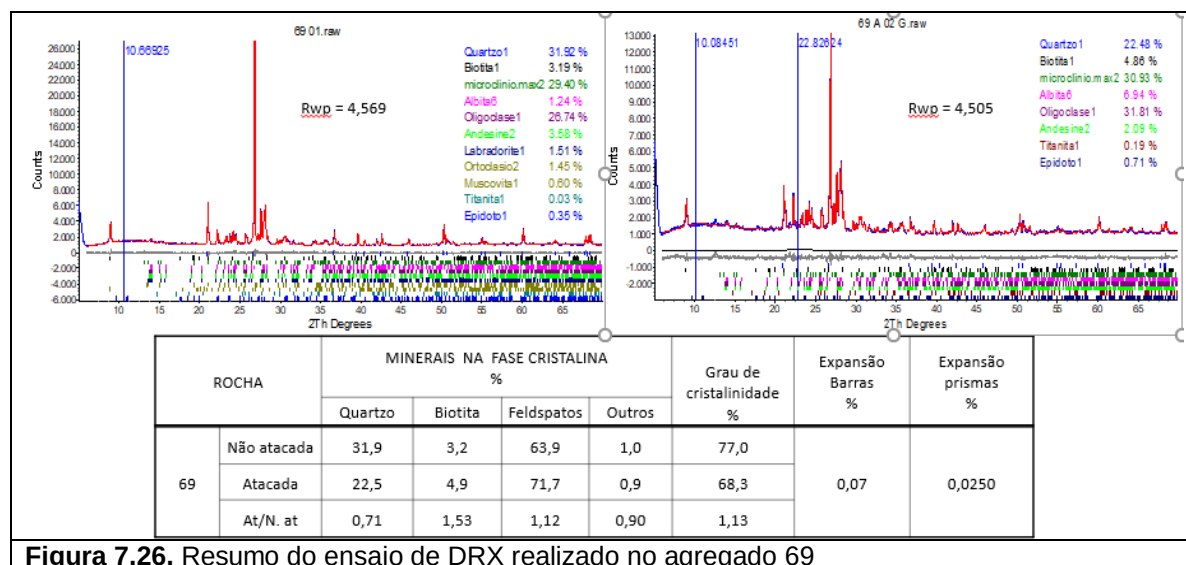


Figura 7.26. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 69

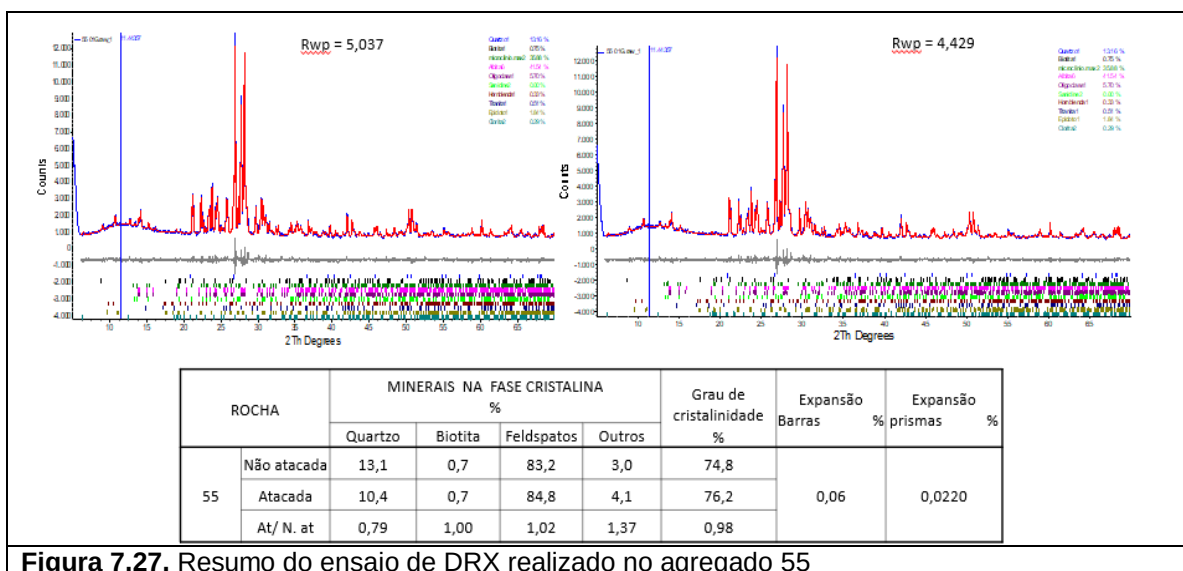


Figura 7.27. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 55

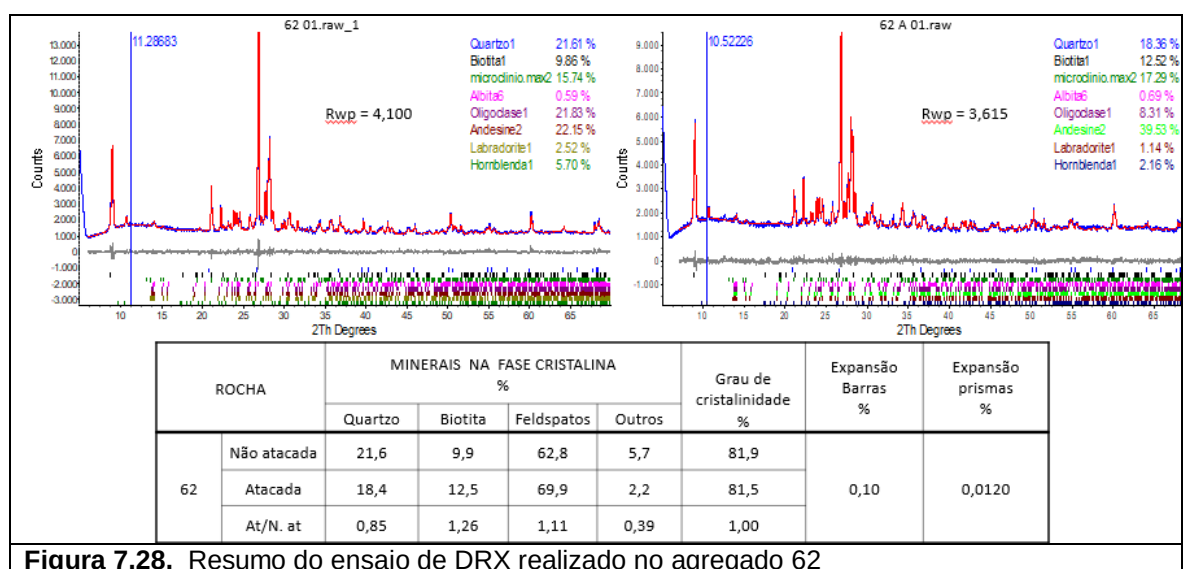


Figura 7.28. Resumo do ensaio de DRX realizado no agregado 62

7.4. Análise dos resultados

A tabela 7.3. mostra, a partir dos resultados dos percentuais de fases cristalinas das rochas não atacadas e atacadas com solução alcalina, indiscutivelmente, que a fase mais susceptível ao ataque em todos os agregados é o quartzo, sendo coerente com a bibliografia, que cita que a fase responsável pela RAA são formas de quartzos.

Observa-se que existe uma redução proporcionalmente maior do quartzo em relação as demais fases cristalinas após o ataque, com aumento percentual, na maioria dos agregados, das demais fases cristalinas.

Apesar de que a maior dissolução de quartzo observada, cerca de 46%, está exatamente agregado 65, isto é, no agregado de maior potencial de reatividade dentre os 15 estudados, não existe uma boa correlação entre esse parâmetro de ensaio e a expansão do agregado, tanto no ensaio acelerado das barras, quanto no ensaio de prisma de concreto. Aliás essa correlação foi baixa, conforme visualizado nos gráficos das figuras 7.29 e 7.30.

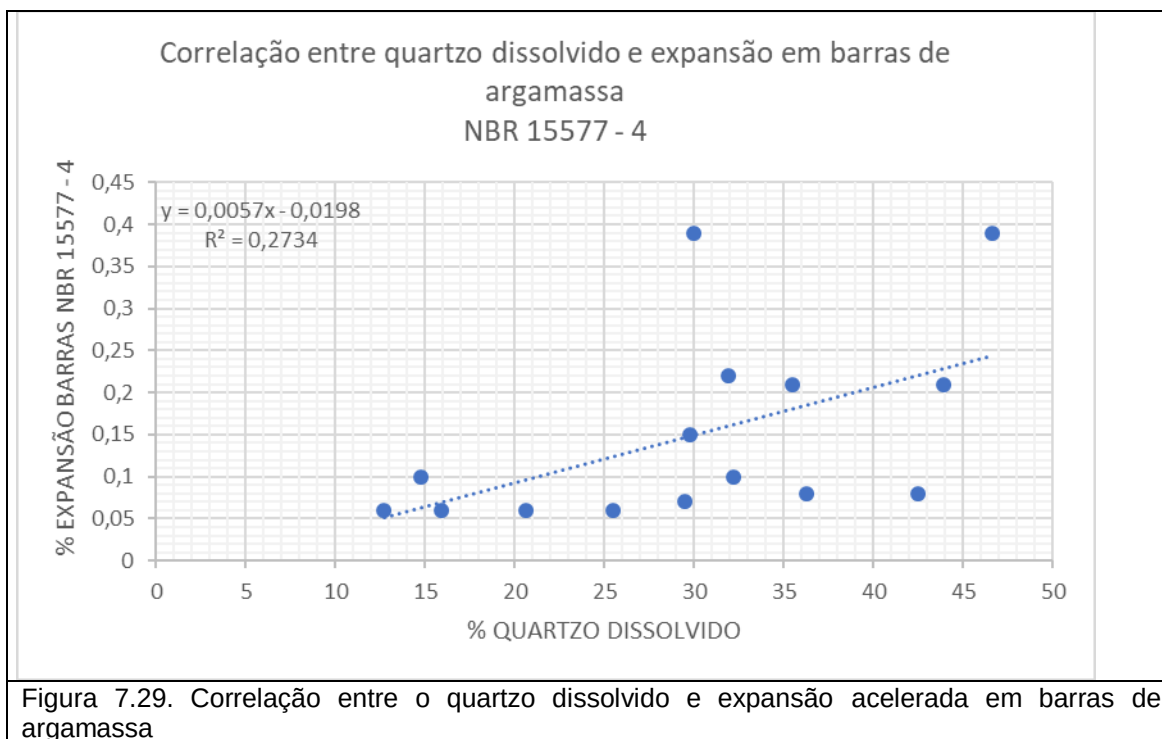
Nesses gráficos se buscou uma correlação linear entre o quartzo dissolvido e as expansões no ensaio acelerado das barras de argamassa e prisma de concreto, obtendo-se valores de R^2 de 0,2734 e 0,2764, respectivamente.

Portanto a técnica de ensaio empregada não permite obter uma correlação confiável entre a reatividade potencial do agregado e a dissolução do quartzo. Esse fato pode estar relacionado a cominuição das partículas para realização do ensaio em dimensões bem inferiores as dimensões utilizadas nos agregados para concreto, o que pode levar a uma mudança microestrutural do quartzo, alterando a sua reatividade. Uma outra suposição para a falta de correlação é a distribuição das fases no interior das partículas dos agregados e seus defeitos (microporos e microfissuras) existentes e podem ter sido destruídas ou alteradas quando da cominuição das partículas para dimensões inferiores a 325mesh empregadas no ensaio.

Tabela 7.3. Resumo dos resultados obtidos no ensaio de DRX.

Rocha		Principais Minerais presentes %				Grau cristalinidade %	Expansão barras %	Expansão Prismas %
		Quartz.	Biotita	Felds.	Outros			
65	n. atacada	25,9	4,7	62,5	6,9	77,1	0,39	0,1424
	atacada	14,1	6,4	69,3	10,0	48,5		
	n.atc/atac	0,54	1,36	1,11	1,45	1,59		
57	n. atacada	27,0	2,9	62,7	7,4	65,9	0,39	0,1060
	atacada	18,9	4,5	66,8	9,8	77,7		
	n.atc/atac	0,70	1,55	1,07	1,32	0,85		
56	n. atacada	28,8	2,7	67,6	0,9	74,6	0,22	0,0664
	atacada	19,6	2,0	77,7	0,7	62,5		
	n.atc/atac	0,68	0,74	1,15	0,78	1,19		
66	n. atacada	28,7	1,4	64,8	5,1	70,8	0,21	0,0586
	atacada	18,5	1,9	70,9	8,8	80,4		
	n.atc/atac	0,64	1,36	1,09	1,73	0,88		
63	n. atacada	25,8	8,6	60,1	5,5	72,5	0,15	0,0498
	atacada	18,1	10,2	66,0	14,4	77,9		
	n.atc/atac	0,70	1,19	1,10	2,62	0,93		
68	n. atacada	21,1	10,4	66,6	1,4	67,0	0,10	0,0461
	atacada	14,3	15,5	69	1,3	64,8		
	n.atc/atac	0,68	1,49	1,04	0,93	1,03		
64	n. atacada	25,9	11,3	62,6	0,1	72,9	0,08	0,0453
	atacada	16,5	10,5	72,9	0,1	73,1		
	n.atc/atac	0,64	0,93	1,16	1,00	1,00		
60	n. atacada	28,7	1,4	63,7	6,2	71,7	0,21	0,0360
	atacada	16,1	0,8	73,3	9,8	56,8		
	n.atc/atac	0,56	0,57	1,15	1,58	1,26		
59	n. atacada	15,7	12,7	69,1	2,7	72,9	0,06	0,0334
	atacada	13,2	15,3	68,5	3,0	84,5		
	n.atc/atac	0,84	1,20	0,99	1,11	0,86		
58	n. atacada	19,7	5,6	70,0	4,7	84,9	0,06	0,0315
	atacada	17,2	5,5	72,3	5,0	80,4		
	n.atc/atac	0,87	0,98	1,03	1,06	1,06		
67	n. atacada	22,6	2,7	74,2	0,5	71,1	0,08	0,0314
	atacada	13,0	4,9	80,4	1,7	67,9		
	n.atc/atac	0,58	1,81	1,08	3,40	1,05		
61	n. atacada	25,1	2,8	69,3	2,8	81,6	0,06	0,0260
	atacada	18,7	2,5	78,5	0,2	81,6		
	n.atc/atac	0,75	0,89	1,13	0,07	1,00		
69	n. atacada	31,9	3,2	63,9	1,0	77,0	0,07	0,0250
	atacada	22,5	4,9	71,7	0,9	68,3		
	n.atc/atac	0,71	1,53	1,12	0,90	1,13		
55	n. atacada	13,1	0,7	83,2	3,0	74,8	0,06	0,0220
	atacada	10,4	0,7	84,8	4,1	76,2		
	n.atc/atac	0,79	1,00	1,02	1,37	0,98		
62	n. atacada	21,6	9,9	62,8	5,7	81,9	0,10	0,0120
	atacada	18,4	12,5	69,9	2,2	81,5		
	n.atc/atac	0,85	1,26	1,11	0,39	1,00		

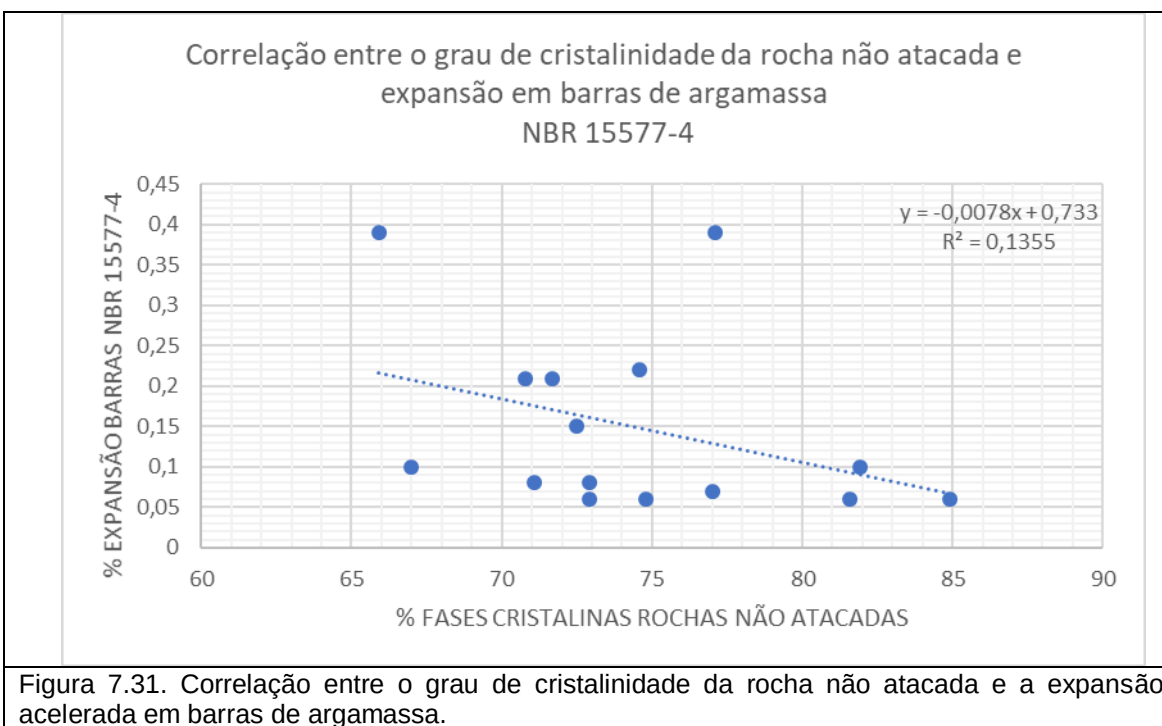
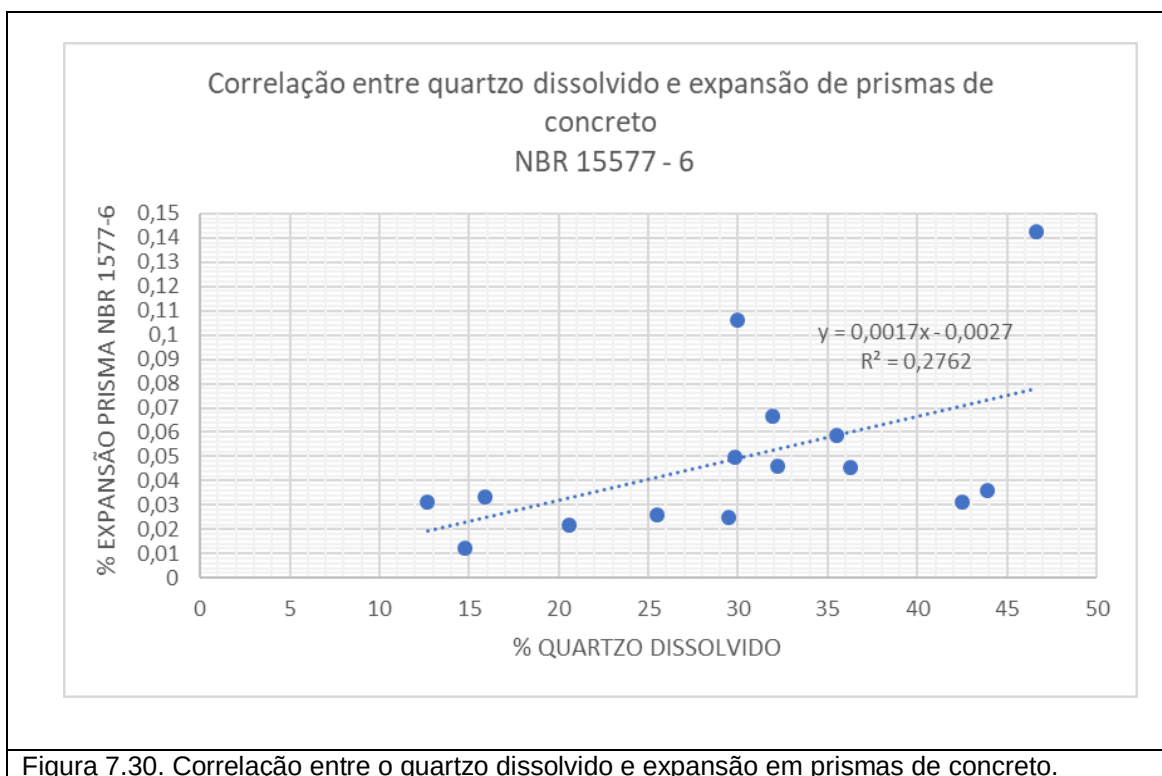
Talvez se a realização do ataque com solução alcalina tivesse sido realizada com os agregados com dimensões bem superiores a utilizada no ensaio a resposta poderia ter sido mais representativa. Os agregados poderiam ser britados para dimensões na ordem de alguns milímetros, atacados em depois cominuídos para dimensões de 325mesh para serem ensaiados no DRX.

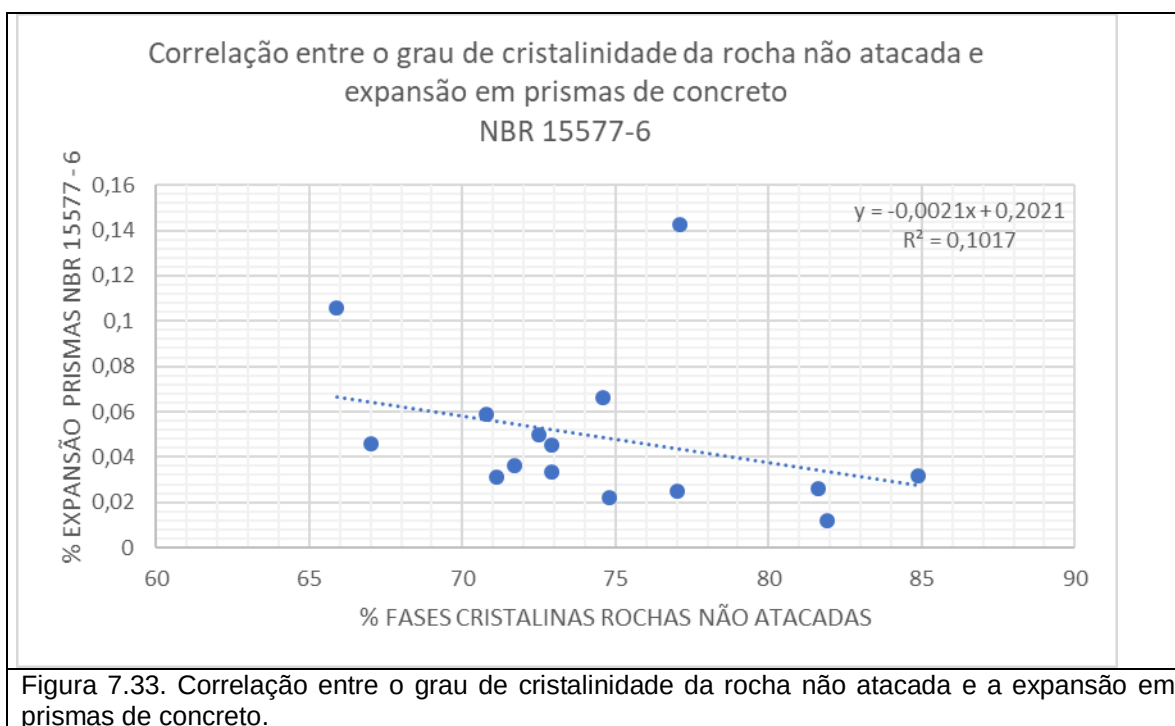
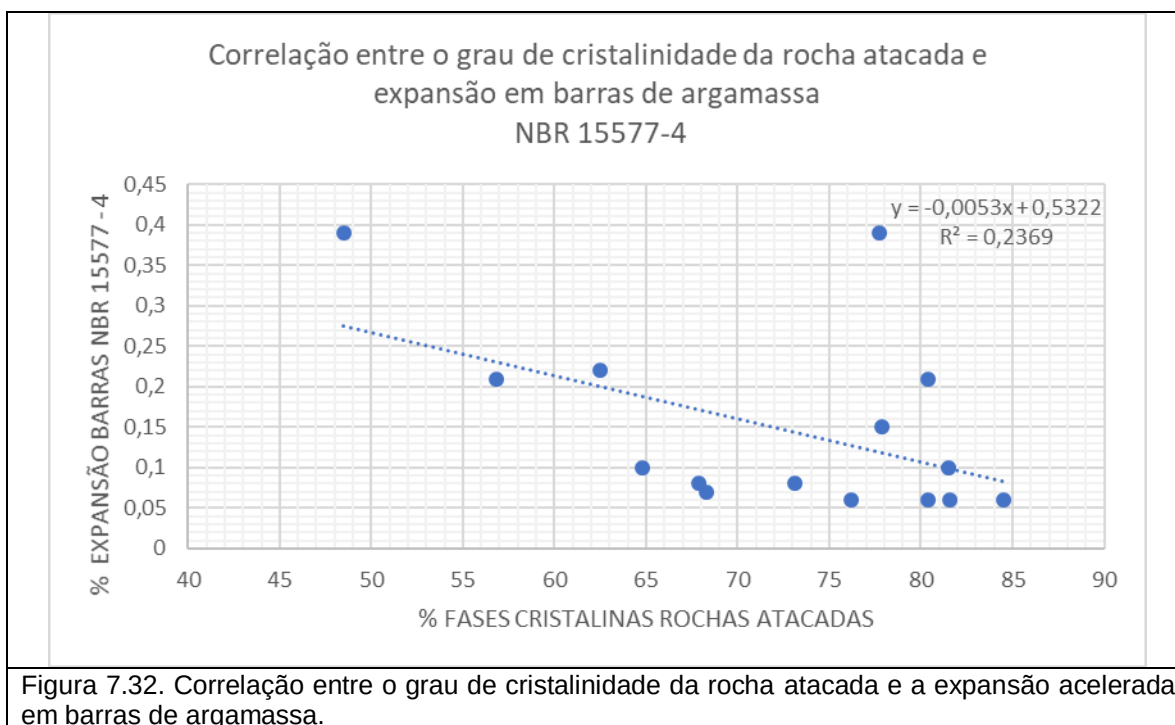


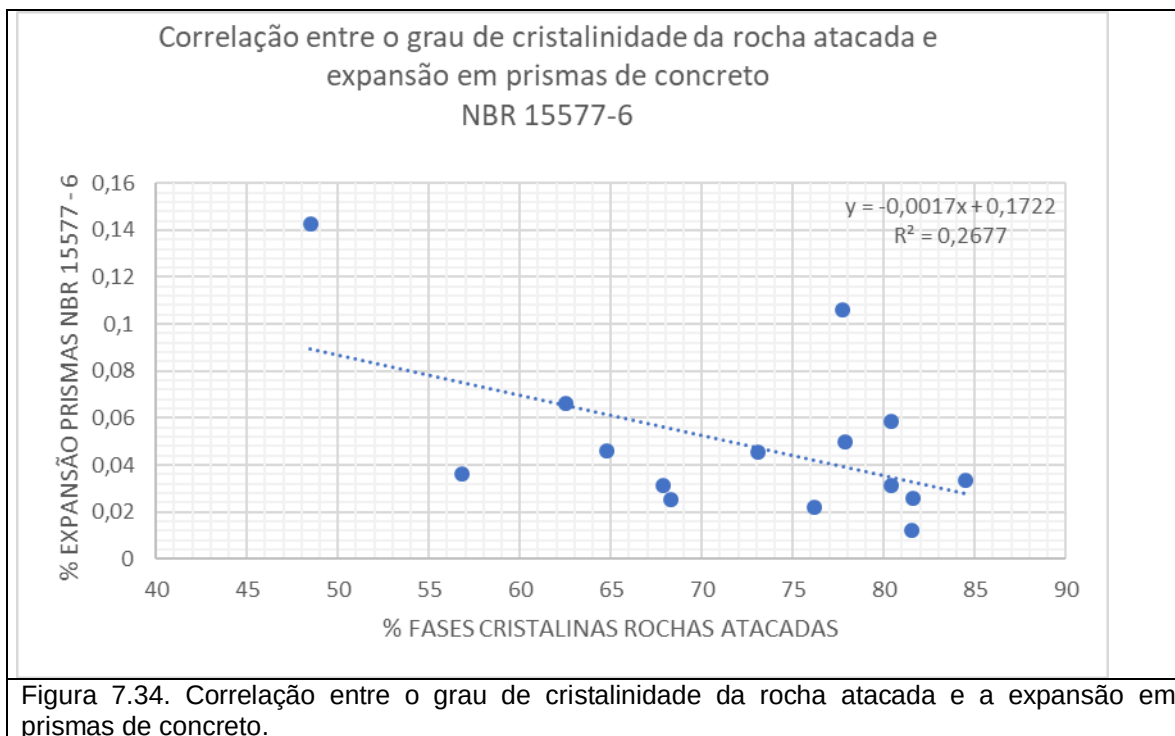
As expansões obtidas nos ensaios normalizados também foram correlacionadas com o grau de cristalinidade obtidos a partir dos difratogramas e do refinamento estrutural através do TOPAS.

Sabe-se que a reatividade potencial de agregados está relacionada a desordem da microestrutura do mineral quartzo que, por sua vez, se reflete no grau de cristalinidade da rocha.

Portanto, procurou-se correlacionar esse grau de cristalinidade, tanto dos agregados “in natura”, quanto das rochas atacadas com solução alcalina, com as expansões obtidas nos ensaios normalizados. Essas correlações estão mostradas nos gráficos das figuras 7.31 a 7.34.







As correlações obtidas entre o grau de cristalinidade, das rochas não atacadas e atacadas com solução alcalina, com relação as expansões obtidas em ensaios normativos também foram muito baixas. Para as rochas não atacadas R2 da correlação linear foi de 0,1355 e 0,1017, respectivamente, para o ensaio acelerado das barras de argamassa e para o ensaio de prisma de concreto.

Por outro lado, com relação as rochas atacadas, apesar da correlação ter sido muito pobre, os valores obtidos para o R^2 foram melhores do que os das rochas não atacadas. Nesses casos, foram obtidos 0,2369 e 0,2677, respectivamente, para ensaio acelerado das barras de argamassa e prismas de concreto.

7.5. Conclusões

- A técnica de ensaio não permite obter uma correlação confiável entre a reatividade potencial do agregado e a dissolução do quartzo, podendo estar correlacionado:
- A cominuição das partículas para realização do ensaio em dimensões bem inferiores as dimensões utilizadas nos agregados para concreto, pode levar a uma mudança microestrutural do quartzo, alterando a sua reatividade;

- A distribuição das fases no interior das partículas dos agregados e seus defeitos (microporos e microfissuras) existentes, que inexiste nas partículas com dimensões inferiores a 325mesh empregadas no ensaio.

8

CAPÍTULO III

**VARIEDADE NA ESTRUTURA DE POROS E
MICROFISSURAÇÃO EM AGREGADOS GRAÚDOS
GRANÍTICOS NO DESENVOLVIMENTO DE RAA**

8.1. Introdução

Nessa etapa do trabalho consistiu em avaliar a influência da estrutura de poros e a microfissuração dos agregados estudados no desenvolvimento da RAA, através de técnicas não convencionais.

8.2. Ensaios realizados

Para essa avaliação foram preparados corpos de prova polidos para serem obtidas imagens no MEV e analisados no MAZE, programa computacional de análise de imagem desenvolvido pela.

8.2.1. Preparação das amostras

As amostras de agregados sofreram processos de corte, embutimento, lixamento e polimentos metalográficos sucessivos. Para tanto foi utilizado um cut-off de precisão, dotado de um disco diamantado de espessura bastante reduzida, para cortar o agregado com uma espessura média de 15mm e, com isso, permitir o paralelismo em uma das faces. Posteriormente o agregado foi embutido à quente com resina fenólica, utilizando uma prensa de embutimento metalográfico.

Após o embutimento uma das faces da amostra passou então por um processo de lixamento com as lixas (#400, #600, #1000 e #1200) seguido de um processo de polimento com pasta diamantada de gramaturas variando de 6 μm a 1/4 μm .

Na etapa de polimento foi utilizado óleo 100% mineral como líquido lubrificante. Após o procedimento de corte, a cada mudança de lixa ou pasta diamantada e no final de toda esta etapa de preparação, as amostras foram submetidas a um banho ultrassônico, por cerca de 6 (seis) minutos, imersas em água destilada, objetivando remover impurezas deixadas por estes procedimentos de modo a impedir contaminações e garantir uma superfície final completamente limpa. A Figura 8.1 ilustra todo o procedimento de preparação das amostras, sendo que por último, as amostras foram acondicionadas em pequenos sacos plásticos e guardadas em dissecador com sílica gel até o momento do ensaio.



Figura 8.1. Etapa de preparação das amostras (Fonte próprio autor – 2019)

8.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica importante que auxilia na investigação e identificações de fases de amostras. Amostras de rochas reativas, ou amostras de laboratório (barras de argamassa) com indícios de expansões causadas pela RAA e que foram previamente submetidas a ensaios para avaliar a reatividade potencial do agregado, podem ser examinadas no MEV (Hasparyk, 1999). Com a identificação das fases das rochas e dos produtos de RAA proveniente das barras de argamassa, pode-se verificar a agressividade da estrutura mediante sua concentração e classificar os vários tipos de materiais neoformados.

Como conhecido pela física, quando o feixe de elétrons incide sobre a amostra, diversos sinais são originados, os principais para análise no MEV são: os elétrons secundários (SE), os elétrons retroespalhados (BSE) e os Raios X., portanto, os principais detectores usados no MEV são:

- Elétrons Secundários (SE)

São os responsáveis pela formação da imagem tridimensional e informações topológicas da superfície da amostra. Neste tipo de análise a amostra ideal é de superfície de fratura, principalmente para a identificação da morfologia dos produtos investigados em cada amostra de rocha.

- Elétrons Retroespalhados (BSE)

Em tecnologia mineral, as imagens mais importantes são as de elétrons retroespalhados (no inglês backscattered electrons - BSD), que são os elétrons do feixe que se chocam com as eletrosferas dos átomos e são arremessadas de volta, e detectados num detector que circunda a abertura inferior da coluna de elétrons. Nestas imagens, o nível de cinza é proporcional ao número de elétrons, e consequentemente ao peso atômico médio em cada pixel da imagem, o que a torna, de maneira indireta, uma imagem composicional, conforme foi visto na Figura 2.3.

Nesse estudo as análises das rochas foram feitas principalmente em superfícies polidas, para assim facilitar as identificações de fases da amostra. Quanto maior for o número atômico médio, mais branco aparece o produto na imagem. Com essa técnica foram geradas diversas imagens da superfície das rochas analisadas buscando identificar as fases presentes, conforme imagem da figura 8.2.

8.2.3. Análise de imagem (Maze)

O MAZE é um sistema computacional desenvolvido pelo projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação P&D+I da CHESF, 2018, que consiste em um pacote tecnológico para identificação de fases em rochas e análise automática de danos em concreto a partir de ensaios não destrutivos e para predição da reação álcali-agregado com base em técnicas de aprendizagem de máquina. O programa foi dividido nos subsistemas ou módulos abaixo:

- i. Base de dados de agregados;
- ii. Análise e segmentação de imagens;
- iii. Redes neurais.

O MAZE foi escrito na linguagem Python e utiliza as seguintes bibliotecas:

- *PyQt5*: Pacote com um framework para a criação de interfaces gráficas;

- *NumPy*: Pacote de computação científica;
- *SciPy*: Pacote de computação científica;
- *Pandas*: Pacote para manipulação e análise de dados;
- *Matplotlib*: Pacote de geração de gráficos;
- *Seaborn*: Pacote de geração de gráficos;
- *OpenCV*: Pacote de visão computacional e processamento digital de imagens;

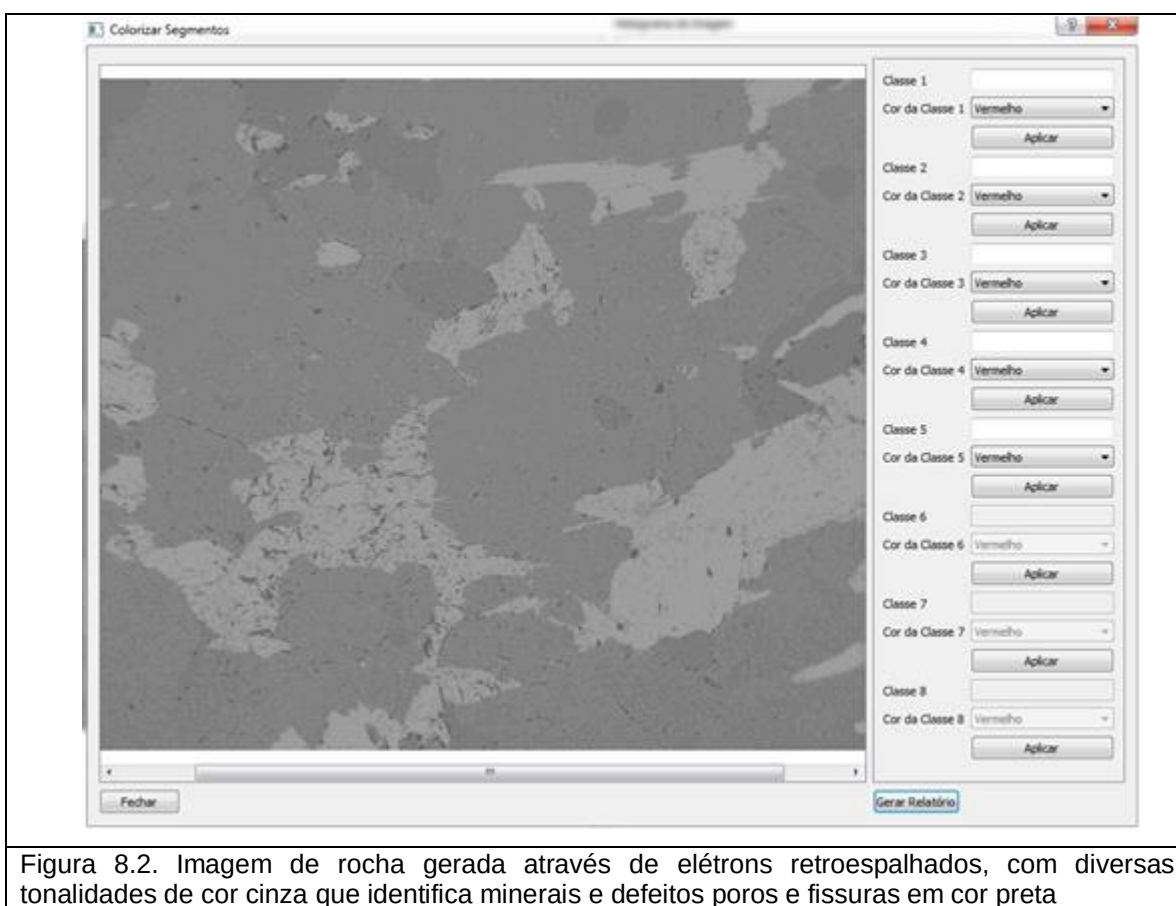


Figura 8.2. Imagem de rocha gerada através de elétrons retroespalhados, com diversas tonalidades de cor cinza que identifica minerais e defeitos poros e fissuras em cor preta

O sistema MAZE é capaz de identificar os padrões de cores de tons cinza presentes nas imagens geradas pelos elétrons retroespalhados do MEV. podendo ser visualizado nas Figura 8.3. Essas variações ocorrem em função da

heterogeneidade da amostra em função de sua formação mineralógica. O botão “Gerar Relatório” mostra a porcentagem de cada classe/fase atribuída à imagem.

Foi definido para uma padronização de cores para diferentes fases com base nos diferentes tons de cinza, que a imagem do MEV nos forneceu para cada amostra. Sendo assim, as fases de quartzo, mica, feldspato, outras fases e defeitos da amostra, foram gerenciadas no processo de colorização através das cores azul, vermelho, ciano, amarelo e preto respectivamente.

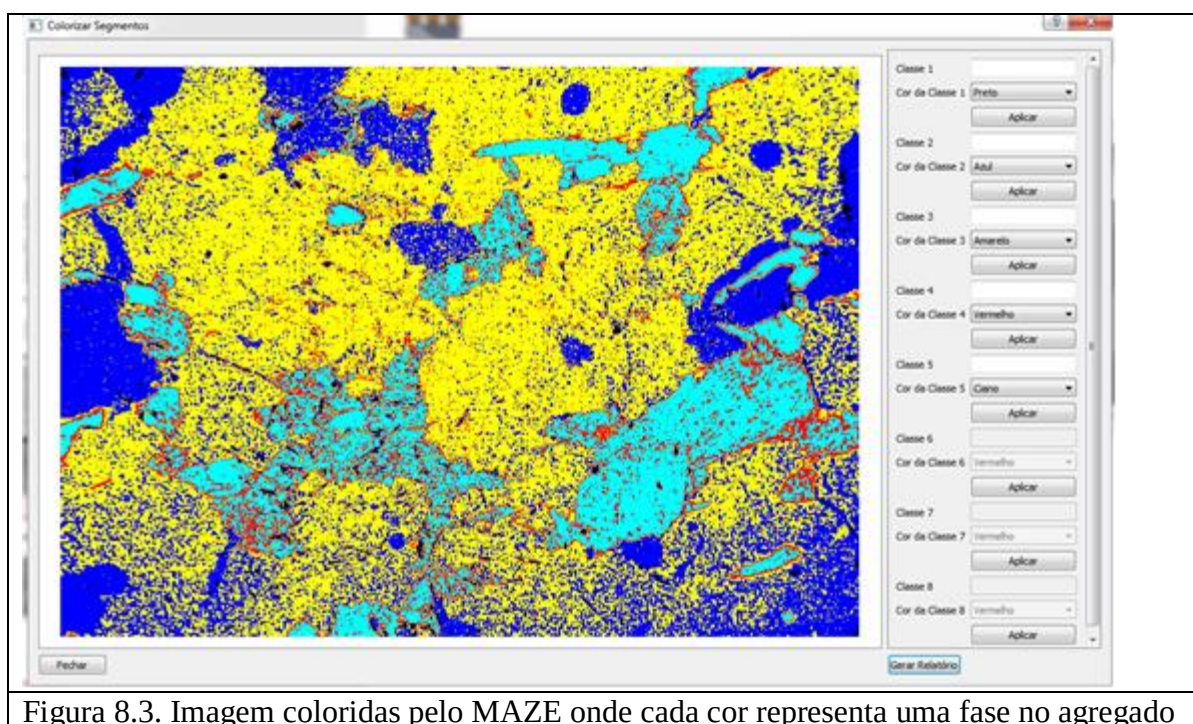


Figura 8.3. Imagem coloridas pelo MAZE onde cada cor representa uma fase no agregado

8.3. Análise dos resultados

A reatividade dos granitos aparenta estar relacionada à variabilidade na distribuição das fases, em especial a disposição do quartzo

Granitos mais reativos aparentam ter ocorrência de veios de quartzo em oposição a outros menos reativos onde o quartzo se dispõe em clusters ou uniformemente distribuídos dentre a fase feldspato, indicada pelo ensaio de cristalografia como menos reativa, conforme pode ser visualizado nas figuras 8.4 a 8.8..

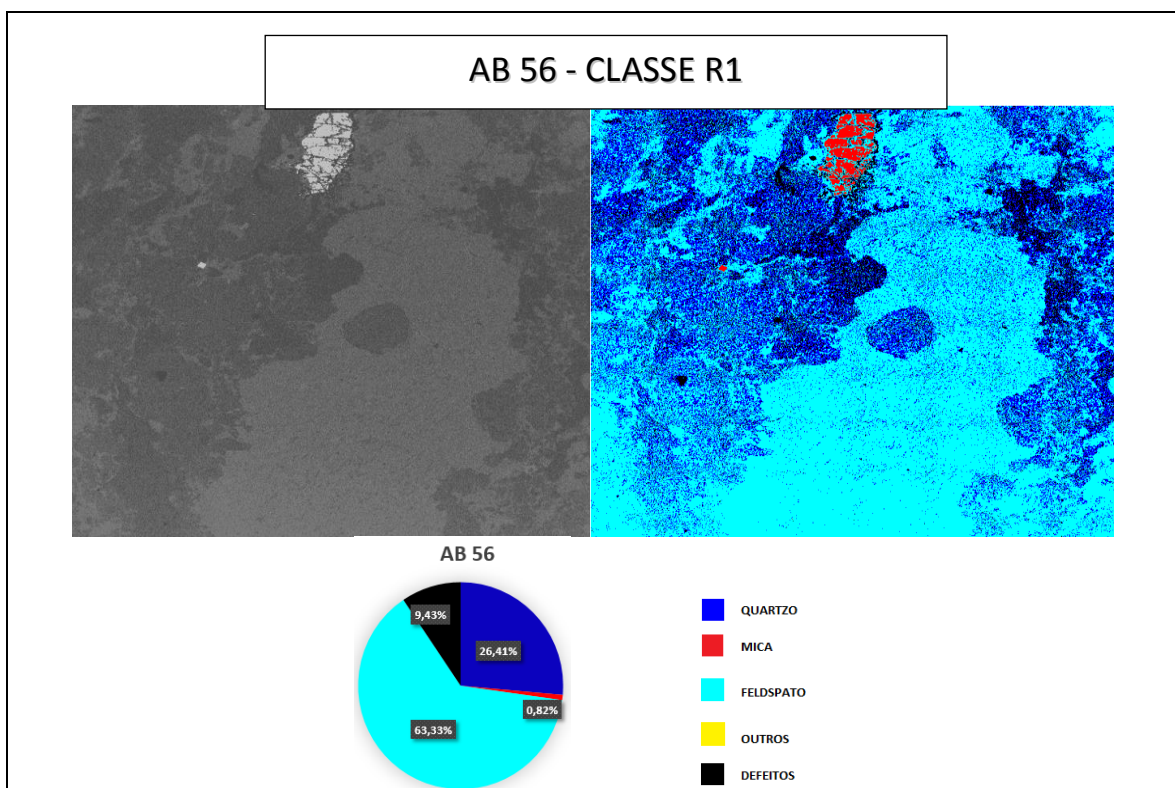
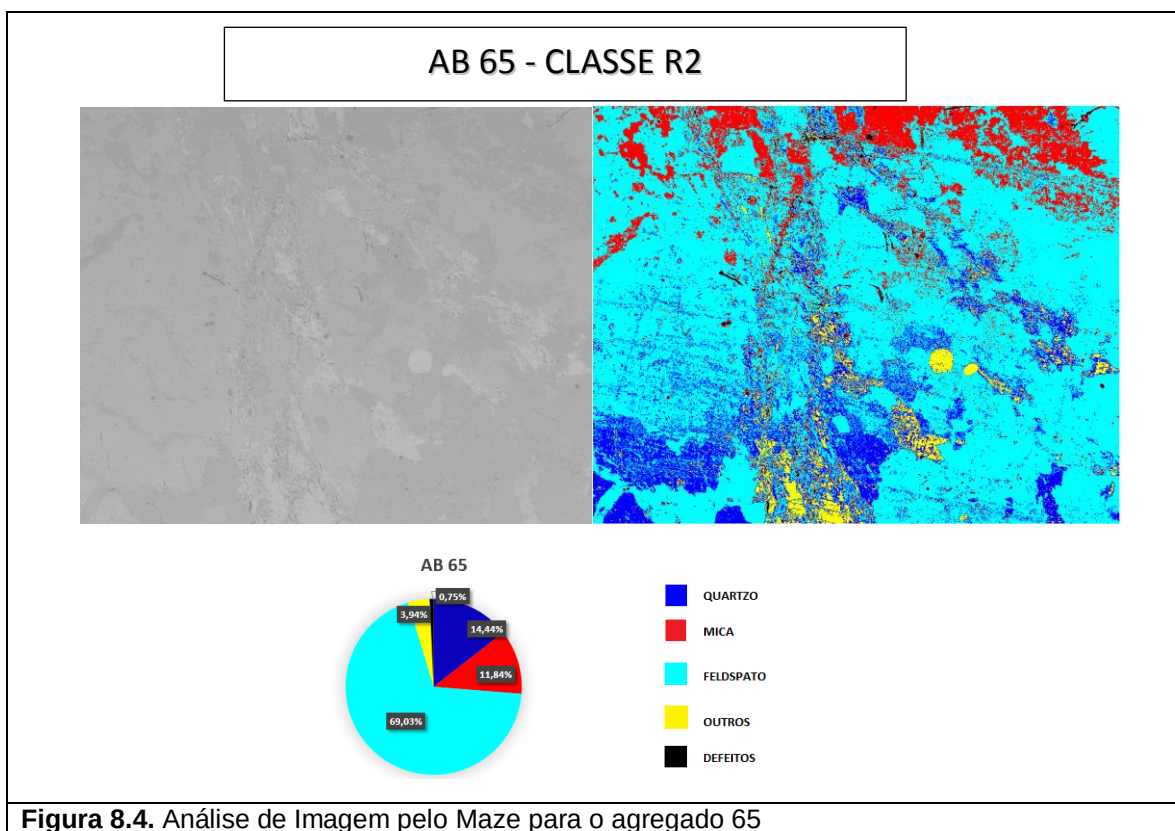


Figura 8.5. Análise de Imagem pelo Maze para o agregado 56

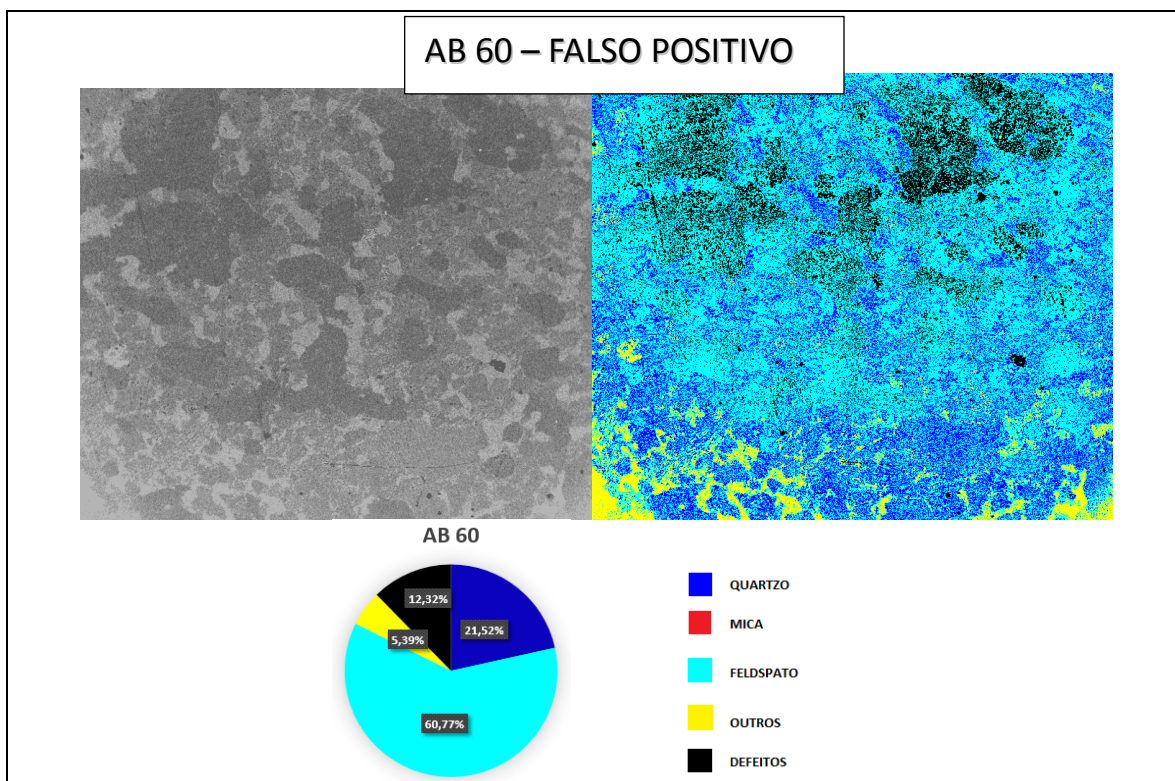


Figura 8.6. Análise de Imagem pelo Maze para o agregado 60

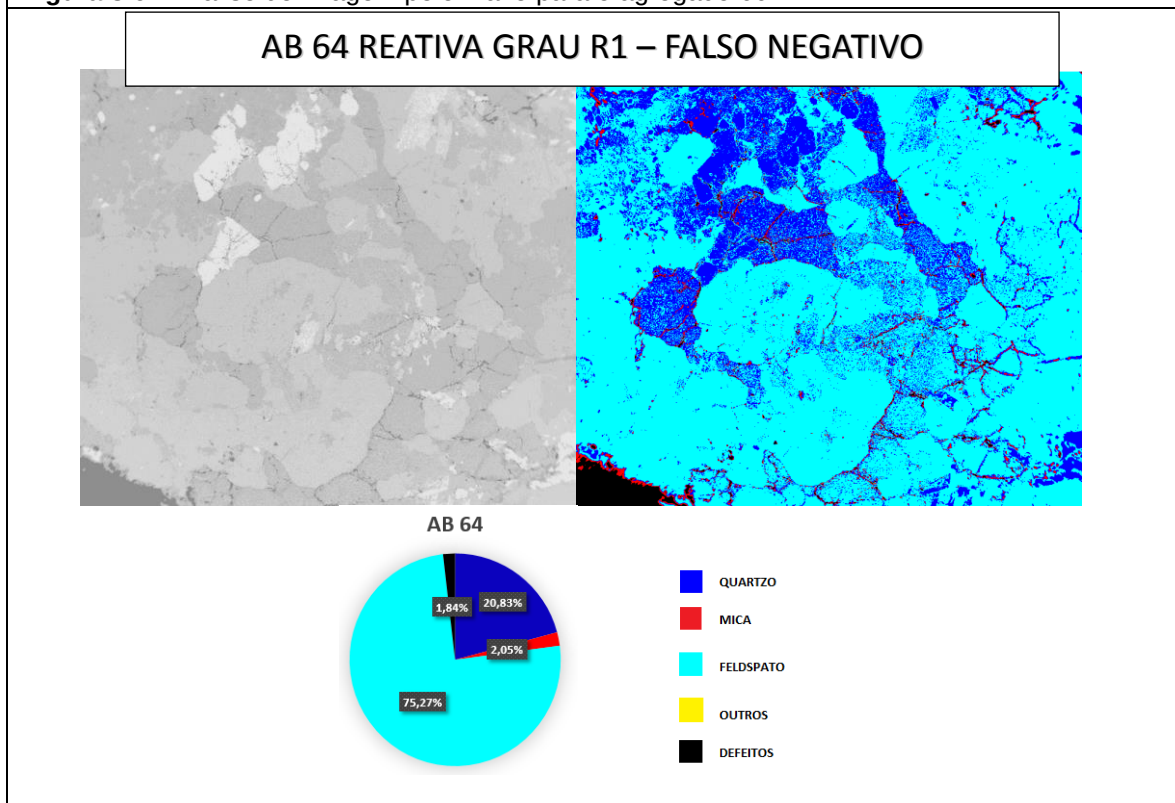
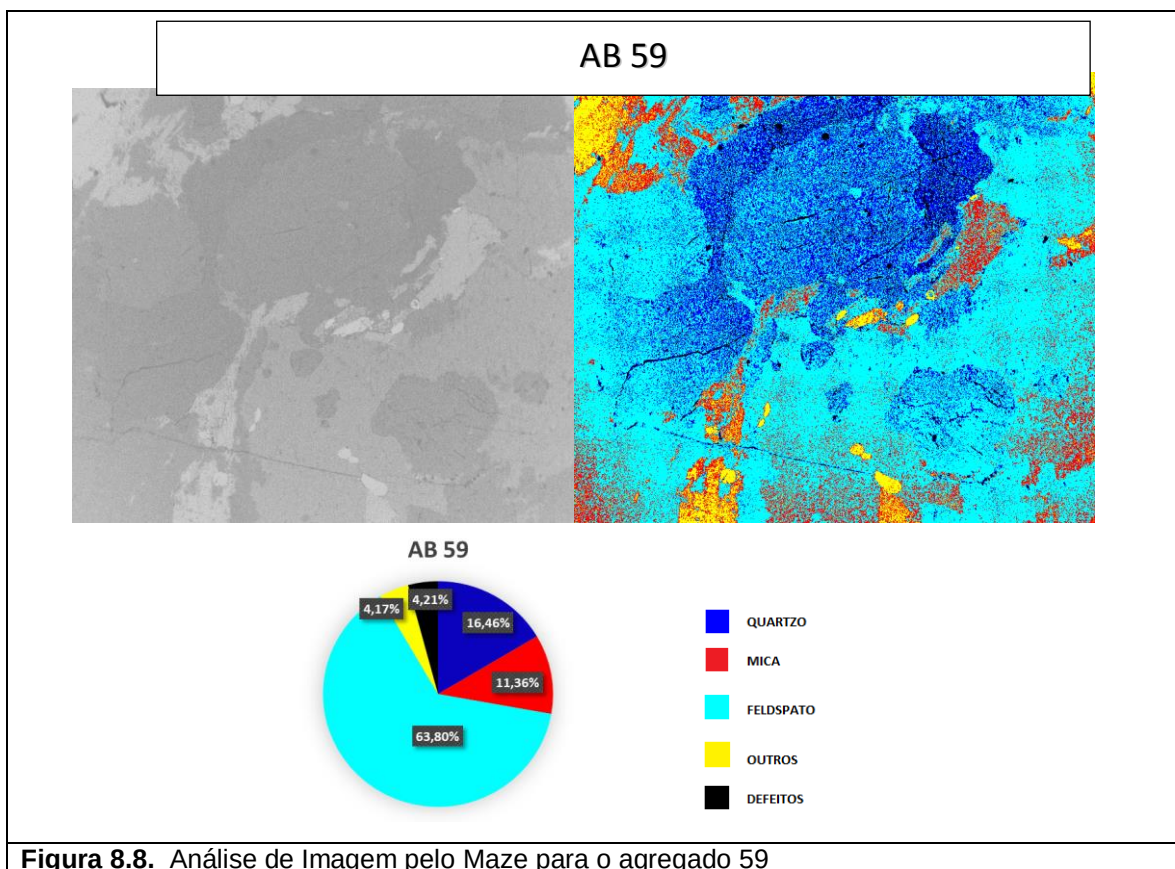


Figura 8.7. Análise de Imagem pelo Maze para o agregado 64



A reatividade dos granitos aparenta estar relacionada à variabilidade na distribuição das fases, em especial a disposição do quartzo

Granitos mais reativos aparentam ter ocorrência de veios de quartzo em oposição a outros menos reativos onde o quartzo se dispõe em clusters ou uniformemente distribuídos dentre a fase feldspato, indicada pelo ensaio de cristalografia como menos reativa.

8.4. Conclusões

- A reatividade dos granitos aparenta estar relacionada à variabilidade na distribuição das fases, em especial a disposição do quartzo
- Granitos mais reativos aparentam ter ocorrência de veios de quartzo em oposição a outros menos reativos onde o quartzo se dispõe em clusters ou

uniformemente distribuídos dentre a fase feldspato, indicada pelo ensaio de cristalografia como menos reativa.

9. Conclusões Gerais

ENSAIOS TECNOLÓGICOS:

A maioria dos granitos da região estudada levam a resultados predominantemente de falsos negativos, indicando a necessidade de haver novas abordagens experimentais.

VARIABILIDADE QUÍMICA E CRISTALOGRAFICA: :

Há evidência para concluir que a distribuição das fases predomina sobre a composição química, destacando-se o papel da estrutura do quartzo que foi a fase mais reativa ao mesmo tempo que sofreu maiores alterações cristalográficas.

MICROESTRUTURA DOS GRANITOS:

A ocorrência da fase de quartzo nas microestruturas dos granitos indica que a aparente divergência entre os ensaios de agregados pulverizados e britados reside na disposição das fases reativas e defeitos nos agregados estudados mais predominantemente do que a própria composição química.