

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA, GEOCIÊNCIAS E SAÚDE COLETIVA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
MONOGRAFIA FINAL

JAQUELINE APARECIDA GIMENES ALVES

**EVOLUÇÃO TEXTURAL E MINERALÓGICA DE CONCRETOS SUBMETIDOS A
DIFERENTES ESTÁGIOS DE DEGRADAÇÃO DE REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO
E FORMAÇÃO DE ETRINGITA TARDIA**

Monte Carmelo - MG

2025

JAQUELINE APARECIDA GIMENES ALVES

**EVOLUÇÃO TEXTURAL E MINERALÓGICA DE CONCRETOS SUBMETIDOS A
DIFERENTES ESTÁGIOS DE REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO E CRESCIMENTO
DE ETRINGITA TARDIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geografia, Geociências e Saúde
Coletiva da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito para a obtenção do
título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Filipe Goulart Lima

Monte Carmelo - MG

2024

JAQUELINE APARECIDA GIMENES ALVES

EVOLUÇÃO TEXTURAL E MINERALÓGICA DE CONCRETOS SUBMETIDOS A
DIFERENTES ESTÁGIOS DE REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO E CRESCIMENTO DE
ETRINGITA TARDIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geografia, Geociências e Saúde
Coletiva da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito para a obtenção do
título de Bacharel em Geologia.

Monte Carmelo, 22 de novembro de 2024

Banca Examinadora

Filipe Goulart Lima (Orientador)

Universidade Federal de Uberlândia

Mestre Laisy Meurer Perin

Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Ítalo Lopes de Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Filipe Goulart Lima pela orientação, paciência, confiança e incentivo, que foram fundamentais na elaboração deste trabalho.

Ao grupo de pesquisa DurAE- UFU e ao professor Dr. Antônio Carlos dos Santos pela colaboração e aprendizado que foram de grande importância, pela bolsa de pesquisa nº 23117.090755/2019-02, financiada pelo projeto FECIV.VALE.0001. A mestre Laisy Meurer Perin pela fabricação dos corpos de prova de concreto.

Ao técnico Dr. Ítalo Lopes de Oliveira, pela ajuda na preparação das amostras em laboratório.

Ao João Pedro, meu namorado pelo companheirismo, parceria e por toda ajuda durante o curso, por me apoiar e acreditar em mim em todos os momentos, e por tornar os dias difíceis mais leves e felizes. As amizades que cultivei durante esse tempo e principalmente a Paula Cristina e Letícia Lopes, agradeço por tudo, vocês foram de grande importância para a minha formação.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar a evolução textural e mineralógica de 29 corpos de prova de concreto. Estes corpos de prova foram estimulados a processos de deterioração, do tipo a reação álcali-agregado e formação de etringita tardia durante intervalos de tempo de 28 e 200 dias. A caracterização mineralógica tem como objetivo inferir quais minerais participam das reações, bem como a evolução da composição modal das amostras em relação ao tempo. A análise textural, realizada nos mesmos corpos de prova aplicando o método do *Damage Rating Index* (DRI), permitiu avaliar e identificar o grau de deterioração do concreto e as patologias atuantes, por meio da quantificação das fraturas. O estudo foi dividido nas etapas: revisão bibliográfica (1), aplicação do DRI (2), petrografia (3) análise e discussão dos dados (4). A análise textural revelou o predomínio de fraturas sem preenchimento nos agregados graúdos, nos corpos de prova de 28 dias para a RAA. Já no período de 200 dias, fraturas preenchidas pelo produto da reação nos agregados graúdos são formadas, atingindo uma expansão de 0,06%. As mesmas características texturais foram observadas nos corpos de prova submetidos a formação de etringita tardia com 28 dias, encontradas principalmente fraturas no agregado pois a reação não ocorre no tempo estipulado, mas com 200 dias as fraturas se desenvolvem na pasta, chegando a uma expansão de 0,03%; porém ainda com predomínio de fraturas no agregado, destaca-se que essas fraturas não são decorrentes da formação da etringita tardia. A partir da análise petrográfica, foi possível verificar a presença de minerais deletérios como quartzo e material devitrificado, bem como os produtos das reações com 200 dias. Diante disso, foi discutido que a reação álcali agregado ocorre mais efetivamente do que a patologia de DEF, pois os valores de DRI com 200 dias encontrados foi de no mínimo 219, enquanto que o DEF atingiu seu máximo em 154,75; as amostras de RAA exibem um valor de DRI médio de 225,75 com 200 dias, e as amostras de RR 238,5, mostrando valores similares de DRI, apesar dos corpos de prova de RR não terem sido fabricados com o intuito da reação ocorrer de forma acelerada, indicando alta reatividade do material. Para a DEF o tratamento térmico inicial se mostrou importante, pois verificou-se uma diferença efetiva nos valores de DRI médio (148), quando comparado aos valores de RI de 108,5 em 200 dias. Foi possível também definir potencial reativo para a manifestação patológica de RAA até nos concretos da DEF, devido a presença de minerais deletérios que podem ajudar a reação. Desta forma foi possível identificar as fases minerais que contribuem para as reações, bem como a relação modal dos corpos que prova que não mostram uma mudança efetiva nos agregados graúdos e na pasta.

Palavras-chave: Petrografia; Reação Álcali-Agregado, Formação de Etringita Tardia, *Damage Rating Index (DRI)*;

ABSTRACT

The present study aimed to study the textural and mineralogical evolution of 29 concrete specimens. These specimens were subjected to deterioration processes, such as alkali-aggregate reaction and late ettringite formation, for periods of 28 and 200 days. The mineralogical characterization aimed to infer which minerals participated in the reactions, as well as the evolution of the modal composition of the samples in relation to time. The textural analysis, performed on the same specimens applying the Damage Rating Index (DRI) method, allowed the evaluation and identification of the degree of concrete deterioration and the pathologies involved, by quantifying the fractures. The study was divided into the following stages: literature review (1), application of the DRI (2), petrography (3) and analysis and discussion of the data (4). The textural analysis revealed the predominance of unfilled fractures in the coarse aggregates, in the 28-day specimens for the AAR. In the 200-day period, fractures filled by the reaction product in the coarse aggregates are formed, reaching an expansion of 0.06%. The same textural characteristics were observed in the test specimens subjected to late ettringite formation at 28 days, mainly fractures found in the aggregate because the reaction does not occur in the stipulated time, but at 200 days the fractures develop in the paste, reaching an expansion of 0.03%; however, with a predominance of fractures in the aggregate, it is noteworthy that these fractures are not due to the formation of late ettringite. From the petrographic analysis, it was possible to verify the presence of deleterious minerals such as quartz and devitrified material, as well as the reaction products at 200 days. In view of this, it was argued that the alkali-aggregate reaction occurs more effectively than the DEF pathology, since the DRI values found at 200 days were at least 219, while the DEF reached its maximum at 154.75; The RAA samples exhibited an average DRI value of 225.75 at 200 days, and the RR samples 238.5, showing similar DRI values, although the RR specimens were not manufactured with the intention of the reaction occurring in an accelerated manner, indicating high reactivity of the material. For DEF, the initial heat treatment proved to be important, since an effective difference was observed in the average DRI values (148), when compared to the RI values of 108.5 at 200 days. It was also possible to define the reactive potential for the pathological manifestation of RAA even in DEF concretes, due to the presence of deleterious minerals that can help the reaction. In this way, it was possible to identify the mineral phases

that contribute to the reactions, as well as the modal relationship of the specimens that do not show an effective change in the coarse aggregates and in the paste.

Keywords: Petrography; Alkali-Aggregate Reaction, Late Ettringite Formation, Damage Rating Index (DRI).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Condições de temperatura e umidade dos corpos de prova de DEF.....	18
Figura 2- Quadrícula de 1cm ² utilizada na descrição das feições.	19
Figura 3-Imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) do gel de sílica. a) Fissuras preenchidas pelo gel expansivo e (b) gel gretado.....	20
Figura 4. Ettringita primária e secundária. a) Ettringita encontrada na região de Kuruman (África do Sul); b) cristais aciculares de ettringita primária em concreto no microscópio óptico de varredura (MEV) c, d) Fotomicrografias de concretos com ettringita tardia.	21
Figura 5- Fotomicrografias ilustrando os tipos de fraturas em corpos de prova de concreto...22	
Figura 6. Contexto geotectônico da Província Borborema.....	23
Figura 7. Principais fraturas nos corpos de prova de 28 dias (A e B) e 200 dias (C e D) submetidos a RAA. A) Fratura no agregado graúdo (CCA). B) Fraturas no agregado graúdo (CCA) e na pasta (CCP). C e D) Fratura no agregado graúdo preenchida pelo produto da reação (OCAG). (COLOCAR ESCALA EM MM)	27
Figura 8. Principais fraturas nos corpos de prova de 28 e 200 dias submetidos a DEF. A) Fraturas na pasta (CCP) nos corpos de 28 dias. B) Fratura no agregado graúdo (CCA) nos corpos de prova de 28 dias. C) Fratura no agregado graúdo preenchida pelo produto da reação (OCAG) nos corpos de prova de 200 dias. D) Fratura no agregado graúdo preenchida pelo produto da reação (OCAG), fratura no agregado graúdo (CCA), fraturas na pasta (CCP) nos corpos de prova de 200 dias.....	29
Figura 9. Principais fraturas nos corpos de prova de D+R com 28 e 200 dias. A) Fratura no agregado graúdo (CCA) de 28 dias; B) Fratura no agregado graúdo (CCA) e fraturas na pasta (CCP) nos corpos de 28 dias; C) Fratura no agregado graúdo (CCA) e fraturas na pasta (CCP) nos corpos de 200 dias. B) Fratura no agregado graúdo (CCA) e Fratura no agregado graúdo preenchido pelo produto da reação (OCAG) com 200 dias.....	31
Figura 10. Principais fraturas nos corpos de prova de RR com 28 e 200 dias. A) Fratura no agregado graúdo (CCA) e fraturas na pasta (CCP) nos corpos de 28 dias. B) Fratura no agregado graúdo (CCA) nos corpos de prova de 28 dias. C) Fratura no agregado graúdo preenchida pelo	

produto da reação (OCAG) e fratura na pasta preenchida pelo produto da reação (CCPG) nos corpos de prova de 200 dias.	33
Figura 11. Principais fraturas nos corpos de prova de RI com 28 e 200 dias.....	35
Figura 12- Fotos exemplificando a heterogeneidade dos agregados graúdos dos corpos de prova submetidos à reação ácalis-agregado (RAA), à combinação reação ácalis-agregado mais formação de etringita tardia (D +R) e os referenciais reativos (RR).....	36
Figura 13- Fotomicrografias das petrografias dos corpos de prova de concreto. A) Agregado de gnaisse milonítico visto em polarizadores cruzados. B) Agregado de gnaisse protomilonítico visto em nicóis cruzados. C) Agregado de biotita-actinolita xisto visto em polarizadores plano-paralelos. D) Agregado de biotita-quartzo xisto com detalhe para fratura preenchida visto em polarizadores plano-paralelos. E) Agregado de hornblenda gnaisse visto em polarizadores plano-paralelos. F) Pasta de cimento visto em polarizadores plano-paralelos. Kfs= Feldspato; Bt= Biotita; Qz= Quartz; Hbl= Hornblenda; Ttn= Titanita; Rx1= Rocha indefinida 1; Act= Actinolita; Gth= Goethita.	40
Figura 14- Fotomicrografias das petrografias dos corpos de prova de concreto. A) Basalto “claro” visto em nicóis cruzados. B) Basalto “escuro” visto em nicóis cruzados. C) Detalhe da massa de celadonita ao redor das amigdalas visto em polarizadores plano-paralelos. D) Detalhe para o material isotrópico na interface agregado/pasta visto em polarizadores plano-paralelos. E) Detalhe para o material fibroso e indefinido do agregado, visto em polarizadores plano-paralelos. F) Detalhe da pasta de cimento visto em polarizadores plano-paralelos. Pl= Plagioclásio; Cel= Celadonita; Px= Piroxênio; Qz= Quartz; Argi= Argilo minerais; Gth= Goethita; Ms= Muscovita.	43
Figura 15- Fotomicrografias das petrografias dos corpos de prova de concreto. A) Agregado de anfibolito cisalhado visto em polarizadores cruzados. B) Gnaisse milonítico visto em polarizadores cruzados. C) Gnaisse protomilonítico visto em polarizadores cruzados. D) Agregado de biotita xisto visto em polarizadores cruzados. E) Detalhe para fratura preenchida no agregado de biotita xisto. F) Pasta vista em polarizadores plano-paralelos. Kfs= Feldspato; Act= Actinolita; Bt= Biotita; Qz= Quartz; Gth= Goethita.	47
Figura 16- Fotomicrografias das petrografias dos corpos de prova de concreto. A) Agregado de epidoto-biotita xisto visto em polarizadores cruzados. B) Agregado de quartzito isotrópico visto em polarizadores cruzados. C) Gnaisse milonítico visto em polarizadores cruzados. D) Gnaisse protomilonítico visto em polarizadores cruzados. E) Muscovita-quartz xisto em nicóis cruzados. F) Detalhe da fratura preenchida por gel de sílica no agregado de gnaisse protomilonítico visto em polarizadores plano-paralelos. G) Biotita-actinolita xisto visto em	

polarizadores plano-paralelos. H) Pasta de cimento visto em luz natural. Ep= Epidoto; Bt= Biotita; Qz= Quartzo; Kfs= Feldspato; Rx= Rocha indefinida; Ms= Muscovita; Act= Actinolita;	51
Figura 17- A) Basalto “claro” visto em polarizadores cruzados. B) Basalto “escuro” visto em polarizadores cruzados. C) Detalhe para o volume de argilo minerais na lâmina em polarizadores plano-paralelos. D) Detalhe para um volume maior de celadonita na lâmina em polarizadores cruzados. E e F) Pasta de cimento em polarizadores plano-paralelos e polarizadores cruzados respectivamente. Pl= Plagioclásio; Cel= Celadonita; Px= Piroxênio; Gth= Goethita; Argi= Argilo minerais; Qz= Quartzo;	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de fraturas, siglas e fatores de ponderação.....	21
Tabela 2 - Identificação das amostras pela manifestação patológica, ID, rocha, fraturas totais, dias submetidos as reações e valor de DRI total em cada amostra (A, B e C)	24
Tabela 3 -Relação do tipo de patologia com os códigos adotados neste trabalho.....	35
Tabela 4- Comparaçao dos valores de DRI de RAA e RR com 28 e 200 dias.....	58

LISTA DE QUADROS

- Quadro -Composição modal dos agregados da amostra JGA-04. Kfs = Feldspato, Bt = Biotita, Hbl= Hornblenda, Ep= Epidoto, Ms = Muscovita, Ttn = Titanita, Op= Opaco, Qz = Quartzo....36
- Quadro -Composição modal dos agregados da amostra JGA-20. Kfs = Feldspato, Bt = Biotita, Hbl= Hornblenda, Ep= Epidoto, Ms= Muscovita, Ttn= Titanita, Op= Opaco, Qz= Quartzo....36
- Quadro -Composição modal dos agregados da amostra JGA-01. Aug = Augita, Pl = Plagioclásio, Op = Opacos, Cel = Celadonita, Argi = Argilo Minerais.....40
- Quadro -Composição modal dos agregados da amostra JGA-16. Aug = Augita, Pl = Plagioclásio, Op = Opacos, Cel = Celadonita, Argi = Argilo Minerais.....40
- Quadro -Composição modal dos agregados da amostra JGA-14. Kfs = Feldspato, Act= Actinolita, Bt = Biotita, Ms = Muscovita, Ep = Epidoto, Op = Opaco, Qz = Quartzo.....43
- Quadro -Composição modal dos agregados da amostra JGA-28. Kfs = Feldspato, Act= Actinolita, Bt = Biotita, Ms = Muscovita, Ep = Epidoto, Op = Opaco, Qz = Quartzo.....43
- Quadro - Composição modal dos agregados da amostra JGA-09. Kfs = Feldspato, Act= Actinolita, Bt = Biotita, Ms = Muscovita, Ep = Epidoto, Op = Opaco, Qz = Quartzo.....47
- Quadro -Composição modal dos agregados da amostra JGA-22. Kfs = Feldspato, Act= Actinolita, Bt = Biotita, Ms = Muscovita, Ep = Epidoto, Op = Opaco, Qz = Quartzo.....48
- Quadro -Composição modal dos agregados da amostra JGA-11. Aug = Augita, Pl = Plagioclásio, Op= Opacos, Cel = Celadonita, Argi = Argilo Minerais.....51
- Quadro -Composição modal dos agregados da amostra JGA-25. Aug = Augita, Pl = Plagioclásio, Op= Opacos, Cel = Celadonita, Argi = Argilo Minerais.....52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico - Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova submetido a reação álcali agregado.....	25
Gráfico - Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova submetido a formação de etringita tardia.....	27
Gráfico -Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova submetido a reação álcali agregado mais formação de etringita tardia.....	29
Gráfico -Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova de referência para a reação álcali agregado.....	31
Gráfico -Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova de referência para a formação de etringita tardia.....	33
Gráfico - Quantidade geral de fraturas em todos os corpos de prova e manifestações patológicas.....	56
Gráfico - Valores de DRI gerais em todos os corpos de prova e manifestações patológicas....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DRI	<i>Damage Rating Index</i>
RAA	Reação Álcali Agregado
RAS	Reação Álcali Sílica
RAC	Reação Álcali Carbonato
DEF	Formação de Etringita Tardia
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Ms	Muscovita
Kfs	K-feldspato
Bt	Biotita
Op	Opaco
Aug	Augita
Pl	Plagioclásio
Cel	Celadonita
Argi	Argilominerais
Rx	Rocha indefinida
Act	Actinolita
Qz	Quartzo
Ep	Epidoto
Gth	Goethita
Hbl	Hornblendita
Ttn	Titanita
Rx1	Rocha indefinida 1
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

RI	Referência Inerte
RR	Referência Reativa
DEF+RAA	Formação de Etringita Tardia + Reação Álcali Agregado
CCA	Fratura no Agregado Graúdo
OCA	Fratura Aberta no Agregado Graúdo
OCAG	Fratura Preenchida pelo Produto da Reação
CAD	Agregado Graúdo com Perda de Adesão com a Pasta
DAP	Partícula do Agregado Corroído ou Desagregado
CCP	Fratura na pasta de cimento
CCPG	Fratura na Pasta Preenchida pelo Produto da Reação
Ett	Etringita

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
4.1 Reação álcali agregado (RAA).....	18
4.2 Formação de etringita tardia (DEF).....	19
4.3 Damage Rating Index (DRI).....	20
5. CONTEXTO GEOLÓGICO DOS AGREGADOS GRAÚDOS.....	22
5.1 Migmatitos do Complexo Belém de São Francisco.....	22
5.2 Basaltos da Formação Serra Geral.....	24
6. RESULTADOS.....	24
6.1 Análise Textural/DRI.....	25
6.1.1 Reação Álcali Agregado.....	25
6.1.2 Formação de Etringita Tardia.....	27
6.1.3 Formação de Etringita Tardia + Reação Álcali Agregado.....	29
6.1.4 Referência Reativa.....	31
6.1.5 Referência Inerte.....	33
6.2 Análise Mineralógica.....	35
6.2.1 Petrografia de Reação Álcali Agregado.....	36
6.2.2 Petrografia de Formação de Etringita Tardia.....	41
6.2.3 Petrografia de Formação de Etringita Tardia + Reação Álcali Agregado.....	44
6.2.4 Petrografia de Referência Reativa.....	48
6.2.5 Petrografia de Referência Inerte.....	52
7. DISCUSSÃO.....	56
7.1 Evolução Textural.....	56
7.2 Evolução Mineralógica.....	59
8. CONCLUSÕES.....	60
9. REFERÊNCIAS.....	62

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto com o passar do tempo estão suscetíveis a desenvolverem manifestações patológicas, algumas dessas manifestações são caracterizadas por reações que geram produtos expansivos que podem fragmentar o concreto quando submetidos a fatores como temperaturas superiores a 60° C e umidade elevada. Essas manifestações deterioram e prejudicam as propriedades do concreto e suas funções devido a formação de fraturas e consequentemente aumentando sua permeabilidade. Quando não tratadas e/ou prevenidas as manifestações patológicas no concreto são capazes de comprometer a estabilidade e ocasionar riscos as estruturas aos quais foram aplicados, podendo gerar acidentes estruturais (FELTEN *et al.* 2013).

O DRI (*Damage rating index*) é o método pelo qual é obtido um índice de classificação de dano, ou seja, um indicativo do quanto o concreto foi afetado pelas manifestações patológicas. O cálculo do DRI tem o objetivo de avaliar as características da deterioração e estimar as condições dos concretos afetados. É um método de análise textural semiquantitativo proposto por Grattan-Bellew em 2006 para analisar a reação álcali-agregado (RAA). Posteriormente Villeneuve e Fournier (2012) adaptaram o método para a avaliar outros mecanismos de deterioração como a formação de etringita tardia (DEF).

As manifestações patológicas de concretos também podem ser analisadas por meio de lâminas petrográficas, permitindo observar detalhadamente as reações, identificar em micro-escala as rochas que constituem os agregados, os minerais que participam das reações, bem como as texturas e as estruturas geradas pelas manifestações patológicas. Além de determinar se há potencial reativo com base na assembleia mineralógica e analisar a estrutura dos produtos dessas reações.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo analisar e caracterizar a textura e mineralogia de corpos de prova de concreto confeccionados em laboratório e estimulados a diferentes estágios de evolução dos processos de RAA e DEF. Desta forma, tem-se como objetivo específico:

- Caracterizar a composição modal do concreto e suas fraturas em relação ao tempo em que os corpos de prova foram submetidos as reações de RAA.
- Quantificar os dados gerados por diferentes mecanismos expansivos no concreto por meio da técnica de Damage Rating Index.

- Identificar quais fases minerais contribuem para o desenvolvimento das manifestações patologias;

A partir disso, foi feito o tratamento dos dados obtidos, comparando o grau de evolução mineralógica e textural dos concretos ao longo do tempo, além de realizar uma comparação com a literatura. Também foram gerados gráficos com os valores de DRI com base na porcentagem de expansão.

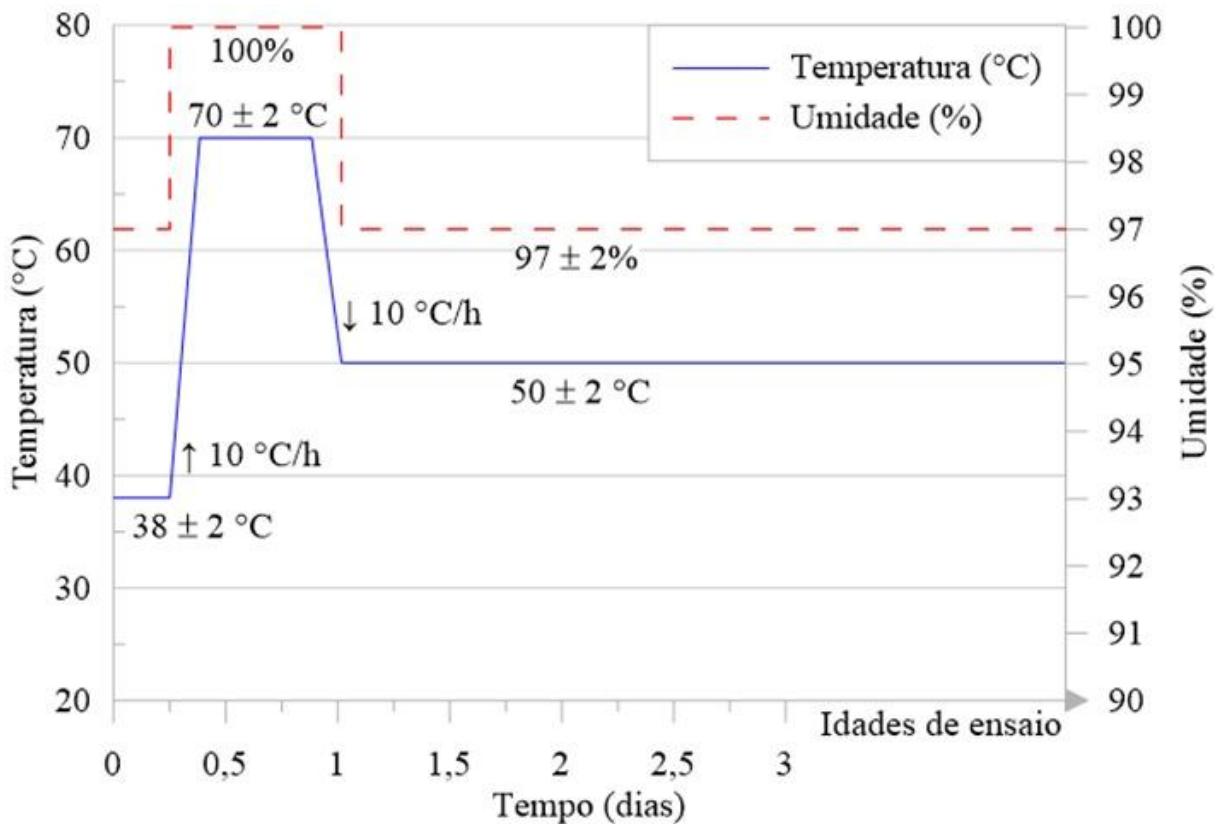
3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho adota nomenclaturas usualmente utilizadas por outros estudos sobre o assunto (SANCHEZ 2015; POOLE 2016). As abreviaturas dos minerais seguem as recomendações da Associação Mineralógica Internacional (WARR 2021).

Na etapa inicial do estudo foi realizado o levantamento bibliográfico sobre as manifestações patológicas do tipo RAA e DEF, bem como as características mineralógicas e texturais de concretos submetidos a estes processos.

Na etapa seguinte os corpos de prova foram confeccionados no laboratório de estruturas, do curso de engenharia da UFU, *campus* Santa Mônica. Os corpos submetidos a RAA foram fabricados com brita de potencial reativo e armazenamento inicial a 38° C nas primeiras 24 horas, posteriormente essa temperatura aumentou para 50° C, sendo mantido até os 200 dias. Os corpos de prova de DEF foram produzidos com brita considerada inerte, inicialmente foi submetido a tratamento térmico a 70°C e posteriormente armazenado a 50° C (Fig. 1). As amostras submetidas a ambas as reações (DEF+RAA) foram fabricadas com a brita potencialmente reativa, seguido de tratamento térmico a 70° C e um armazenamento a 50° C. Foram fabricados também corpos de prova de referência dessas manifestações patológicas, o referencial reativo (RR) para o RAA e referencial inerte (RI) para o DEF, ambas foram confeccionadas com os mesmos materiais das amostras que são referências, diferenciando apenas no armazenamento a 23° C, durante todo o estudo. Por fim os corpos de prova foram separados conforme a porcentagem de expansão. Com 28 dias as amostras obtiveram 0% expansão geradas pelas manifestações patológicas, já com 200 dias houve uma expansão de 0,06% para o RAA e 0,03% para a DEF.

Figura 1- Condições de temperatura e umidade dos corpos de prova de DEF



Fonte: Perin 2024

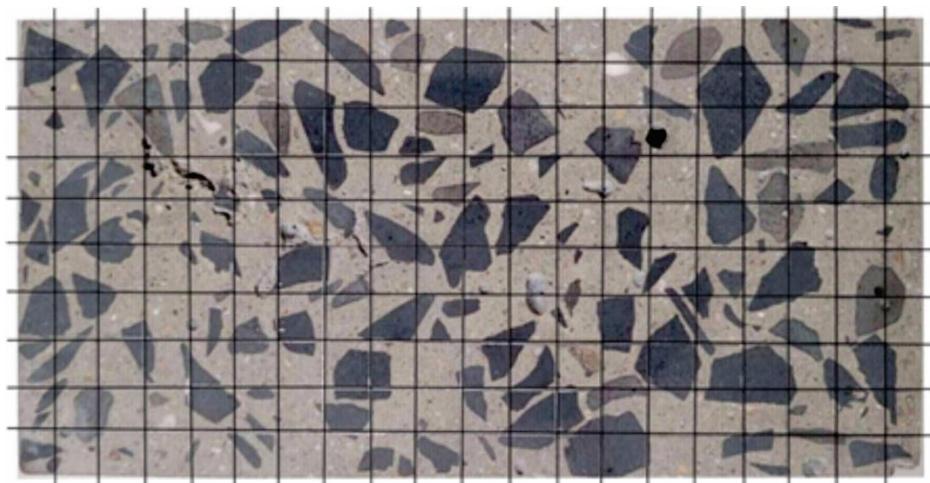
Após a etapa de fabricação, os corpos de prova foram preparados no laboratório de preparação de amostras do curso de geologia, UFU – campus – Monte Carmelo, com o intuito de gerar uma superfície plana e polida para análise. Os corpos de prova a princípio foram cortados transversalmente em uma cortadora de blocos refratários, em seguida a superfície gerada foi polida com uma politriz e lixas diamantadas de 50, 200, 400 e 800 micras, por aproximadamente 30 minutos em cada granulometria. Finalizada o estágio anterior, foi desenhado uma quadrícula sobre os corpos de prova para aplicação do DRI. Concomitantemente as amostras para a petrografia foram separadas e cortadas em tamanhos menores para facilitar a fabricação das lâminas.

Posteriormente o DRI foi aplicado, a fim de identificar e classificar as feições expansivas ocasionadas pelos processos de RAA e DEF. Para a obtenção do DRI são identificadas, classificadas e contadas as fraturas em uma superfície transversal de um corpo com dimensões de 100 x 200 mm, em uma superfície plana e polida, utilizando-se uma malha de 1cm², desenhada sobre essa superfície (Fig. 2). Por fim o método de análise petrográfica

também foi aplicado se utilizando o laboratório de microscopia e petrografia do curso de geologia, UFU - *campus* – Monte Carmelo.

No total foram descritos para a análise textural, 29 corpos de prova de concreto, sendo 15 com 28 dias e 14 com 200 dias (Tabela 2). Cada mecanismo se encontrava em 3 amostras para cada tipo de reação (RAA, DEF, D+R, RR e RI) em cada intervalo de tempo (28 e 200 dias). Para a análise mineralógica foram descritas 10 seções delgadas sob microscópio petrográfico, sendo uma para cada grupo de concreto em cada idade.

Figura 2- Quadrícula de 1cm² utilizada na descrição das feições.



Fonte: Autoria própria

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

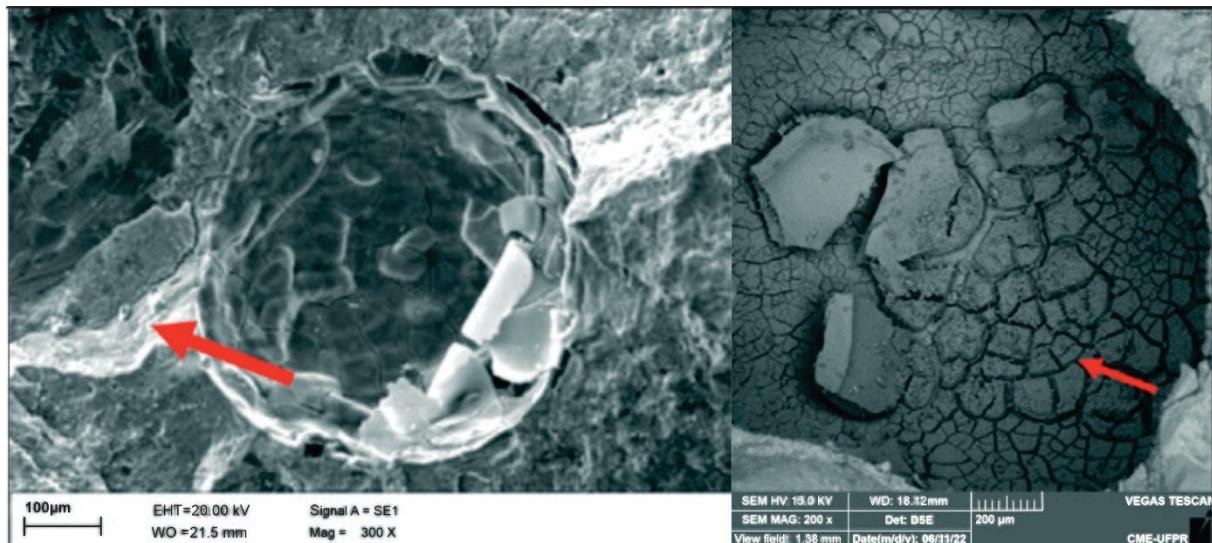
4.1 Reação Álcali-Agregado (RAA)

Dentre as reações patológicas que comprometem as propriedades mecânicas e interferem na vida útil das estruturas de concreto, a reação álcali-agregado (RAA) ocorre intimamente relacionada aos agregados reativos que compõem o concreto e sua relação com os álcalis presentes na pasta de cimento. As reações álcali-agregado podem ser divididas em reação álcali-sílica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC), segundo Fournier e Bérubé (2000).

A RAS ocorre devido a interação de minerais de sílica presentes nos agregados (ex. opala, calcedônia, cristobalita, tridimita e quartzo) reativos com hidróxidos alcalinos situados nos poros do concreto produzindo um gel expansivo (Fig. 3). Já a RAC ocorre mais raramente e está relacionada com a interação dos hidróxidos alcalinos com calcários dolomíticos. Thomas e Folliard (2007) caracterizam a RAC como uma reação de desdolomitização, a qual

provavelmente destrói a estrutura cristalina da dolomita formando minerais como calcita e brucita.

Figura 3-Imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) do gel de sílica. a) Fissuras preenchidas pelo gel expansivo e (b) gel gretado.



Fonte: Macioski *et al* (2023)

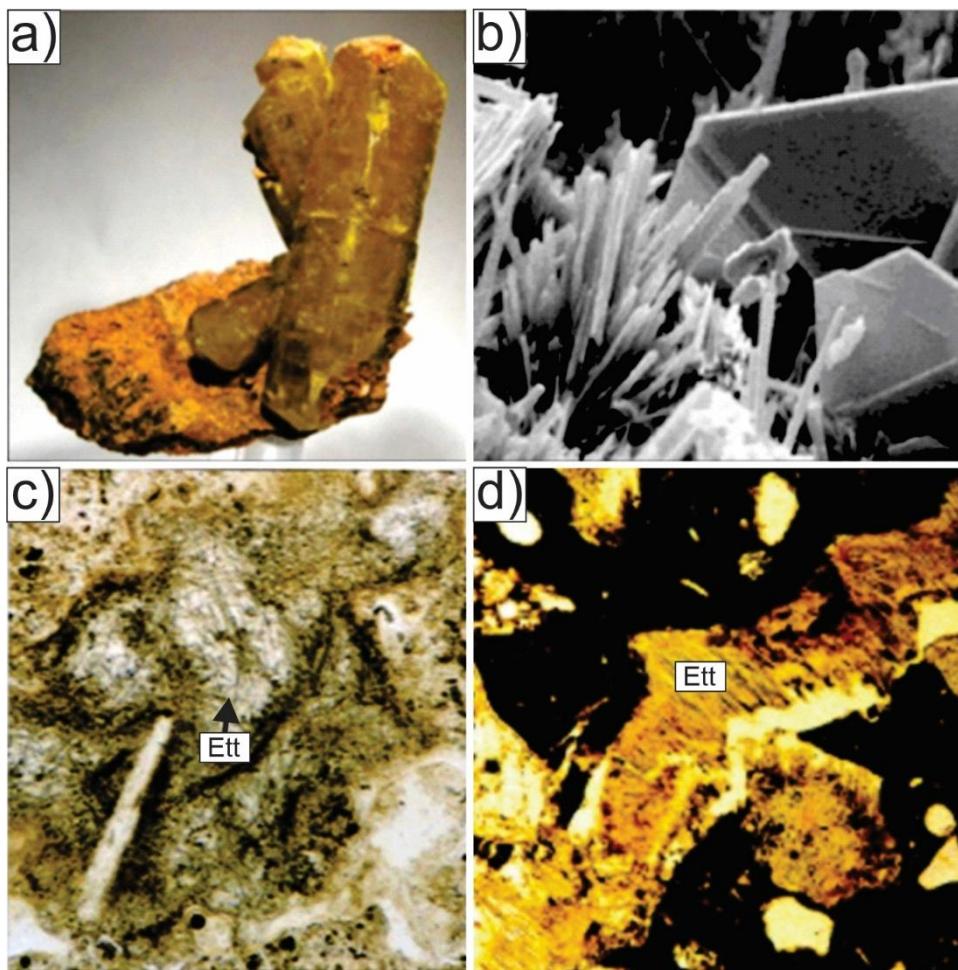
A reatividade na RAS está relacionada com a proporção de quartzo nas rochas. Gogte (1973) realizou um estudo no qual foram analisados vários agregados, dentre eles granitos, granodioritos e gnaisses, com presença de quartzo deformado. Por meio dessa análise o autor atribuiu que rochas com composição modal acima de 40% de quartzo eram altamente reativas, principalmente se o mineral estiver deformado ou fraturado.

4.2 Formação de Etringita Tardia (DEF)

A etringita primária normalmente é o primeiro composto a se cristalizar durante o processo de hidratação do cimento (ODLER, 2007; TAYLOR, 1997) e contribui para seu enrijecimento e o desenvolvimento da resistência inicial sem prejudicar a mistura devido à alta fluidez da pasta. É caracterizada como um sulfato de cálcio e alumínio hidratado ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12.26\text{H}_2\text{O}}$), formado pela reação dos sulfatos alcalinos e cárnicos (adicionados em forma de gesso) com o aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) em meio aquoso (ODLER, 2007). A etringita na natureza apresenta hábito prismático ou acicular, com cores variando de amarelo, incolor e branco (Fig. 4a, b). A etringita primária é instável a temperaturas de aproximadamente 60°C, se decompondo em monossulfoaluminato de cálcio ($3\text{C}_4\text{ASH}_{12}$); posteriormente esse composto pode formar a etringita tardia (Fig. 4c, d) (MEHTA &

MONTEIRO, 2008). A etringita tardia é responsável pelo fissuramento dos concretos pois se forma na pasta de cimento já rígida.

Figura 4. Etringita primária e secundária. a) Etringita encontrada na região de Kuruman (África do Sul); b) cristais aciculares de etringita primária em concreto no microscópio óptico de varredura (MEV) c, d) Fotomicrografias de concretos com etringita tardia.



Fonte: a, b) Melo (2010); c, d) Poole (2016).

4.3 Damage Rating Index (DRI)

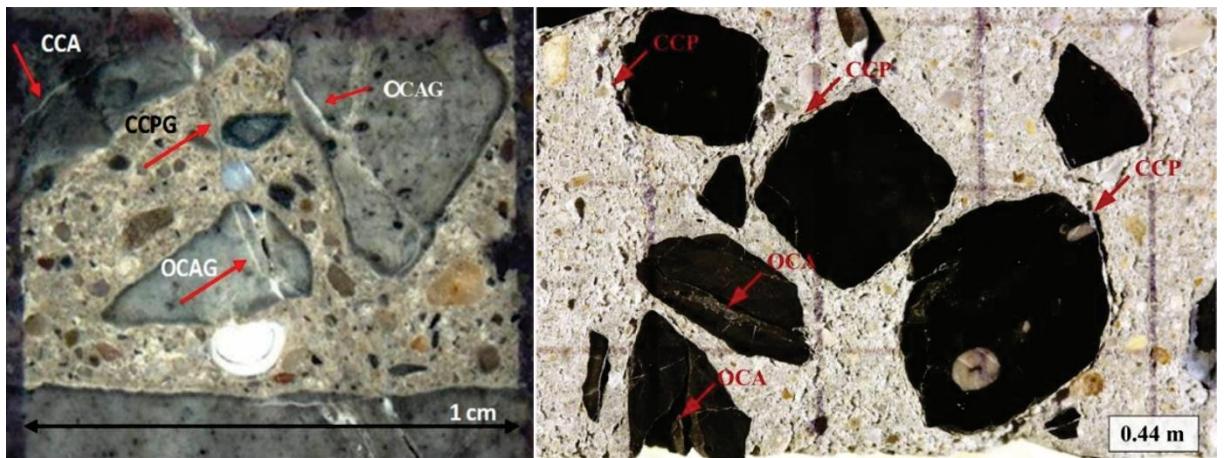
O DRI consiste em um processo semiquantitativo, no qual são contabilizadas e classificadas as fraturas expansivas presentes em áreas de dimensões de 1cm^2 , gerando um valor numérico que indica o quanto o material foi danificado. O método pressupõe que as fraturas se formam primeiro dentro do agregado para a RAA e com a evolução das reações expansivas as fraturas se aproveitam dos planos de fraqueza já existentes para se propagar, fragmentando os agregados e a pasta de cimento (SANCHEZ *et al.*, 2015), já a DEF se inicia na pasta e se propaga com o mesmo princípio para os agregados. Desta forma essas feições são classificadas em relação a abertura, o material em que ocorre fratura (agregado graúdo ou pasta), e se há preenchimento, ou não da fratura. Tais fraturas podem ser classificadas de acordo com a tabela

1 (Fig. 5). Cada tipo de fratura tem um peso, ou fator de ponderação, a ser aplicado para a obtenção do DRI.

Tabela 1- Tipos de fraturas, siglas e fatores de ponderação.

Tipos de fraturas	Siglas	Fatores de Ponderação
Fraturas no agregado graúdo (<i>cracks in coarse aggregate</i>)	CCA	0,25
Fraturas abertas no agregado graúdo (<i>opened cracks in coarse aggregates</i>)	OCA	2
Fraturas preenchidas por produtos de reação em agregado graúdo (<i>crack with reaction product in coarse aggregate</i>)	OCAG	2
Agregado graúdo com perda de adesão com a pasta (<i>coarse aggregate debonded</i>)	CAD	3
Partícula do agregado corroída ou desagregada (<i>disaggregate/corroded aggregate particle</i>)	DAP	2
Fraturas na pasta do cimento (<i>cracks in cement paste</i>)	CCP	3
Fraturas preenchidas por produtos de reações na pasta do cimento (<i>cracks with reaction product in cement paste</i>)	CCPG	3

Figura 5- Fotomicrografias ilustrando os tipos de fraturas em corpos de prova de concreto.



Fontes: Sanchez *et al.* (2020) adaptado e Martin *et al.* (2017)

5. CONTEXTO GEOLÓGICO DOS AGREGADOS GRAÚDOS

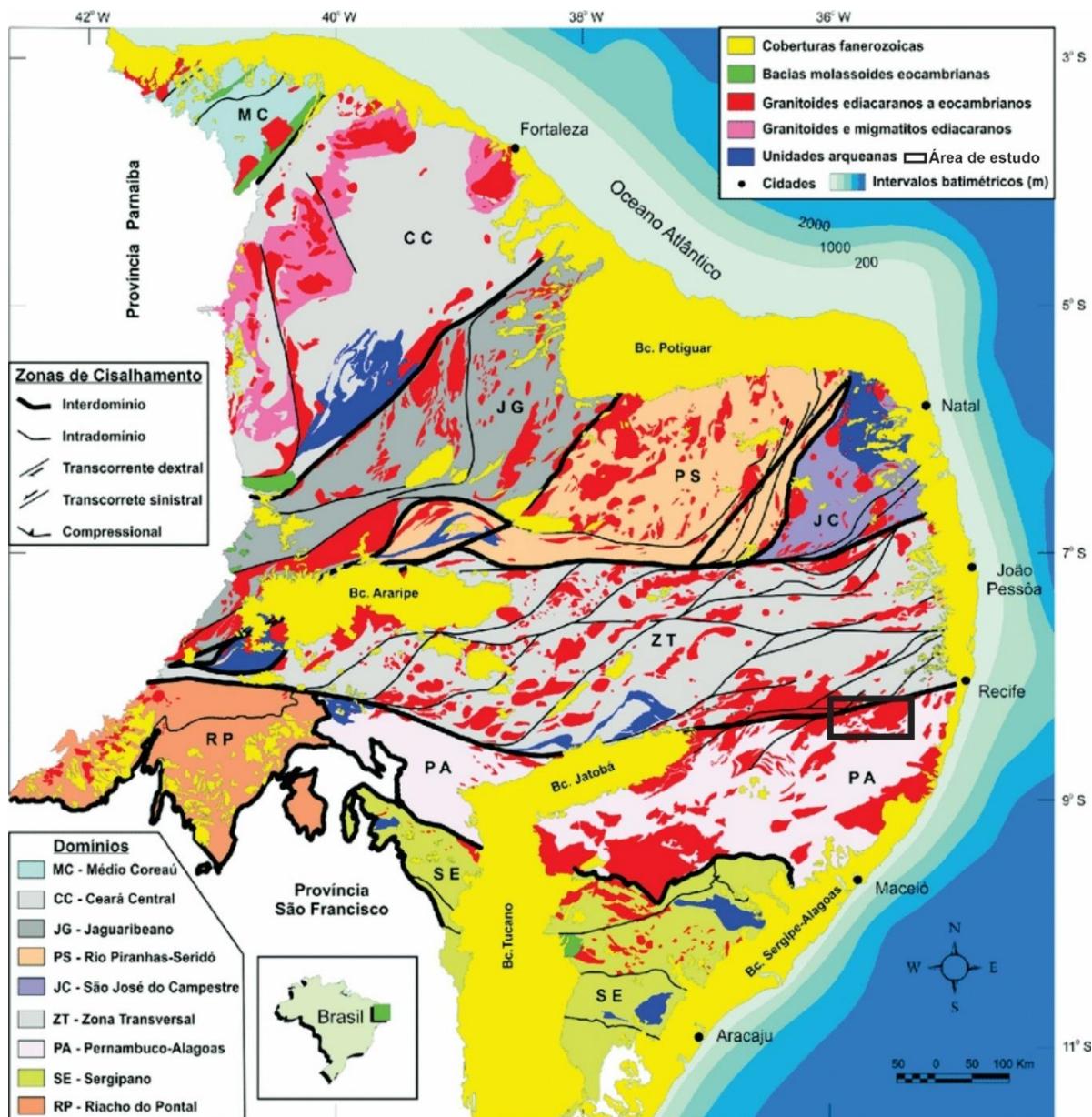
A rochas utilizadas como agregados graúdos (britas) na fabricação dos corpos de prova estudados pertencem a dois contextos geológicos distintos. A brita reativa é derivada de

migmatitos associados ao Complexo Belém do São Francisco, unidade geológica inserida no contexto da Província Borborema. A brita inerte, é composta essencialmente por basaltos da Formação Serra Geral, unidade geológica pertencente a Bacia do Paraná.

5.1 Migmatitos do Complexo Belém de São Francisco

A Província Borborema (PB) é caracterizada por um sistema de faixas de dobramentos formadas devido as orogêneses do Neoproterozoico, relacionada a intrusões graníticas. No geral apresenta porções arqueanas e paleoproterozoicas, além de bacias mesozoicas e coberturas fanerozoicas.

Figura 6. Contexto geotectônico da Província Borborema.



Fonte: Medeiros *et al.* 2017.

Os agregados utilizados neste trabalho são extraídos no município de Vitória de Santo Antão (PE). As rochas fonte dos agregados estão inseridas no contexto da porção Meridional ou Sul da Província Borborema, mais especificamente no domínio Pernambuco-Alagoas, segmentado em Complexo Cabrobó e Belém de São Francisco (SANTOS 1995; MEDEIROS & SANTOS 1998; MEDEIROS 2000).

O Complexo Belém de São Francisco é composto por uma associação granítica-migmatítica e tem litotipos principais como ortognaisses tonalíticos, monzograníticos e graníticos, migmatizados com enclaves máficos (MORAES 2022). Os granitos em questão são rochas que se apresentam porfíriticos ou pegmatóides, os migmatitos encaixantes ocorrem ricos em feldspatos potássicos, com neossoma de coloração rosa a avermelhado associados a anfibolitos máficos (SOUZA 2007), compostos por mesossoma quartzo diorítico/tonalítico a anfibólito com, ou sem biotita, e ortognaisses metaluminosos a peraluminosos leucocráticos e *augen* gnaisses metaluminosos (CHRISTIAN 2002). A orogênese que ocorreu na passagem do Mesoproterozoico para o Neoproterozoico denominada Cariris Velhos é responsável pela formação desse complexo. Tal evento deformou as rochas pré-existentes e formou suítes crustais colisionais que atualmente se encontram migmatizadas (CHRISTIAN 2002).

5.2 Basaltos da Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral se encontra inserida na sequência Gondwana III na Bacia do Paraná (MILANI 1997) e está associada a uma série de episódios magmáticos que ocorreram início do cretáceo. Os derrames dessa formação se encontram sobrepostos pelos arenitos eólicos jurássico/triássico da Formação Botucatu. É composta principalmente por basaltos toleíticos, em menor proporção andesitos toleíticos e cerca de 3% de riodacitos e riolitos (PICCIRILLO & MELFI 1988). A rocha vulcânica em questão ocorre amgdaloidal, encontrando-se associadas a quartzo, calcedônia, carbonatos, argilominerais e zeólitas (BERGMANN 2013). Os basaltos são compostos por plágioclásios cárquicos como labradorita e andesina e piroxênios, ocorre como acessório apatita, mais comumente associada aos outros minerais ou nas áreas de predomínio de material devitrificado (BERGMANN 2014).

6. RESULTADOS

Tabela 2- Identificação das amostras pela manifestação patológica, ID, rocha, fraturas totais, dias submetidos as reações e valor de DRI total em cada amostra (A, B e C).

Manifestação		ID	ROCHA	FRATURAS TOTAIS	DIAS	DRI TOTAL	Manifestação		ID	ROCHA	FRATURAS TOTAIS	DIAS	DRI TOTAL
DEF	A	JGA 1	Basalto	77	28	63.25	DEF	A	JGA 16	Basalto	146	200	137.25
	B	JGA 2	Basalto	99	28	77		B	JGA 17	Basalto	154	200	154.75
	C	JGA 3	Basalto	99	28	68.75		C	JGA 18	Basalto	168	200	152
RAA	A	JGA 4	Migmatito	239	28	107.25	RAA	A	JGA 19	Migmatito	301	200	219.5
	B	JGA 5	Migmatito	281	28	111.25		B	JGA 20	Migmatito	348	200	233.5
	C	JGA 6	Migmatito	265	28	100.75		C	JGA 21	Migmatito	401	200	224.25
RR	A	JGA 7	Migmatito	264	28	103.5	RR	A	JGA 22	Migmatito	274	200	248
	B	JGA 8	Migmatito	308	28	104.5		B	JGA 23	Migmatito	241	200	236.25
	C	JGA 9	Migmatito	298	28	106.5		C	JGA 24	Migmatito	228	200	231.25
RI	A	JGA 10	Basalto	108	28	54.5	RI	A	JGA 25	Basalto	213	200	113.5
	B	JGA 11	Basalto	127	28	53.75		B	JGA 26	Basalto	186	200	103.25
	C	JGA 12	Basalto	95	28	56.75		C	JGA 27	Basalto	150	200	109
DEF+RAA	A	JGA 13	Migmatito	281	28	106.75	DEF+RAA	A	JGA 28	Migmatito	330	200	258.5
	B	JGA 14	Migmatito	260	28	100.75		B	JGA 29	Migmatito	316	200	256.75
	C	JGA 15	-	-	-	-		C	JGA 30	Migmatito	292	200	244.75

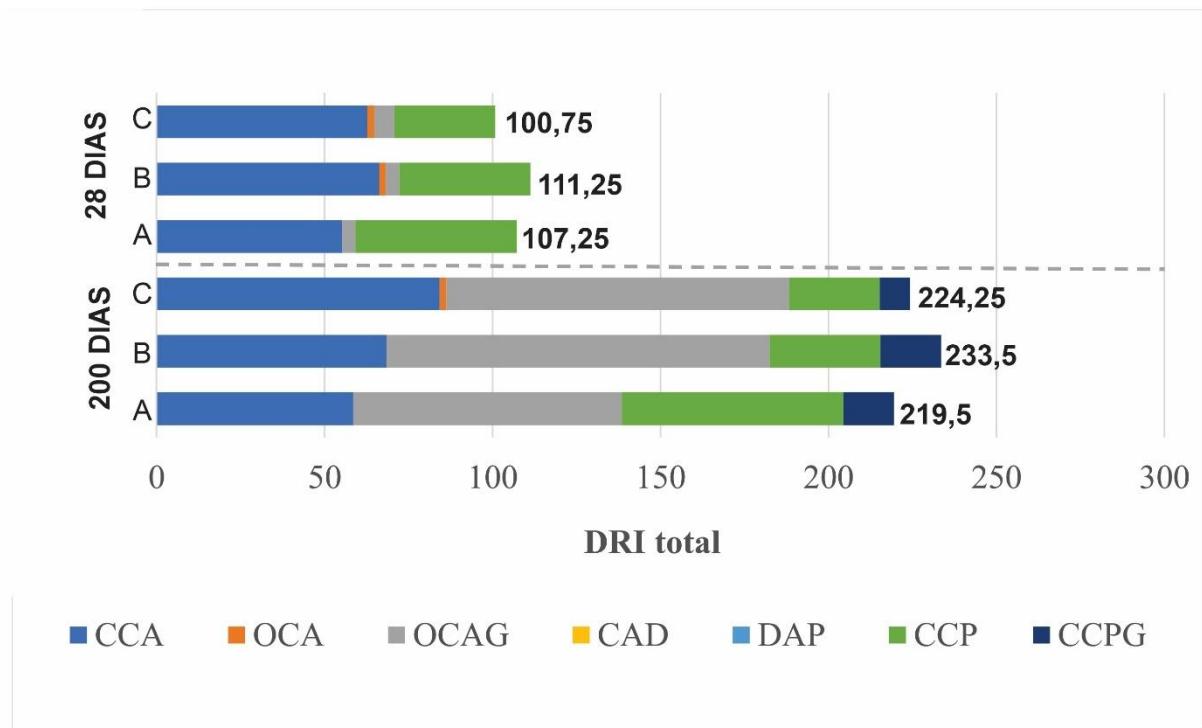
Fonte: Autoria própria.

6.1 Análise Textural/DRI

6.1.1 Reação álcali-agregado

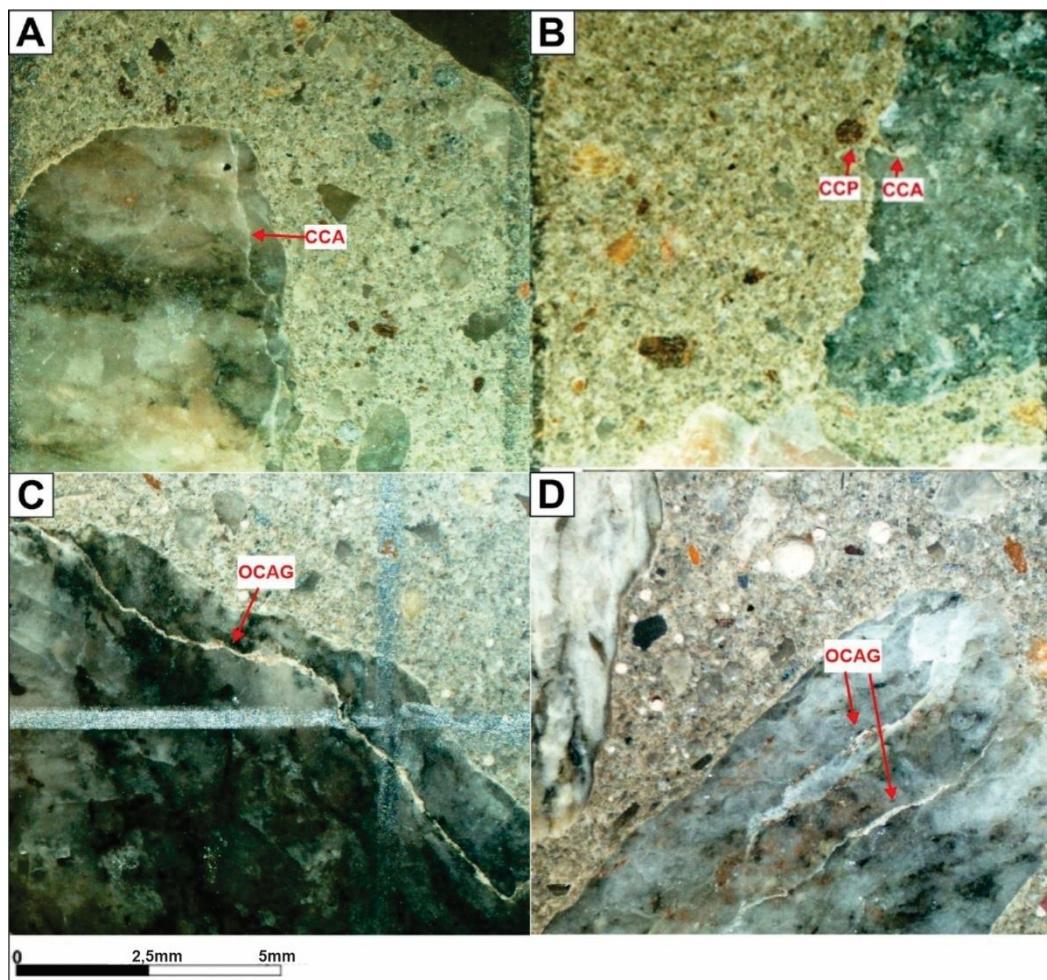
As amostras de RAA armazenadas durante 28 dias têm um predomínio de fraturas no agregado graúdo (CCA) seguido, em menor quantidade, de fraturas na pasta CCP (Fig. 7) Os valores de DRI médio obtido para essas amostras foi de 106,4 (Gráfico 1). Quando submetidos a 200 de reação, os corpos de prova desenvolveram fraturas mais desenvolvidas do tipo OCAG, porém mantendo um domínio de fraturas no agregado graúdo (CCA), além disso é visível fraturas na pasta do tipo CCP e CCPG em menores quantidades (Fig. 7), gerando um valor de DRI total médio de 225,75 (Gráfico 1).

Gráfico 1-Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova submetido a reação álcali agregado.



Fonte: Autoria própria

Figura 7. Principais fraturas nos corpos de prova de 28 dias (A e B) e 200 dias (C e D) submetidos a RAA. A) Fratura no agregado graúdo (CCA). B) Fraturas no agregado graúdo (CCA) e na pasta (CCP). C e D) Fratura no agregado graúdo preenchida pelo produto da reação (OCAG). (COLOCAR ESCALA EM MM)



Fonte: Autoria própria

6.1.2 Formação de etringita tardia

Os corpos de prova de DEF com 28 dias estudados apresentam domínio de fraturas no agregado (CCA), seguidas de fraturas na pasta (CCP) e ausência dos demais tipos de fraturas (Fig. 8) gerando um valor de DRI total médio de 69,6 (Gráfico 2). Com 200 dias foi possível observar as mesmas fraturas anteriormente identificadas, porém em maiores quantidades e pontualmente em quantidades não muito significativas OCA, OCAG e CCPG (Fig. 8), como é possível relacionar no gráfico 2 anteriormente, resultando no valor de 148 para o DRI total médio.

Gráfico 2- Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova submetido a formação de etergita tardia.

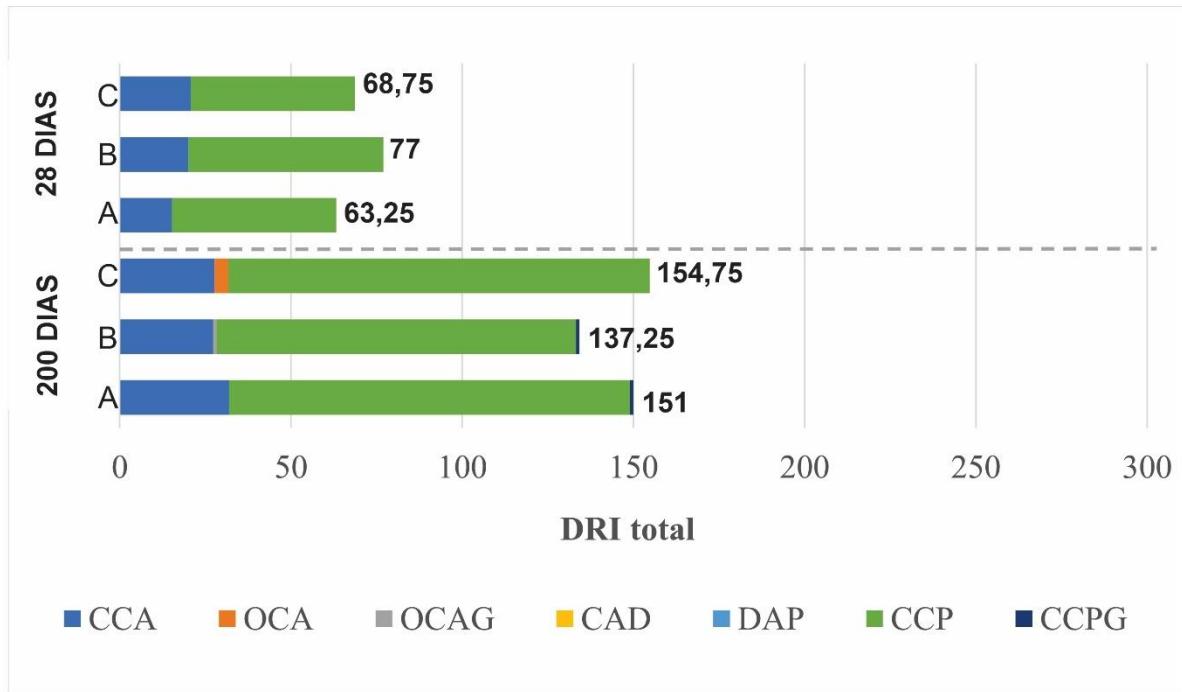
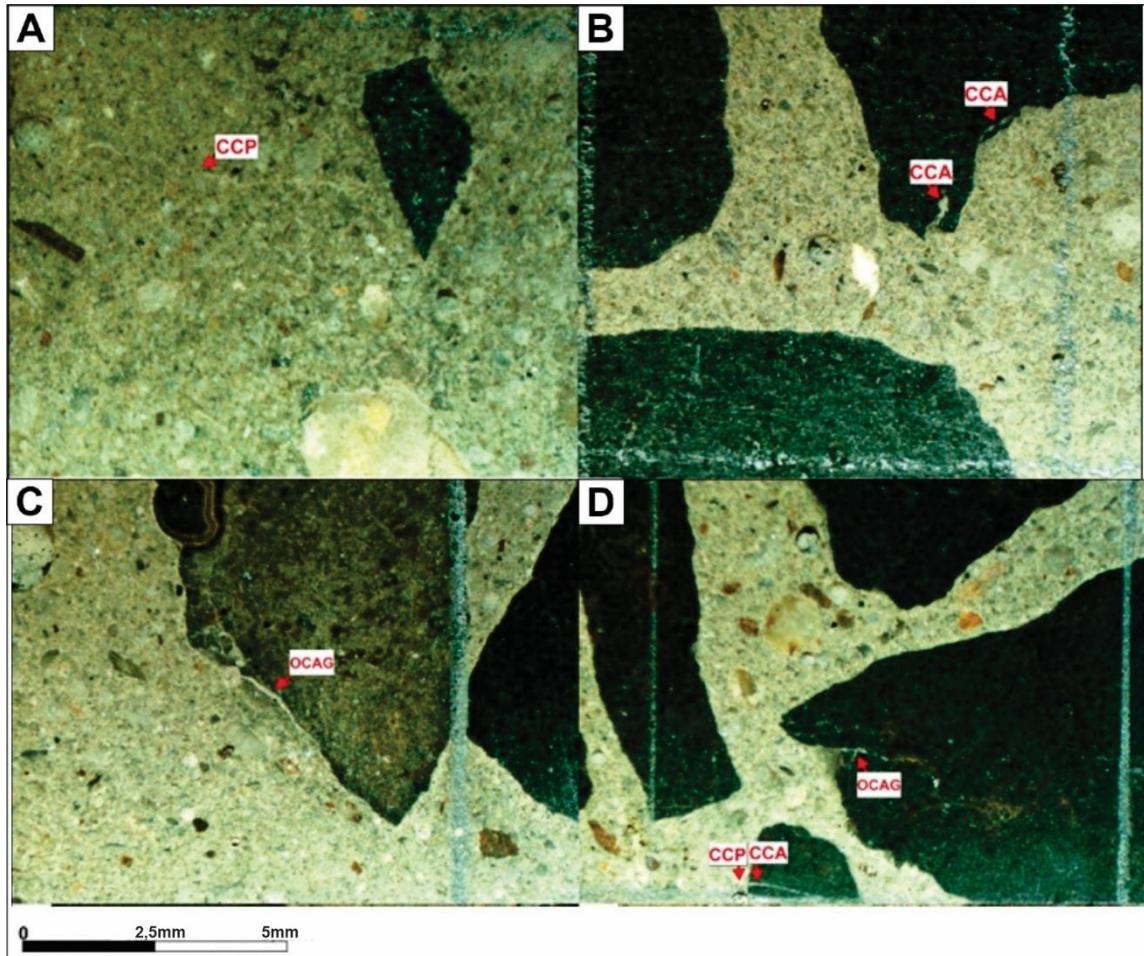


Figura 8. Principais fraturas nos corpos de prova de 28 e 200 dias submetidos a DEF. A) Fraturas na pasta (CCP) nos corpos de 28 dias. B) Fratura no agregado graúdo (CCA) nos corpos de prova de 28 dias. C) Fratura no agregado graúdo preenchida pelo produto da reação (OCAG) nos corpos de prova de 200 dias. D) Fratura no agregado graúdo preenchida pelo produto da reação (OCAG), fratura no agregado graúdo (CCA), fraturas na pasta (CCP) nos corpos de prova de 200 dias.



Fonte: Autoria própria

6.1.3 Formação de etringita tardia + Reação álcali agregado

As amostras submetidas a ambas as manifestações patologias com 28 dias apresentaram um DRI total médio (Gráfico 3) de 103,75. Contendo uma maior porcentagem de fraturas no agregado (CCA) e em menor quantidade fraturas na pasta (CCP) (Fig. 9). Já com 200 dias houve um aumento das fraturas do tipo CCA e CCP, além do desenvolvimento de fraturas preenchidas pelo produto de reação no agregado (OCAG) e na pasta (CCPG) (Fig. 9), que gerou um DRI total médio de 253,3 (Gráfico 3).

Gráfico 3-Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova submetido a reação álcali agregado mais formação de etringita tardia.

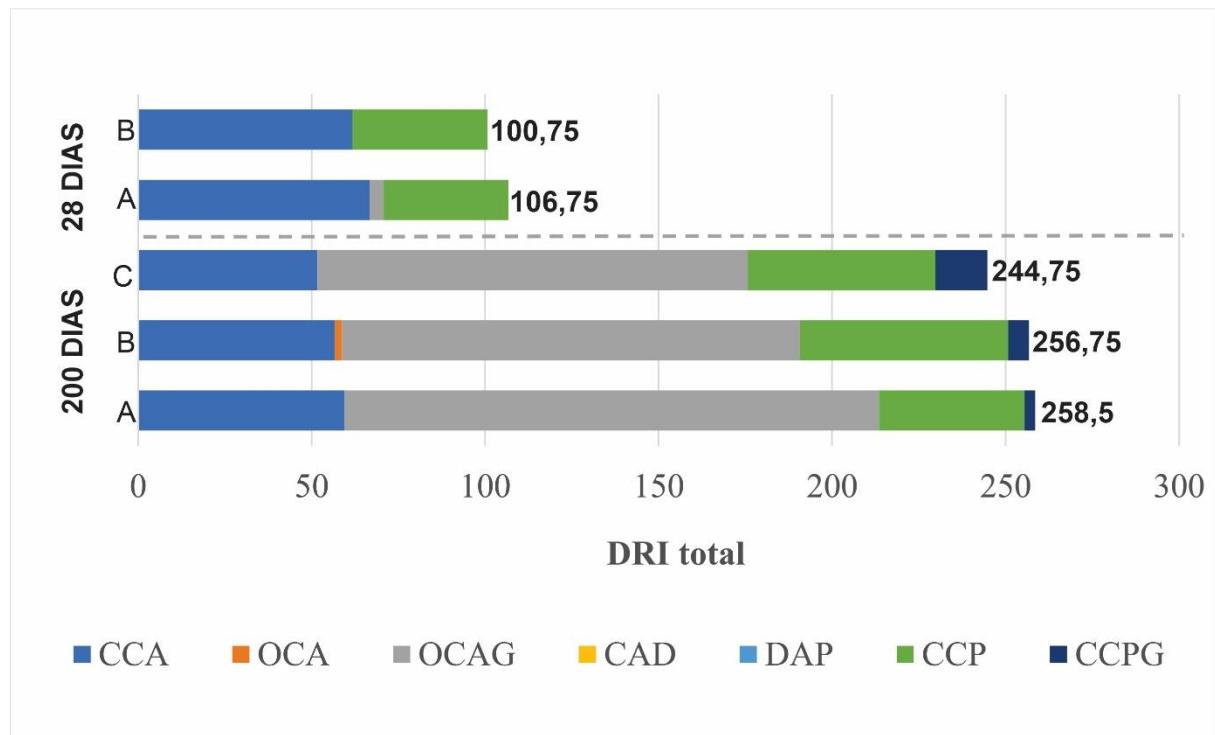
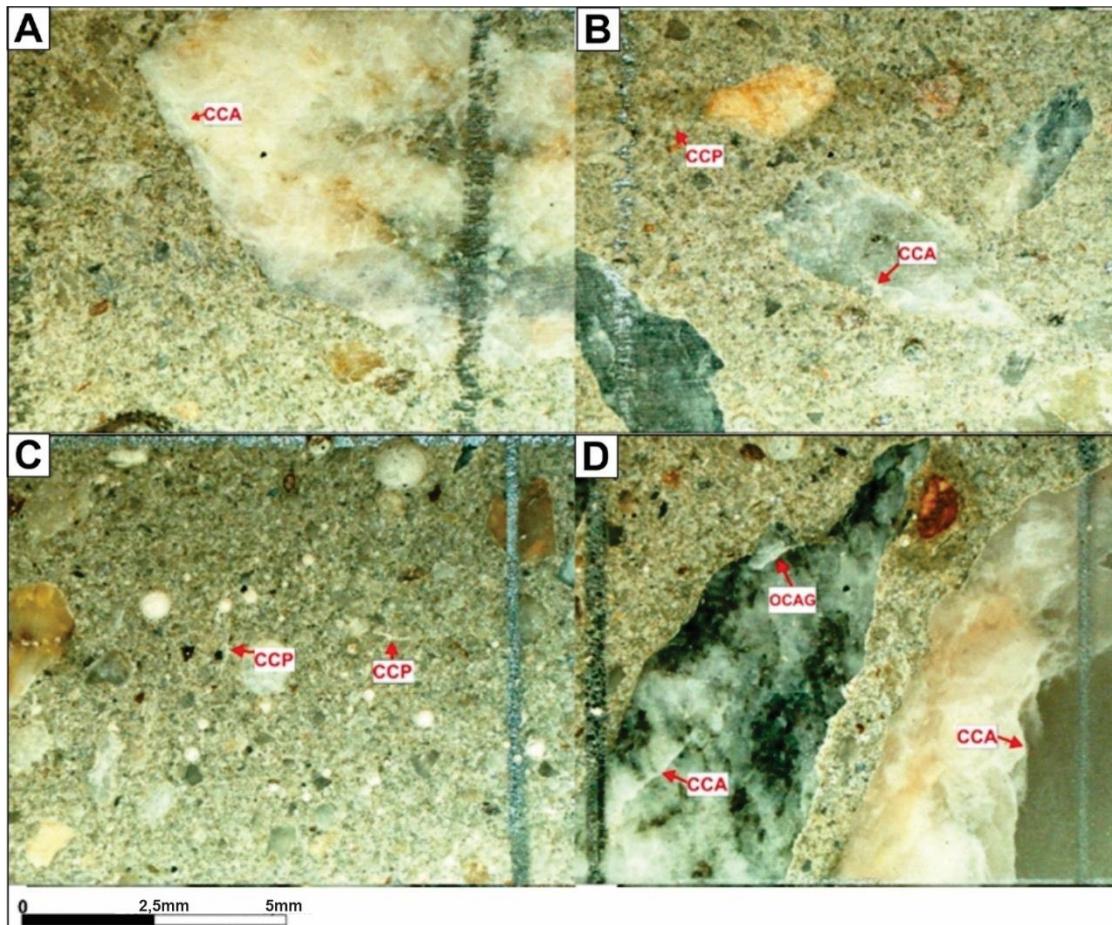


Figura 9. Principais fraturas nos corpos de prova de D+R com 28 e 200 dias. A) Fratura no agregado graúdo (CCA) de 28 dias; B) Fratura no agregado graúdo (CCA) e fraturas na pasta (CCP) nos corpos de 28 dias; C) Fratura no agregado graúdo (CCA) e fraturas na pasta (CCP) nos corpos de 200 dias. B) Fratura no agregado graúdo (CCA) e Fratura no agregado graúdo preenchido pelo produto da reação (OCAG) com 200 dias.

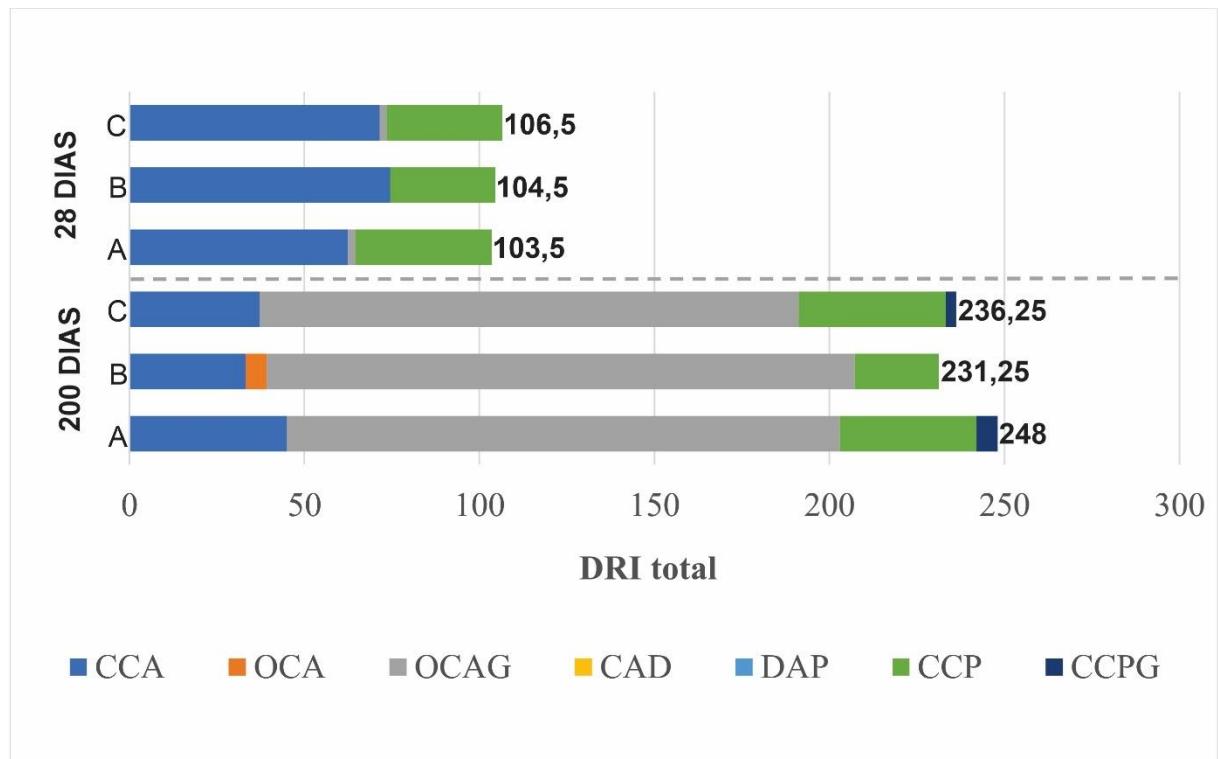


Fonte: Autoria própria

6.1.4 Referência Reativa

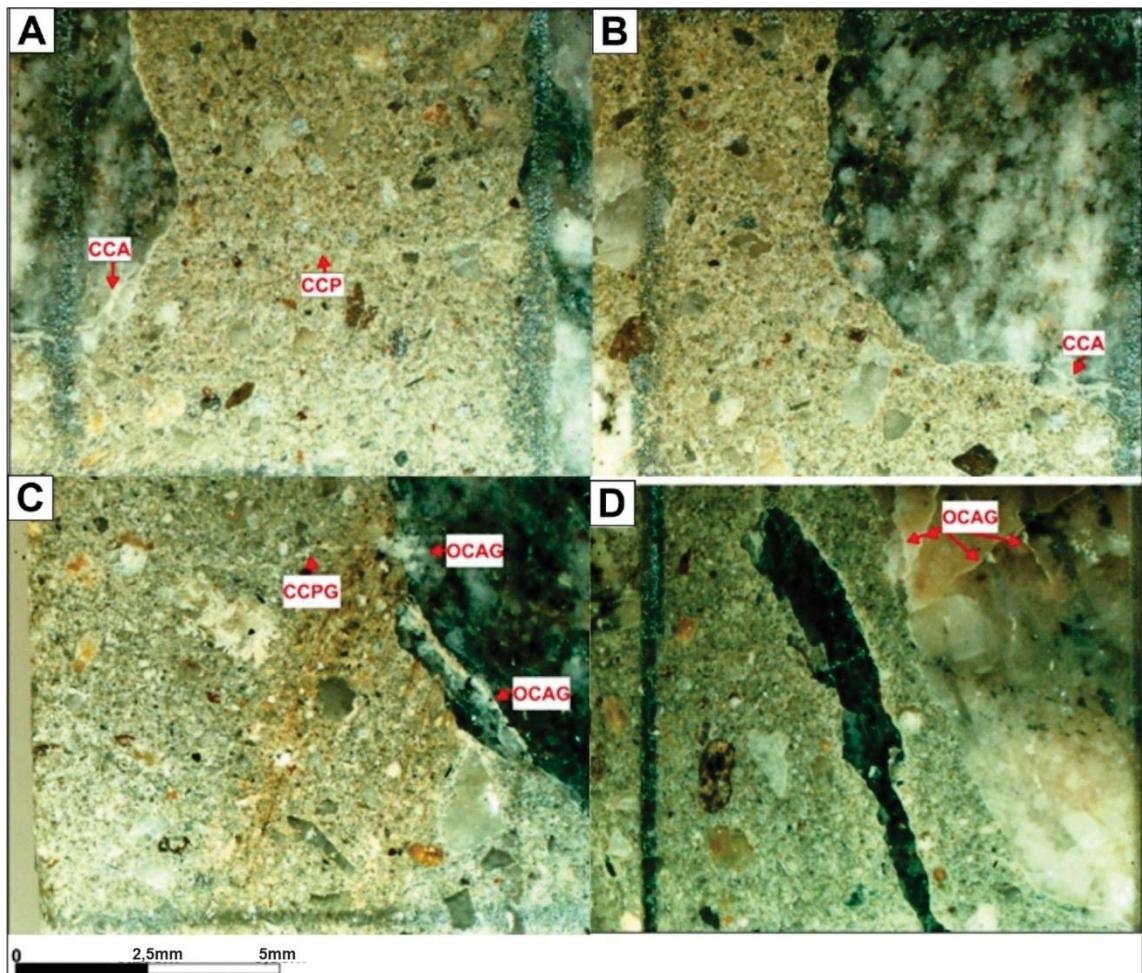
Os corpos de prova utilizados como referência reativa para a reação álcali agregado com 28 dias foram desenvolvidas fraturas do tipo CCA e algumas CCP (Fig. 10) apresentaram um valor de DRI total médio de 104,8 (Gráfico 4). Com 200 dias há fraturas do tipo CCA e OCAG em maiores quantidades, seguidas de CCP e algumas CCPG. Em uma das amostras encontrou-se OCA (Fig. 10) que resultou em um aumento no DRI médio para 238,5 (Gráfico 4).

Gráfico 4-Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova de referência para a reação álcali agregado.



Fonte: Autoria própria

Figura 10. Principais fraturas nos corpos de prova de RR com 28 e 200 dias. A) Fratura no agregado graúdo (CCA) e fraturas na pasta (CCP) nos corpos de 28 dias. B) Fratura no agregado graúdo (CCA) nos corpos de prova de 28 dias. C) Fratura no agregado graúdo preenchida pelo produto da reação (OCAG) e fratura na pasta preenchida pelo produto da reação (CCPG) nos corpos de prova de 200 dias.

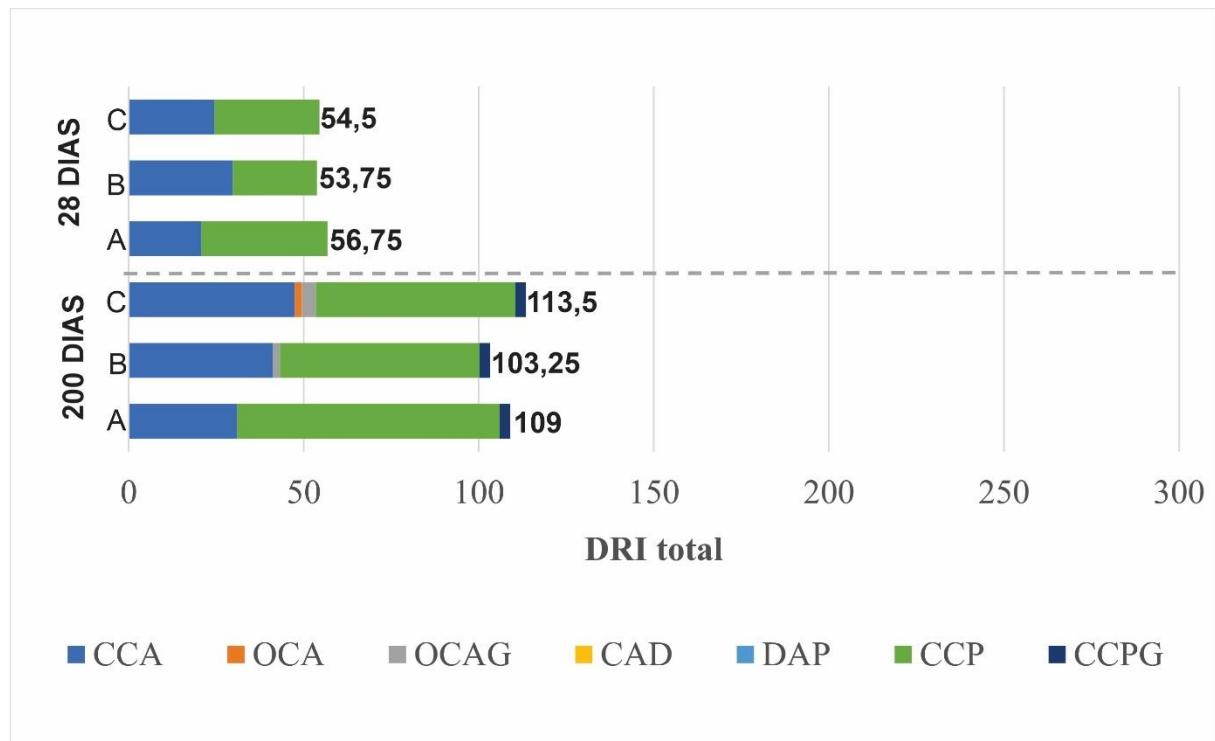


Fonte: Autoria própria

6.1.5 Referência inerte

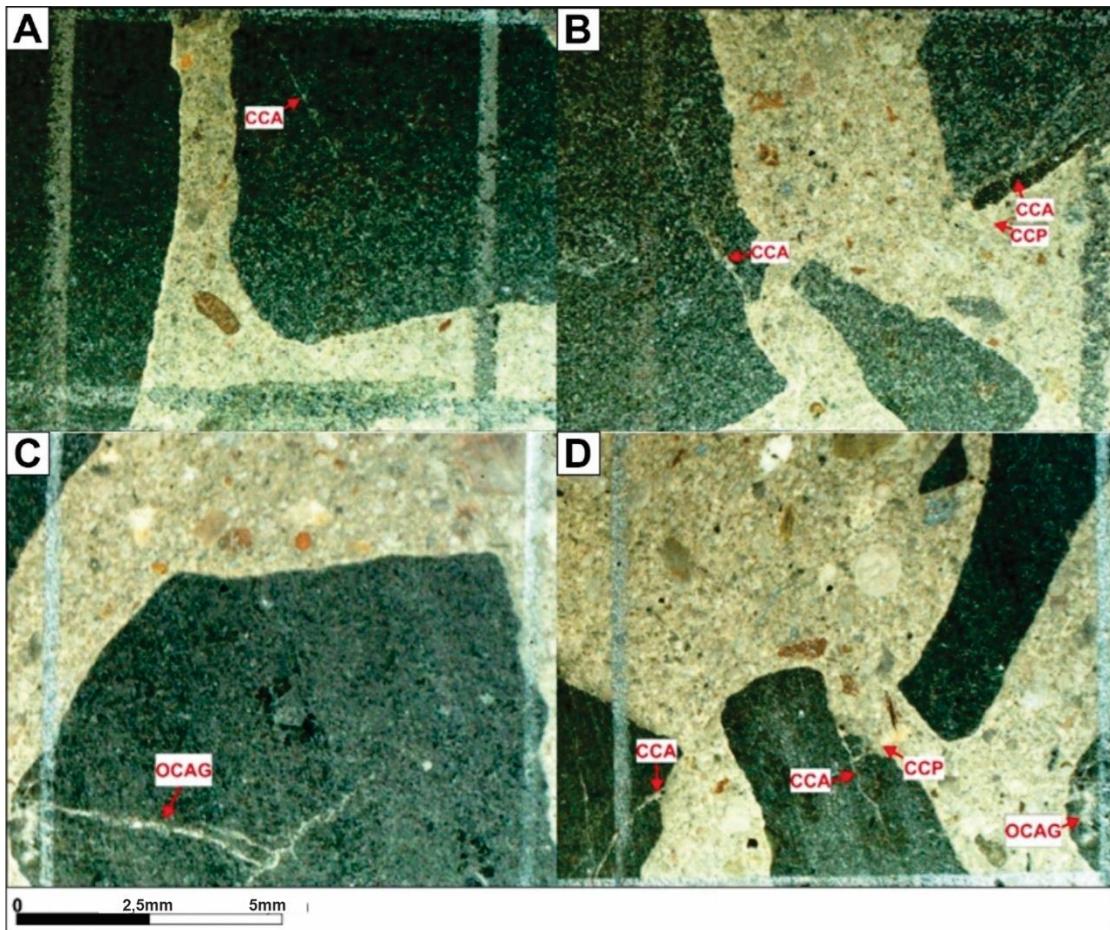
Nos corpos de prova utilizados como referência inerte para a formação de etringita tardia de 28 dias são compostos por fraturas do tipo CCA em maiores quantidades e pontualmente CCP (Fig. 11) que calculadas deram o DRI total médio de 55 (Gráfico 5). Com 200 dias fraturas como CCA e CCP ocorrem em abundância e fraturas do tipo OCA, OCAG e CCPG pontualmente (Fig. 11) levando a um valor total médio de 108,6 (Gráfico 5).

Gráfico 5-Histograma de frequência comparando os tipos de fraturas e seus valores de DRI total para cada corpo de prova de referência para a formação de etringita tardia.



Fonte: Autoria própria

Figura 11. Principais fraturas nos corpos de prova de RI com 28 e 200 dias.

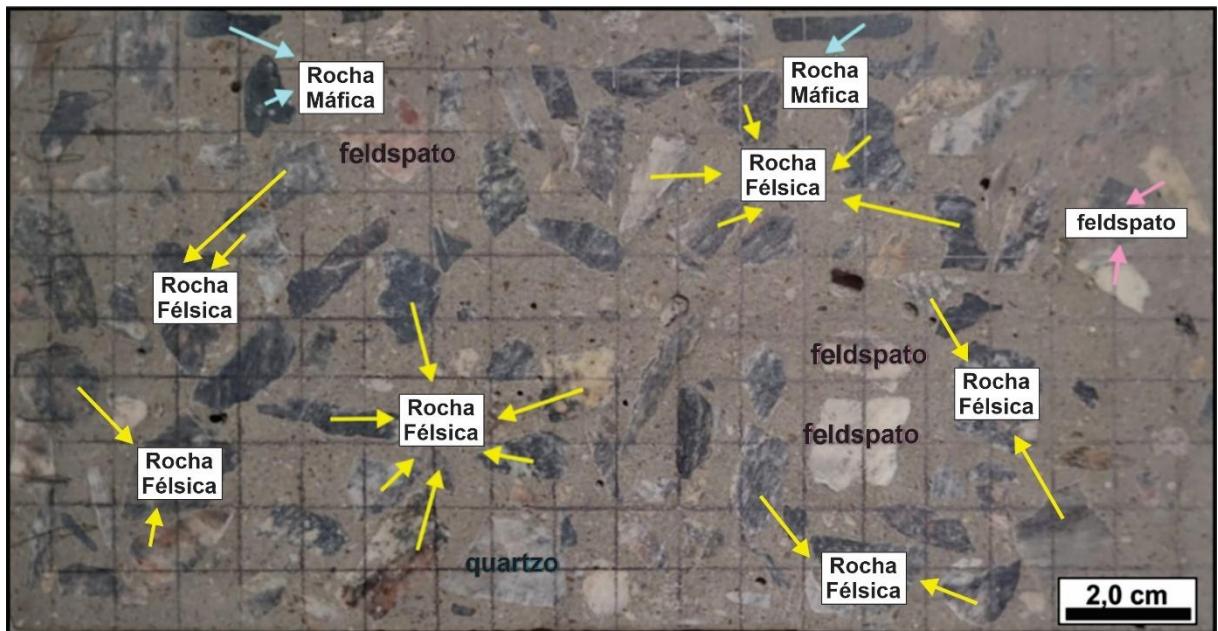


Fonte: Autoria própria

6.2 Análise Mineralógica

Os corpos de prova submetidos à reação álcalis-agregado (RAA), à combinação reação álcalis-agregado mais formação de etringita tardia (DEF+RAA) e os referenciais reativos (RR) apresentam uma elevada heterogeneidade na composição dos agregados graúdos (Fig. 12), de tal modo que foram observadas rochas félscicas, composta essencialmente por quartzo e feldspatos, com diferentes estruturas e mineralogias; rochas maficas, constituído por silicatos ferro-magnesianos; mica xistos; cristais de feldspatos; e cristais de quartzo. Esses agregados exibem tamanhos entre 1 cm e 2 cm, com formas predominantemente alongadas. Já os agregados miúdos são compostos predominantemente por quartzo, e alguns minerais opacos. Devido a essa heterogeneidade e a dimensões dos agregados, não foi possível analisar todos essas variedades em uma única seção delgada.

Figura 12- Fotos exemplificando a heterogeneidade dos agregados graúdos dos corpos de prova submetidos à reação álcalis-agregado (RAA), à combinação reação álcalis-agregado mais formação de etringita tardia (D+R) e os referenciais reativos (RR).



Fonte: Autoria própria

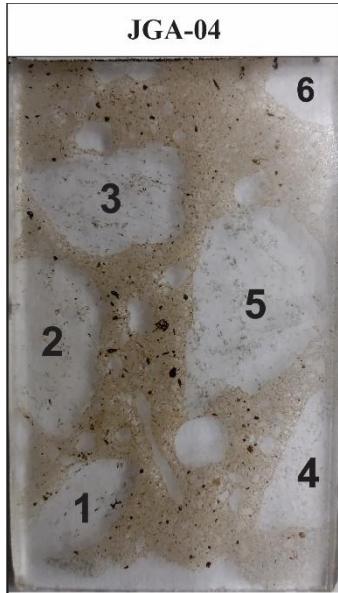
Tabela 3- Relação do tipo de patologia com os códigos adotados neste trabalho.

Reação	Código
RAA	JGA-04
	JGA-20
DEF	JGA-01
	JGA-16
D+R	JGA-14
	JGA-28
RR	JGA-09
	JGA-22
RI	JGA-11
	JGA-25

6.2.1 Petrografia Reação Álcali Agregado

As lâminas delgadas submetidas a reação álcali-agregado apresentam agregados de gnaisses miloníticos (Fig. 13a) e protomiloníticos (Fig. 13b), biotita-actinolita xisto (Fig 13c) e biotita-quartzo xisto (Fig. 13d) e hornblenda gnaisse (Fig. 13e). No quadro 1 e 2 estão apresentadas as composições mineralógicas dessas rochas.

Quadro 1--Composição modal dos agregados da amostra JGA-04. Kfs = Feldspato, Bt = Biotita, Hbl = Hornblenda, Ep = Epidoto, Ms = Muscovita, Ttn = Titanita, Op = Opaco, Qz = Quartzo.



JGA-04										
ID	Rocha	Inóculos								Deletério Qz* (%)
		Kfs (%)	Bt (%)	Hbl (%)	Ep (%)	Ms (%)	Ttn (%)	Op (%)		
1 e 3	Gnaissse milonítico	36 a 45	1 a 5	0	0	0	0	1	50 a 64	
2, 4 e 6	Gnaissse protomilonítico	65 a 85	1 a 5	0	0	1 a 5	0	0	10 a 30	
5	Hornblenda gnaissse	78	<1	15	<1	0	2	0	5	

* Quartzo deformando com extinção ondulante e recuperação de contatos.

Fonte: Autoria própria

Quadro 2- Composição modal dos agregados da amostra JGA-20. Kfs = Feldspato, Bt = Biotita, Hbl = Hornblenda, Ep = Epidoto, Ms = Muscovita, Ttn = Titanita, Op = Opaco, Qz = Quartzo.

JGA-20										
ID	Rocha	Inóculos								Deletério Qz* (%)
		Kfs (%)	Bt (%)	Act (%)	Ttn (%)	Ep (%)	Ms (%)	Op (%)		
1,2	Gnaissse milonítico	50	4	0	0	0	0	1	45	
3,4 e 5	Gnaissse protomilonítico	70 a 80	5	0	1	0	3	0	15 a 20	
6	Biotita Actinolita Xisto	10	55	30	0	0	0	0	5	
7	Biotita Quartzo Xisto	5	50	0	0	0	0	<1	45	

* Quartzo deformando com extinção ondulante e recuperação de contatos.



Fonte: Autoria própria

Os agregados de gnaisses que apresentam estrutura bandada e textura protomilonítica (Fig. 13 B), são constituídos por quartzo, feldspatos e biotita como minerais principais, podendo ocorrer actinolita e hornblenda; os minerais secundários são titanita, muscovita, epidoto e opacos. O quartzo ocorre como matriz da rocha, quando recristalizado apresenta dimensões menores que 0,16 mm e quando em cristais únicos com extinção ondulante variam de 0,24 mm a 0,96 mm. O feldspato ocorre como porfiroclastos com dimensões entre 0,16 mm até 1,12 mm, com geminação segundo a lei albita e em grade apenas nos cristais prismáticos subédricos. Dos

minerais acessórios a biotita ocorre por vezes marcando uma foliação ou encaixada entre os demais cristais com dimensões até 0,16 mm, com pleocroísmo de um verde pálido a verde, placoides euédricas a anédricas. A muscovita ocorre marcando a foliação parte da rocha em apenas um agregado com 200 dias, com tamanhos entre 0,16 mm e 0,96 mm, placoides euédricas. A titanita varia de 0,16 mm a 0,32 mm, anédrico com formato arredondado. A hornblenda ocorre com dimensões de 0,1 a 5 mm, com pleocroísmo variando de um verde oliva a um verde claro, subédrica e em um agregado ocorre em quantidades acima de 15%, que pode classificar como um hornblenda gnaisse (Fig. 13 E).

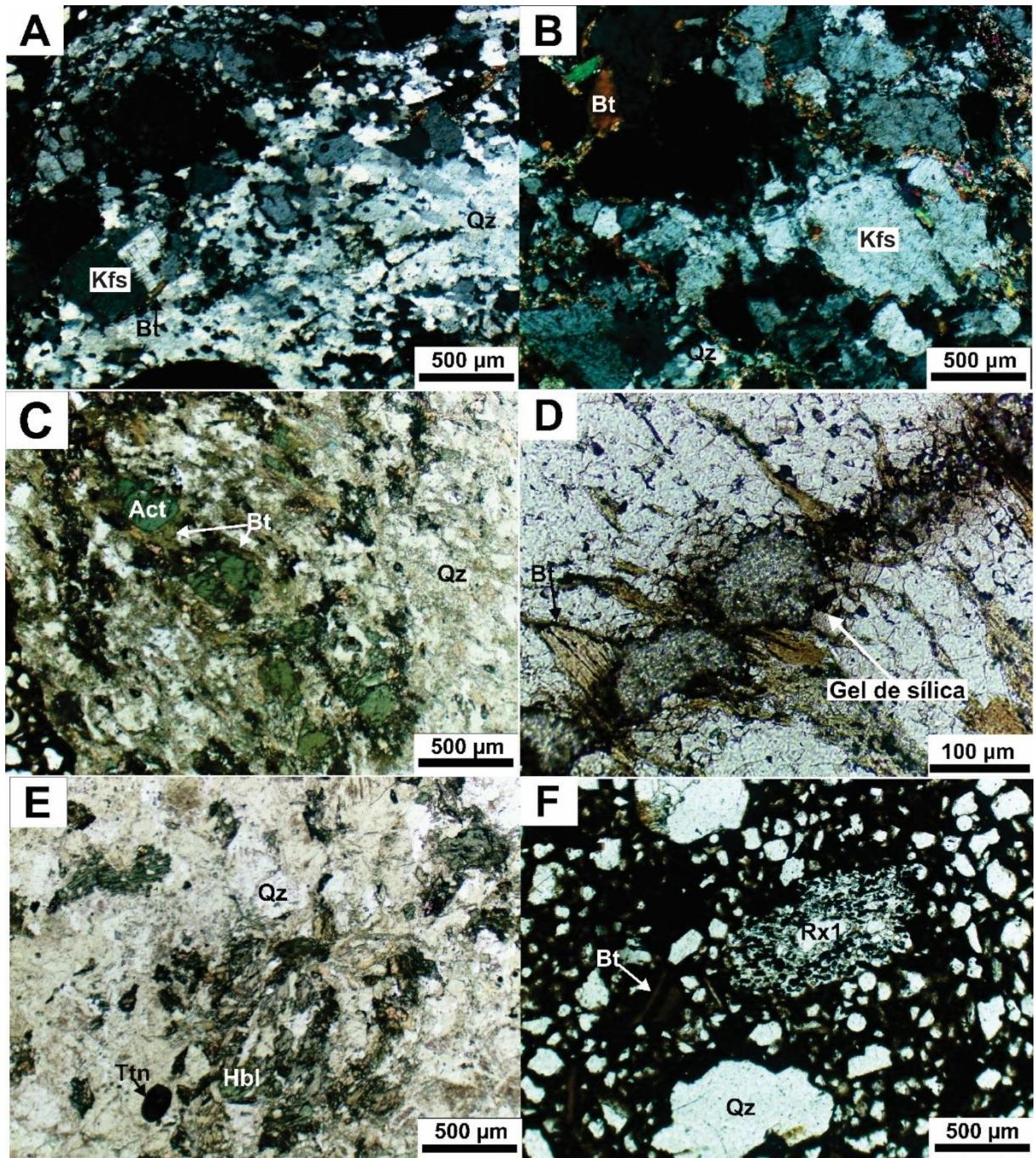
Os agregados de gnaisses com estrutura foliada e textura milonítica (Fig. 13 A), contêm minerais principais como quartzo e feldspatos, e a biotita como mineral acessório. O quartzo constitui a matriz da rocha, pois se encontra quase que totalmente recristalizado e são menores que 0,16 mm; e alguns cristais com extinção ondulante com tamanhos entre 0,16 mm e 0,24 mm. Já o feldspato ocorre como porfiroclastos com medidas entre 0,16 mm e 1,12 mm, geminação segundo a lei albita e em grade apenas em cristais prismáticos subédricos. A biotita se encontra marcando a foliação da rocha, com tamanhos de 0,32 mm a 0,8 mm, pleocroísmo de um verde pálido a verde, placoides euédricas a subédricas. Com 200 dias é possível observar fraturas no agregado de aproximadamente 1,76 mm a 2 mm, preenchidas por um material incolor e isotrópico, que foi inferido como o gel de sílica (produto da reação de RAA).

O biotita-actinolita xisto (Fig. 13 C), no qual apresenta a actinolita marcando a foliação com dimensões entre 0,32 mm e 0,64 mm, com pleocroísmo de um verde a verde escuro, com cristais aciculares anédricos. A biotita também é encontrada marcando a foliação da rocha, com aproximadamente 0,10 mm, pleocroísmo variando de um verde pálido a verde, com formas placoides e euédricas a subédricas. Ocorre também cristais de quartzo recristalizado de tamanhos menores que 0,16 mm e o feldspato de 0,07 mm a 0,14 mm, geminação segundo a lei albita e prismáticos subédricos. O outro agregado é classificado como um biotita-quartzo xisto (Fig. 13 D), com cristais de biotita marcando a foliação, medindo menos que 0,16 mm até 0,48 mm, pleocroísmo de um verde pálido a um verde amarronzado, placoides euédricas a subédricas. O quartzo ocorre majoritariamente recristalizado, com dimensões menores que 0,16 mm e alguns cristais únicos com até 0,16 mm e exibe extinção ondulante. Nas amostras de 200 dias, foram observadas em ambas as rochas fraturas preenchidas por gel de sílica (Fig. 13 D).

Na porção cimentada (Fig. 13 F) foram identificados minerais como quartzo, muscovita, goethita, hematita e magnetita em comum e há também clastos de rochas indefinidas. O quartzo ocorre predominantemente, mal selecionado variando de 0,16 mm a 2,56 mm, com extinção

ondulante e localmente recristalizados e em formatos subarredondados a subangulosos; a muscovita ocorre pontualmente na forma de diminutos cristais com hábito placoide e euédrica; a goethita, hematita e magnetita ocorrem como cristais anédricos. Na pasta de concreto são encontrados três tipos de clastos de rochas indefinidas, sendo um primeiro (Rx1) composto por carbonato em cristais arredondados, presença de óxido e hidróxido de ferro com formas alongadas (goethita) e óxidos possivelmente hematita, outro fragmento (Rx2) com biotita e quartzo e um terceiro (Rx3) constituído por um material fino indefinido.

Figura 13- Fotomicrografias das petrografias dos corpos de prova de concreto. A) Agregado de gnaisse milonítico visto em polarizadores cruzados. B) Agregado de gnaisse protomilonítico visto em nicóis cruzados. C) Agregado de biotita-actinolita xisto visto em polarizadores plano-paralelos. D) Agregado de biotita-quartzo xisto com detalhe para fratura preenchida visto em polarizadores plano-paralelos. E) Agregado de hornblenda gnaisse visto em polarizadores plano-paralelos. F) Pasta de cimento visto em polarizadores plano-paralelos. Kfs= Feldspato; Bt= Biotita; Qz= Quartzo; Hbl= Hornblenda; Ttn= Titanita; Rx1= Rocha indefinida 1; Act= Actinolita; Gth= Goethita.



Fonte: Autoria própria

6.2.2 Petrografia Formação de Etringita Tardia

Nas secções submetidas a formação de etringita tardia, foram observados basaltos de textura sub-ofítica de tonalidades mais claras (Fig. 14a) e mais escuras (Fig. 14b), devido a granulação mais fina e maior volume de material devitrificado (Quadro 3 e 4). Nessas rochas foi possível identificar um grau de alteração que varia de alto a baixo, devido a presença de celadonita, colorações mais esverdeadas, e argilominerais com coloração mais amareladas/alaranjadas. Os agregados são compostos por minerais essenciais como plagioclásio e piroxênio, e minerais acessórios como celadonita, argilominerais, ilmenita, material devitrificado, goethita e biotita.

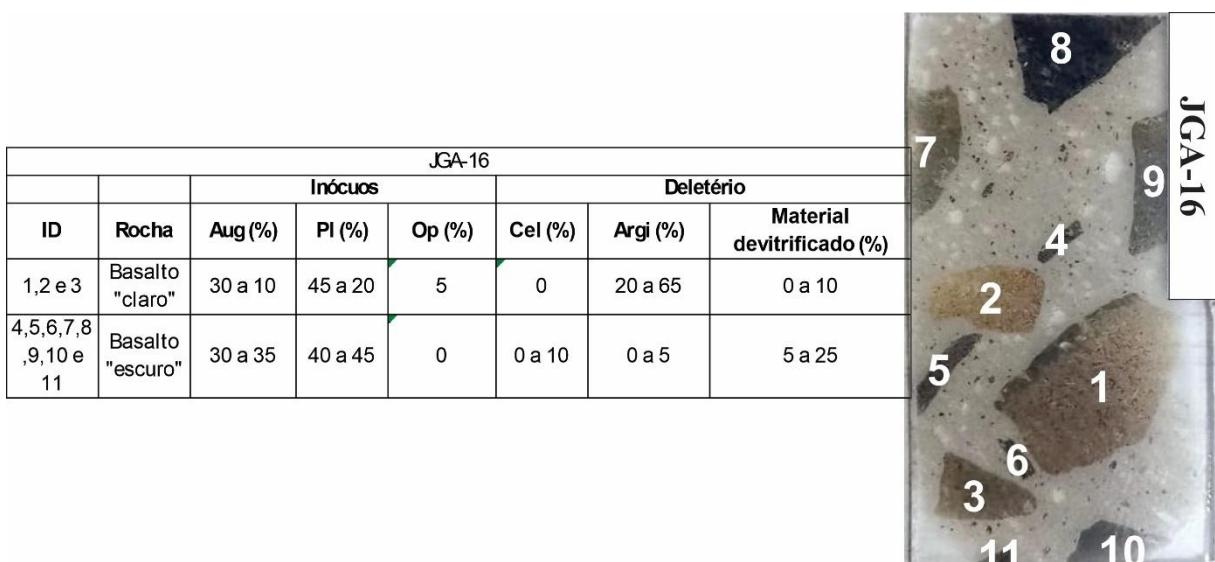
Quadro 3- Composição modal dos agregados da amostra JGA-01. Aug = Augita, Pl = Plagioclásio, Op = Opacos, Cel = Celadonita, Argi = Argilo Minerais.



JGA-01							
ID	Rocha	Inócuos			Deletério		
		Aug (%)	Pl (%)	Op (%)	Cel (%)	Argi (%)	Material devitrificado (%)
2, 3, 5, 6 e 7	Basalto "claro"	30-50	30-49	3-5	0	5-37	0
1 e 4	Basalto "escuro"	20-28	30-42	5-9	0-6	4-9	12-35

Fonte: Autoria própria

Quadro 4- Composição modal dos agregados da amostra JGA-16. Aug = Augita, Pl = Plagioclásio, Op = Opacos, Cel = Celadonita, Argi = Argilo Minerais.



Fonte: Autoria própria

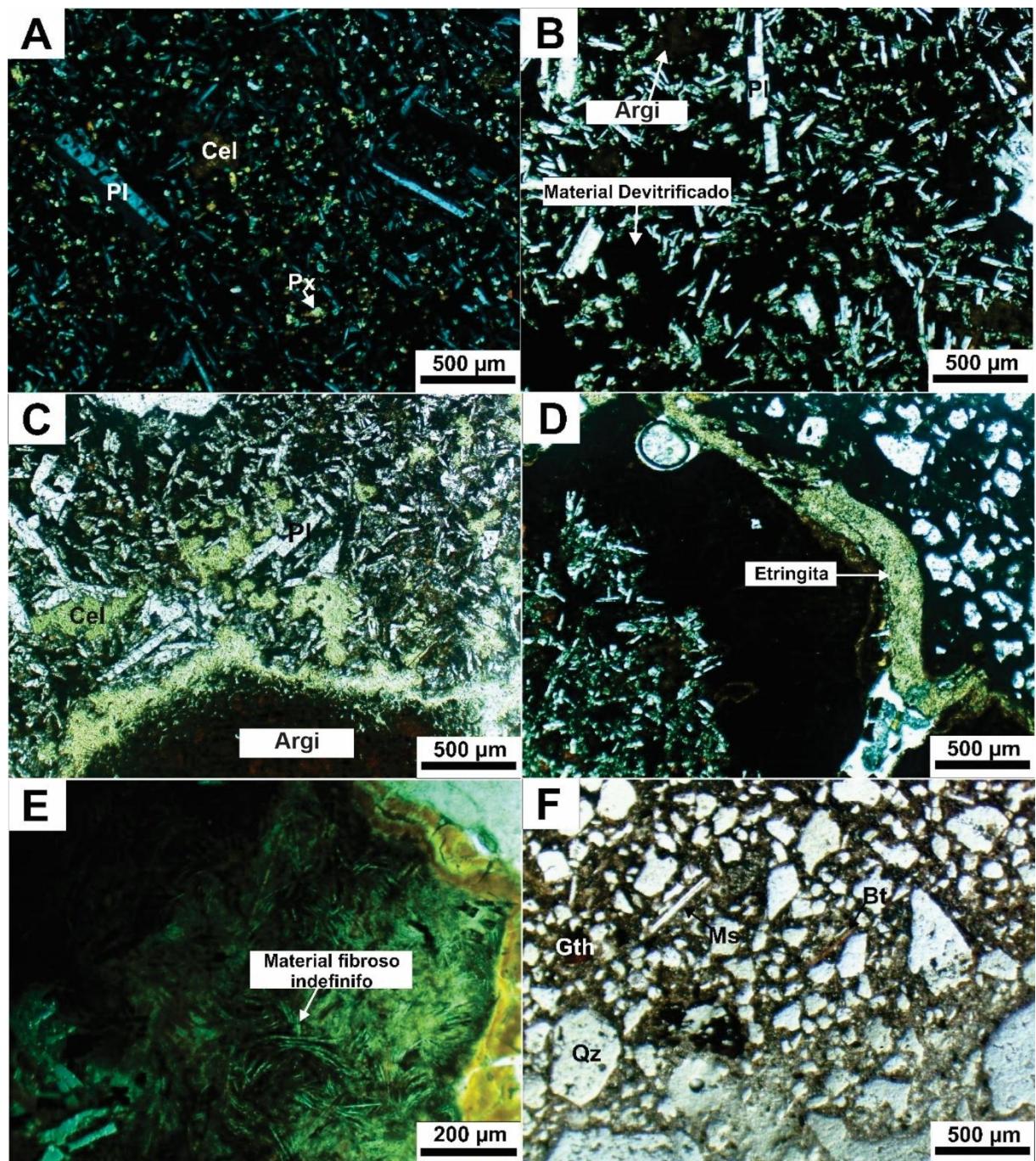
Os basaltos “mais claros” (Fig. 14 A) ocorrem pouco alterados e o plagioclásio ocorre em tamanhos menores que 0,16 mm e até 0,8 mm, com cristais com geminação segundo a lei albita, ou carlsbad, e um hábito ripiforme; e é possível encontrar cristais saussuritzados. Há resquícios de piroxênio em tamanhos maiores variando entre 0,16 mm e 0,32 mm, ou em maior quantidade e tamanhos menores de até 0,16 mm, prismáticos anédricos a subédricos. A celadonita, apresenta coloração verde e pode ocorrer como uma massa ao redor de vesículas (Fig. 14 C), substituindo o piroxênio, e associada aos argilo minerais com hábito radial. Os argilo minerais ocorrem como uma massa de coloração marrom avermelhada, entre os cristais de plagioclásio ou substituindo os piroxênios e preenchendo as vesículas (Fig. 14 C). A ilmenita também ocorre com dimensões entre 0,16 mm e 0,32 mm em formatos alongados e o material devitrificado ocorre em diferentes proporções dependendo do agregado.

O óxido e hidróxido de ferro, provavelmente goethita, tem coloração vermelho amarronzada e está associado as amigdalas, além de hornblenda como cristais anédricos em contatos irregulares com os plagioclásios e piroxênios, com zoneamento composicional mostrando uma borda mais esverdeada e um centro marrom. É observado também um material fibroso (Fig. 14 E), rodeado por argilo minerais de cor marrom acinzentada e na interface agregado/pasta, ocorre um material de coloração bege esverdeado no qual foi inferido como a etringita formada tardiamente (Fig. 14 D).

Os basaltos “mais escuros” (Fig. 14 B) se encontram pouco alterados e com uma quantidade de material devitrificado maior. Os cristais de plagioclásio variam de 0,16mm a 0,96 mm, com geminação segundo a lei albita, ripiforme e podem ocorrer com textura ofítica. Os piroxênios, alguns são encontrados variando de 0,32 mm a 0,48 mm e a maioria menores que 0,16 mm, com formas prismáticas subédricas a anédricas. A celadonita pode ou não ocorrer, porém em pouca quantidade, como uma massa de coloração esverdeada.

Na pasta (Fig. 14 F) há presença principalmente de quartzo, muscovita, goethita, feldspatos e argilo minerais. O quartzo se encontra com extinção ondulante, fraturado e pontualmente recristalizado, com tamanhos menores que 0,16 mm até 0,8 mm, subarredondados a subangulares. A muscovita ocorre de forma restrita, em tamanhos menores que 0,16 mm, placoides euédricas a subédricas; a goethita em cristais menores que 0,16 mm e anédricas; o feldspato se encontra com tamanhos pequenos (menor que 0,16 mm) e com geminação segundo a lei albita, prismáticos subédricos; os argilo minerais ocorrem como uma massa de coloração marrom avermelhado/esverdeado.

Figura 14- Fotomicrografias das petrografias dos corpos de prova de concreto. A) Basalto “claro” visto em nicóis cruzados. B) Basalto “escuro” visto em nicóis cruzados. C) Detalhe da massa de celadonita ao redor das amigdalas visto em polarizadores plano-paralelos. D) Detalhe para o material isotrópico na interface agregado/pasta visto em polarizadores plano-paralelos. E) Detalhe para o material fibroso e indefinido do agregado, visto em polarizadores plano-paralelos. F) Detalhe da pasta de cimento visto em polarizadores plano-paralelos. Pl= Plagioclásio; Cel= Celadonita; Px= Piroxênio; Qz= Quartzo; Argi= Argilo minerais; Gth= Goethita; Ms= Muscovita.



Fonte: Autoria própria

6.2.3 Petrografia Formação de Etringita Tardia + Reação Álcali Agregado

Os corpos de prova submetidos a ambas as patologias (DEF e RAA), apresentam agregados de gnaisses miloníticos (Fig. 15 B) e protomiloníticos (Fig. 15 C), anfibolito cisalhado (Fig. 15 A) e um biotita xisto (Fig. 15 D). A relação dos agregados e os minerais que os compõem está apresentada nos quadros 5 e 6.

Quadro 5- Composição modal dos agregados da amostra JGA-14. Kfs = Feldspato, Act= Actinolita, Bt = Biotita, Ms = Muscovita, Ep = Epidoto, Op = Opaco, Qz = Quartzo.



JGA-14

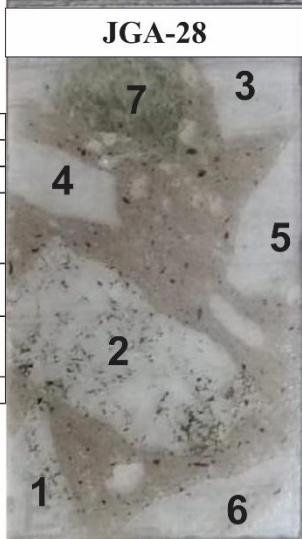
JGA-14

ID	Rocha	Inócuos						Deletério Qz* (%)
		Kfs (%)	Act (%)	Bt (%)	Ms (%)	Ep (%)	Op (%)	
1	Anfibolito cisalhado	29	57	4	0	10	<1	0
2, 5, 6, 7, 9 e 10	Gnaisse milonítico	20 a 44	0	1 a 4	1 a 8	1 a 5	0	50 a 75
3, 4 e 8	Gnaisse protomilonítico	59 a 70	0	3 a 9	0	3 a 4	0	15 a 35

* Quartzo deformando com extinção ondulante e recuperação de contatos.

Fonte: Autoria própria

Quadro 6-Composição modal dos agregados da amostra JGA-28. Kfs = Feldspato, Act= Actinolita, Bt = Biotita, Ms = Muscovita, Ep = Epidoto, Op = Opaco, Qz = Quartzo.



JGA-28

JGA-28

ID	Rocha	Inócuos						Deletério Qz* (%)
		Kfs (%)	Act (%)	Bt (%)	Ms (%)	Ep (%)	Op (%)	
1, 2 e 3	Gnaisse protomilonítico	60-70	0	15	0	0	0	15-25
4, 5 e 6	Gnaisse milonítico	35-45	0	5	0	0	0	50
7	Biotita Xisto	14	0	70	0	0	1	15

* Quartzo deformando com extinção ondulante e recuperação de contatos.

Fonte: Autoria própria

Os agregados de gnaisse com textura protomilonítica e milonítica, são compostos pela matriz, que é constituída predominantemente por quartzo e os porfiroclastos representados

pelos feldspatos. Seus minerais essenciais são os cristais de quartzo e feldspatos e de acessórios são encontrados biotita e actinolita.

Nos gnaisses protomiloníticos (Fig. 15 C), o quartzo ocorre recristalizado, variando de tamanhos menores que 0,16 mm até 0,32 e quando em cristais únicos apresentam tamanhos entre 0,48 mm e 0,8 mm, com extinção ondulante e recuperação de contatos, já o feldspato ocorre como porfiroclastos com 0,16 mm a 0,48 mm, com geminação segundo a lei albita ou em grade ou sem geminação, prismáticos subédricos. A biotita se encontra orientando a rocha, com tamanhos entre 0,16 mm e 0,64 mm, pleocroísmo de um verde pálido a verde, placoides euédricas a subédricas. Já a actinolita ocorre marcando a foliação, com dimensões entre 0,16 mm e 0,32 mm, com pleocroísmo variando de um verde a verde escuro, acicular subédrica.

Nos agregados de gnaisse com textura milonítica (Fig. 15 B), o quartzo ocorre principalmente recristalizado com dimensões de até 0,16 mm e alguns cristais únicos com até 0,8 mm, com extinção ondulante. Os feldspatos ocorrem como porfiroclastos de 0,16 mm a 1,28 mm, com geminação segundo a lei albita e em grade, prismáticos subédricos. Já a biotita ocorre orientada segundo a foliação, predominantemente em tamanhos pequenos (menores que 0,16 mm), porém com alguns cristais maiores de 0,64 mm a 1,44 mm, com pleocroísmo de um verde pálido a verde, com hábito placoide, euédrica e com contatos anastomosados em relação aos demais minerais.

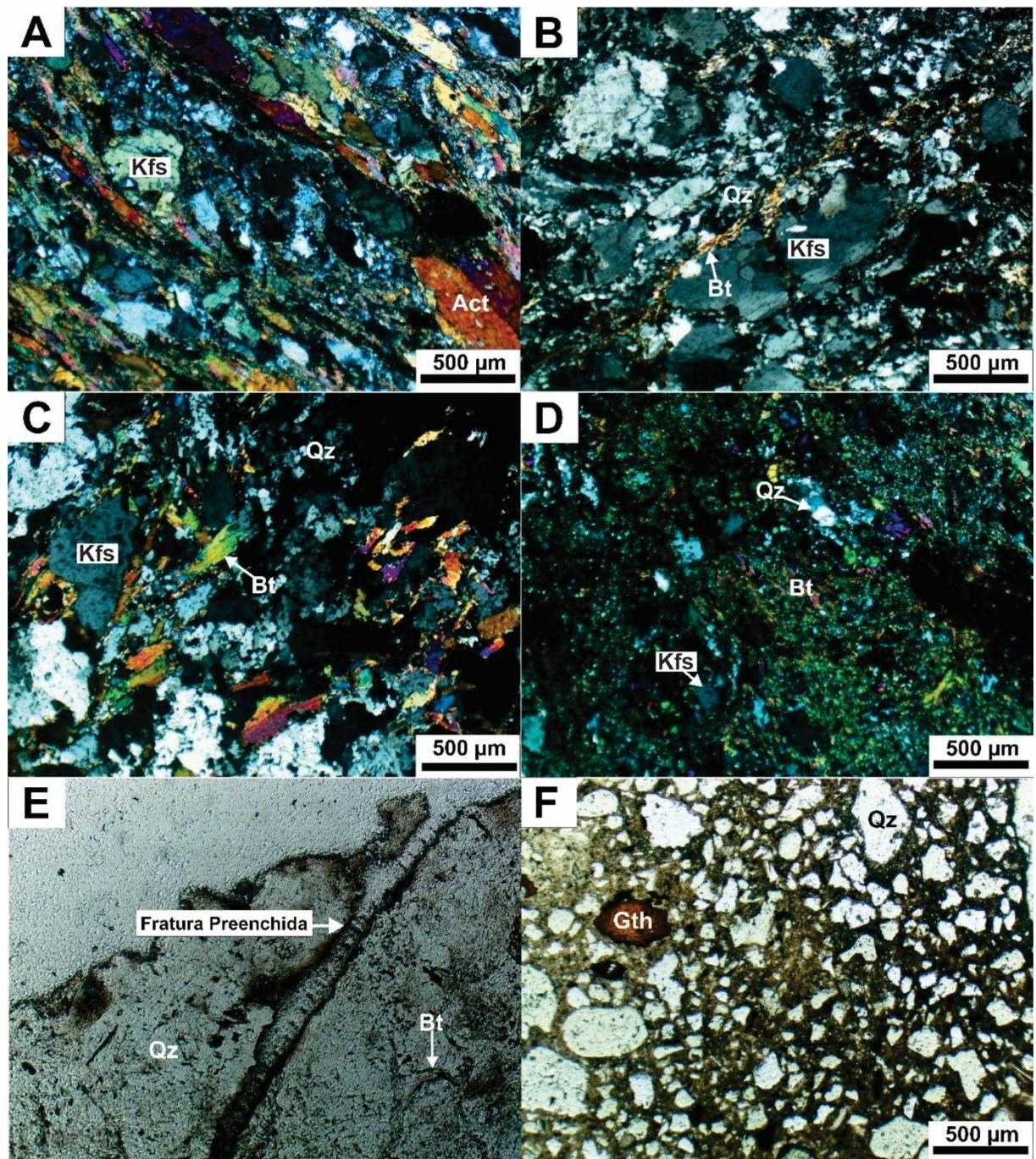
O agregado de anfibolito cisalhado (Fig. 15 A) apresenta textura nematoblástica e estrutura foliada, com mineralogia principal formada por anfibólito (actinolita), plagioclásio e epidoto, os minerais acessórios são quartzo, biotita e opacos. A actinolita marca a foliação e apresenta dimensões variando entre 2 mm e 2,5 mm, com pleocroísmo de um verde a um verde escuro, euédricos, com hábito acicular, em contato é possível observar quartos encaixados com extinção ondulante e opacos de formatos euédricos. O epidoto apresenta-se com agregados de cristais que se concentram nas bandas de cisalhamento, e a biotita ocorre substituindo a actinolita.

O agregado de biotita xisto (Fig. 15 D) apresenta textura lepidoblástica e estrutura foliada, é composto por biotita, quartzo e feldspato. A biotita ocorre foliando a rocha, com tamanhos menores que 0,16 mm até 0,32 mm, com pleocroísmo de um verde pálido a um verde, placoide euédrica. O quartzo se encontra localmente recristalizado com dimensões menores que 0,16 mm e em cristais maiores de até 0,16 mm e os feldspatos variam de tamanhos entre 0,16 mm e

0,64 mm com geminação segundo a lei albita e prismático subédricos. A rocha se encontra com fraturas preenchidas geradas pelas patologias (Fig. 15 E).

A pasta (Fig. 15 F) é composta por quartzo principalmente, muscovita, goethita, hematita, magnetita e feldspato potássico. O quartzo é encontrado mal selecionado, com tamanhos menores que 0,16 mm até 0,64 mm, com extinção ondulante e fraturados, pontualmente recristalizados, com formatos angulosos. As muscovitas ocorrem isoladas, com tamanhos menores que 0,16 mm, placoides euédricas; a goethita varia de tamanhos inferiores a 0,16 mm até 0,32 mm, com zoneamento apresentando uma borda mais escura (marrom a preto) e o centro mais claro (avermelhado) anédricas; a hematita e magnetita ocorrem em formatos anédricos; os feldspatos ocorrem também de forma restrita, de até 0,16mm e com geminação em grade, prismáticos subédricos a anédricos.

Figura 15- Fotomicrografias das petrografias dos corpos de prova de concreto. A) Agregado de anfibolito cisalhado visto em polarizadores cruzados. B) Gnaisse milonítico visto em polarizadores cruzados. C) Gnaisse protomilonítico visto em polarizadores cruzados. D) Agregado de biotita xisto visto em polarizadores cruzados. E) Detalhe para fratura preenchida no agregado de biotita xisto. F) Pasta vista em polarizadores plano-paralelos. Kfs= Feldspato; Act= Actinolita; Bt= Biotita; Qz= Quartzo; Gth= Goethita.



Fonte: Autoria própria

6.2.4 Petrografia Referência Reativa

As seções de referência reativa (RR) para a patologia de RAA, apresentaram agregados de gnaisses protomiloníticos (Fig. 16 D) e miloníticos (Fig. 16 C), epidoto-biotita xisto (Fig. 16 A), quartzito (Fig. 16 B), biotita-actinolita xisto (Fig. 16 G) e muscovita-quartzo xisto (Fig. 16 E). A relação das rochas e a porcentagem dos minerais é encontrado no quadro 7 e 8.

Quadro 7- Composição modal dos agregados da amostra JGA-09. Kfs = Feldspato, Act= Actinolita, Bt = Biotita, Ms = Muscovita, Ep = Epidoto, Op = Opaco, Qz = Quartzo.



JGA-09

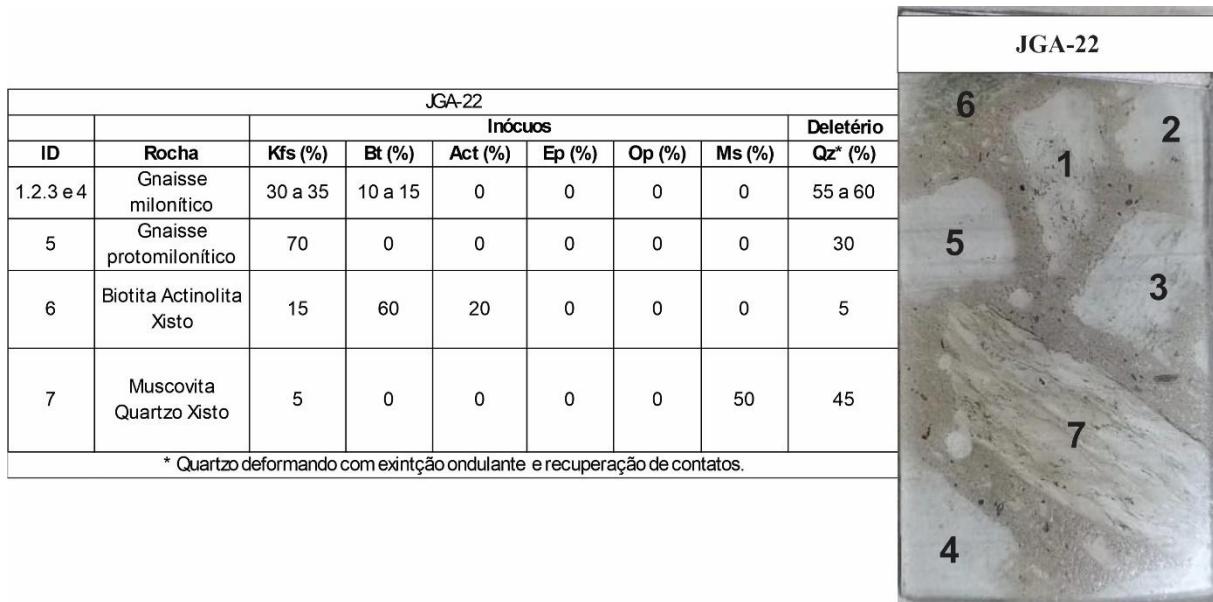
JGA-09

ID	Rocha	Inócuos						Deletério Qz* (%)
		Kfs (%)	Act (%)	Bt (%)	Ms (%)	Ep (%)	Op (%)	
1	Epidoto-biotita xisto	29	57	4	0	10	<1	0
2	Quartzito isotrópico	44	0	4	2	0	0	50
3	Gnaisses milonítico	40	0	1	1	1	0	57
4 e 5	Gnaisse protomilonítico	20	0	<1	5	<1	0	75

* Quartzo deformando com extinção ondulante e recuperação de contatos.

Fonte: Autoria própria

Quadro 8- Composição modal dos agregados da amostra JGA-22. Kfs = Feldspato, Act= Actinolita, Bt = Biotita, Ms = Muscovita, Ep = Epidoto, Op = Opaco, Qz = Quartzo.



Fonte: Autoria própria

Os agregados de gnaisse que apresentam textura protomilonítica e milonítica, são compostos por uma matriz constituída predominantemente por quartzo e os porfiroclastos representados pelos feldspatos.

Os agregados de gnaisse com textura protomilonítica (Fig. 16 D) presente nas seções, apresentam quartzo e feldspatos como minerais essenciais e como acessórios titanita, muscovita e biotita. Os cristais de quartzo ocorrem recristalizados com tamanhos diminutos (menor que 0,16 mm) e em cristais únicos que variam de 0,8 mm a 0,96 mm com extinção ondulante e recuperação de contatos, já os porfiroclastos de feldspatos se encontram variando de 0,16 mm a 1,28 mm, com geminação segundo a lei albita, em grade e carlsbad ou sem geminação, prismáticos subédricos. Os cristais de actinolita ocorrem em tamanhos menores que 0,16 mm, com pleocroísmo de um verde a verde escuro, euédricas a subédricas. A muscovita e a biotita são encontradas orientando a foliação, em cristais finos de até 0,16 mm, com hábito placoide e anastomosado; a titanita ocorre em até 0,16 mm, subarredondadas. Apenas um dos agregados descritos anteriormente foi reclassificado devido a sua porcentagem de quartzo, sendo ela de 75%, com isso reclassificado como quartzito (Fig. 16 B).

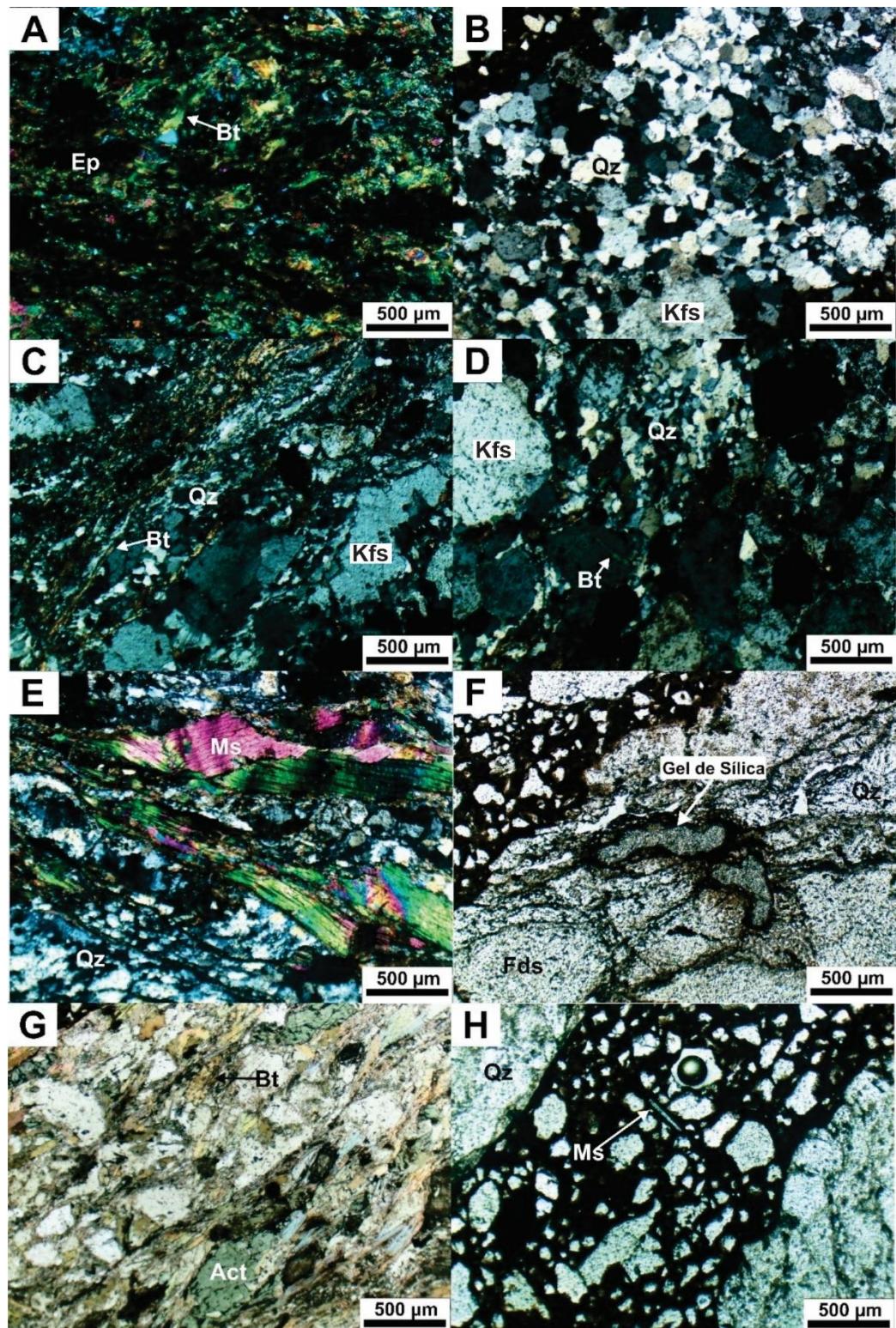
Os agregados de gnaisse com textura milonítica (Fig. 16 C) apresentam quartzo e feldspatos como essenciais e biotita e muscovita como secundários. O quartzo ocorre recristalizado em tamanhos muito pequenos (menor que 0,16 mm) compondo a matriz da rocha, porém localmente se encontram em cristais maiores de até 0,32 mm com extinção ondulante.

Os porfiroclastos de feldspatos encontram-se com tamanhos em torno de 1 mm, com geminação em grade e segundo a lei albita, prismáticos euédricos a subédricos. A presença de micas também sucede, a biotita ocorre orientada marcando a foliação da rocha, com tamanhos entre 0,16 mm e 0,32 mm, com pleocroísmo de um verde pálido a verde, placoide euédrica e a muscovita ocorre também com mesmas dimensões, isolada com hábito placoide.

O epidoto biotita xisto (Fig. 16 A) apresenta textura lepidoblástica e estrutura xistosa, com epidoto e biotita como minerais principais e quartzo e plagioclásio em menor quantidade. Os cristais de biotita ocorrem marcando a foliação, com tamanhos predominantemente entre 0,25 mm e 1,5 mm, com pleocroísmo de um verde pálido a verde, placoides euédricas; o epidoto se encontra como uma massa de granulação muito fina intercrescida com biotita e alguns cristais menores que 0,16 mm; o quartzo é encontrado em tamanhos pequenos (menor que 0,16 mm), anédrico encaixado nos espaços entre os cristais de biotita e o feldspato de até 0,16 mm, com geminação segundo a lei albita e cristais prismáticos anédricos.

O agregado de biotita actinolita xisto (Fig. 16 G), se encontra com estrutura xistosa e textura lepidoblástica. Apresentando como minerais essenciais a biotita e actinolita, os cristais de quartzo e hematita como minerais acessórios. A biotita é encontrada marcando a foliação, com tamanhos entre 0,16 mm e 0,48 mm, com pleocroísmo de um verde pálido a verde, placoides euédricas; já a actinolita encontra-se orientada segundo a foliação, em cristais de aproximadamente 0,64 mm, com pleocroísmo de um verde claro a verde escuro. O quartzo ocorre em porções recristalizado (tamanhos menores que 0,16 mm) e em cristais únicos maiores com até 0,48 mm e a hematita ocorre em tamanhos de até 0,16 mm, subédrica. O muscovita quartzo xisto (Fig. 16 E), apresenta estrutura xistosa e textura lepidoblástica, com minerais principais sendo a muscovita e o quartzo e em menor quantidade o feldspato. A muscovita ocorre marcando a foliação e apresenta estrutura de *micafish*, com tamanhos variando de 0,32 mm a 1,12 mm, placoides euédricas. O quartzo é encontrado recristalizado com dimensões menores que 0,16 mm, já os feldspatos ocorrem em tamanhos entre 0,32 e 1,28 mm, com geminação segundo a lei albita e carlsbad, subédricos.

Figura 16- Fotomicrografias das petrografias dos corpos de prova de concreto. A) Agregado de epidoto-biotita xisto visto em polarizadores cruzados. B) Agregado de quartzito isotrópico visto em polarizadores cruzados. C) Gnaisse milonítico visto em polarizadores cruzados. D) Gnaisse protomilonítico visto em polarizadores cruzados. E) Muscovita-quartzito xisto em nicóis cruzados. F) Detalhe da fratura preenchida por gel de sílica no agregado de gnaisse protomilonítico visto em polarizadores plano-paralelos. G) Biotita-actinolita xisto visto em polarizadores plano-paralelos. H) Pasta de cimento visto em luz natural. Ep= Epidoto; Bt= Biotita; Qz= Quartzo; Kfs= Feldspato; Rx= Rocha indefinida; Ms= Muscovita; Act= Actinolita;



Fonte: Autoria própria

Na pasta (Fig. 16 H) em ambas as seções são encontrados quartzo, goethita, muscovita e fragmentos rochosos, magnetita, hematita e biotita. O quartzo é encontrado mal selecionado, variando de tamanhos menores que 0,16 mm até 0,64 mm e pontualmente recristalizado, a goethita é encontrada com bordas mais escuras (marrom a preto) e o centro mais claro (avermelhado), em tamanhos de até 0,16 mm, a muscovita ocorre em tamanhos diminutos de aproximadamente 0,2 mm e formas placoides euédricas, dos fragmentos rochosos foi observado um clasto com epidoto e outros minerais indefinidos, com formato alongado e arredondado (Rx), outros dois clastos foram encontrados, um contendo biotita e muscovita, e um segundo com muscovita, quartzo com extinção ondulante e argilo minerais. A magnetita e hematita ocorreram em até 0,16 mm com formatos anédricos e a biotita com até 0,16 mm e pleocroísmo de um verde pálido a verde.

6.2.5 Petrografia Referência Inerte

Nas secções de referência inerte para a formação de etringita tardia, foram observados basaltos de textura subofítica de tonalidades claras (Fig. 17a) e escuras (Fig. 17b), a mineralogia dessas rochas está apresentada no quadro 9 e 10. Foi observado que os volumes de celadonita (Fig. 17d) e argilominerais (Fig. 17c) pode ser consideráveis nos agregados, de modo podem adquirir uma coloração mais esverdeada (celadonita), ou tons mais amarronzado/alaranjado (argilominerais). Os litotipos estudados apresentam plagioclásio e piroxênio como minerais essenciais e celadonita, argilo minerais e material devitrificado como secundários e há também ilmenita.

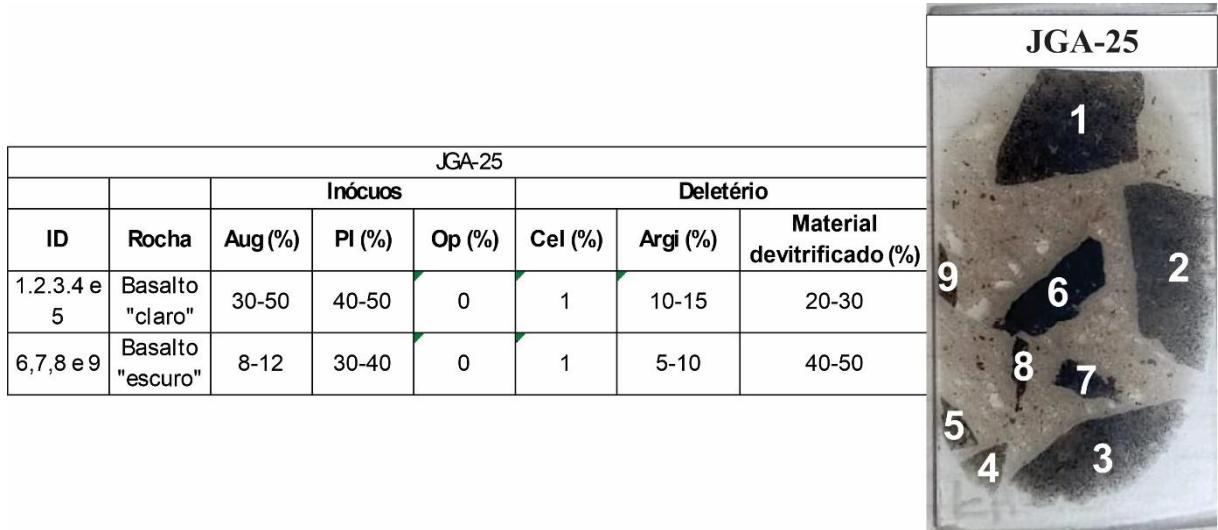
Quadro 9- Composição modal dos agregados da amostra JGA-11. Aug = Augita, Pl = Plagioclásio, Op= Opacos, Cel = Celadonita, Argi = Argilo Minerais.



JGA-11							
ID	Rocha	Inócuos			Deletério		
		Aug (%)	Pl (%)	Op (%)	Cel (%)	Argi. (%)	Material devitrificado (%)
3, 4, 5 e 6	Basalto "claro"	40-50	40-49	3-5	0	5-15	0
1, 2, 7 e 8	Basalto "escuro"	20-28	30-42	5-9	0-6	3-5	10-20

Fonte: Autoria própria

Quadro 10- Composição modal dos agregados da amostra JGA-25. Aug = Augita, Pl = Plagioclásio, Op= Opacos, Cel = Celadonita, Argi = Argilo Minerais.



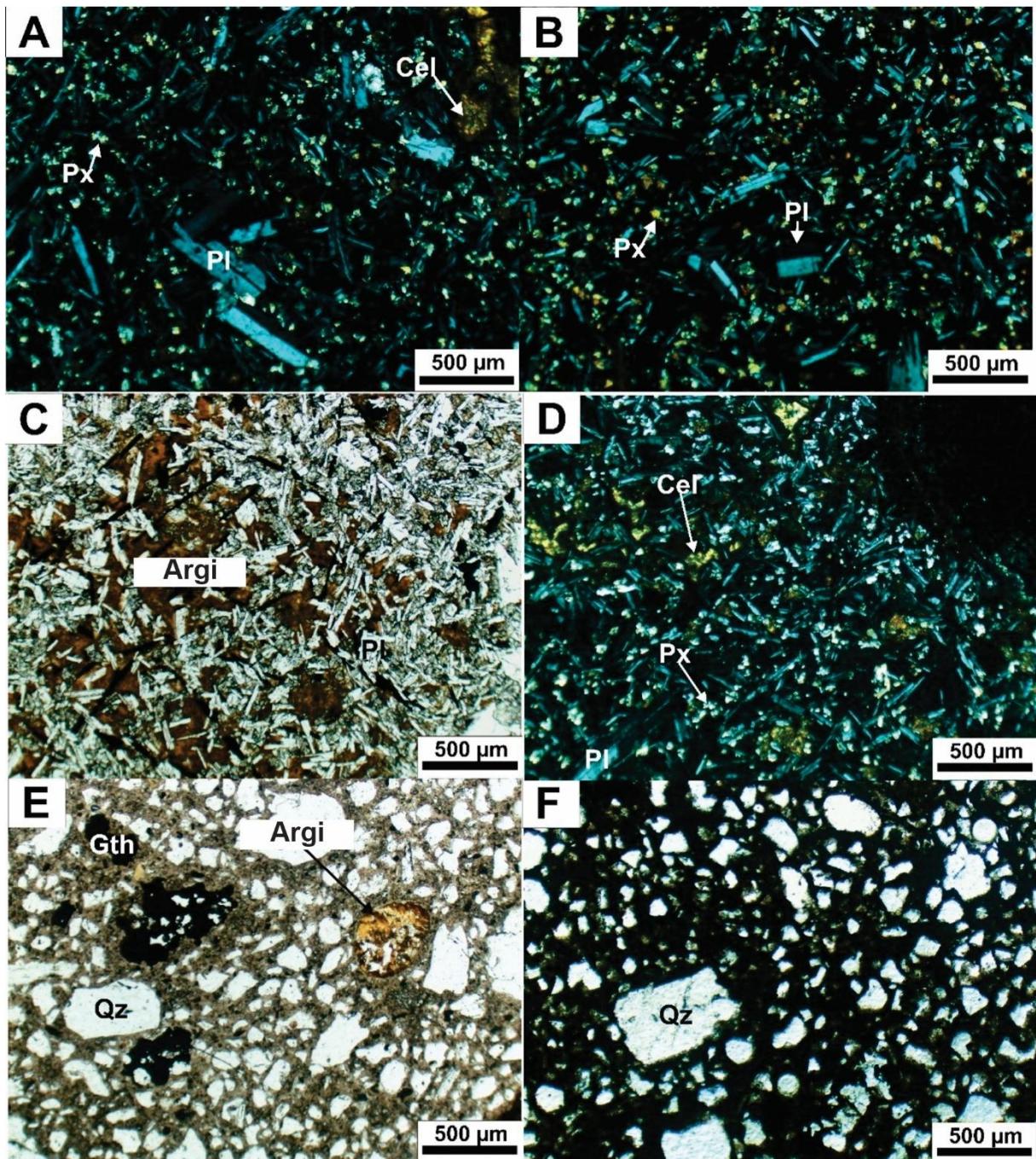
Fonte: Autoria própria

Nos basaltos de coloração mais clara (Fig. 17 A), o plagioclásio ocorre em fenocristais, com tamanhos menores que 0,16 mm a 0,8 mm, com geminação segundo a lei albita e calsbad, com formas prismáticas euédricas a subédricas. O piroxênio (augita), ocorre predominantemente com granulação pequena (menor que 0,16 mm) entre as ripas de plagioclásio e alguns cristais maiores de aproximadamente 0,48 mm, prismáticos subédricos, é encontrado localmente consumido no processo de uralitização formando anfibólito em grãos finos entre os cristais de plagioclásio. Os argilo minerais ocorrem também como uma massa irregular marrom escuro, é formado devido a alteração do vidro devitrificado. E o material devitrificado ocorre, porém em menor quantidade do que nos basaltos escuros. A ilmenita ocorre com tamanhos até 0,32 mm e alongadas.

Nos basaltos mais escuros (Fig. 17 B), o plagioclásio varia de tamanhos menores que 0,16 mm a 0,8 mm, com ou sem geminação segundo a lei albita e em forma de “ripas” euédricas a subédricas. Os cristais de piroxênio ocorrem em sua maioria menores que 0,16 mm e em cristais maiores de aproximadamente 0,32 mm, prismáticos subédricos. A celadonita pode ocorrer em grande quantidade como uma massa esverdeada entre os cristais de plagioclásio e piroxênio e ao redor das vesículas, ou em menor quantidade apenas no centro de argilo minerais com hábito radial. Os argilo minerais também são encontrados como uma massa marrom resultado da alteração do vidro e a ilmenita ocorrem com tamanhos entre 0,16 mm até 0,32 mm, com hábito alongado/acicicular cortando a celadonita e alguns subarredondados isolados.

Na pasta de cimento (Fig. 17 E e F), são encontrados minerais como quartzo, goethita, hematita, magnetita, muscovita, feldspato e epidoto. O quartzo ocorre mal selecionado em tamanhos menores que 0,16 mm até 1,28 mm, fraturados, com extinção ondulante e pontualmente recristalizados, com grãos predominantemente angulosos e outros mais arredondados, a goethita se encontra em cristais de até 0,16 mm, anédrico e cristais arredondados, a magnetita e hematita ocorrem isoladamente em granulação pequena (menor que 0,16 mm) e anédricas, a muscovita é encontrada pontualmente menor que 0,16 mm, placóides euédrica, os feldspatos também até 0,16 mm, maclados e formato prismático anédrico, já o epidoto ocorre em tamanhos diminutos (0,16 mm) e euédrico.

Figura 17- A) Basalto “claro” visto em polarizadores cruzados. B) Basalto “escuro” visto em polarizadores cruzados. C) Detalhe para o volume de argilo minerais na lâmina em polarizadores plano-paralelos. D) Detalhe para um volume maior de celadonita na lâmina em polarizadores cruzados. E e F) Pasta de cimento em polarizadores plano-paralelos e polarizadores cruzados respectivamente. PI= Plagioclásio; Cel= Celadonita; Px= Piroxênio; Gth= Goethita; Argi= Argilo minerais; Qz= Quartzo;



Fonte: Autoria própria

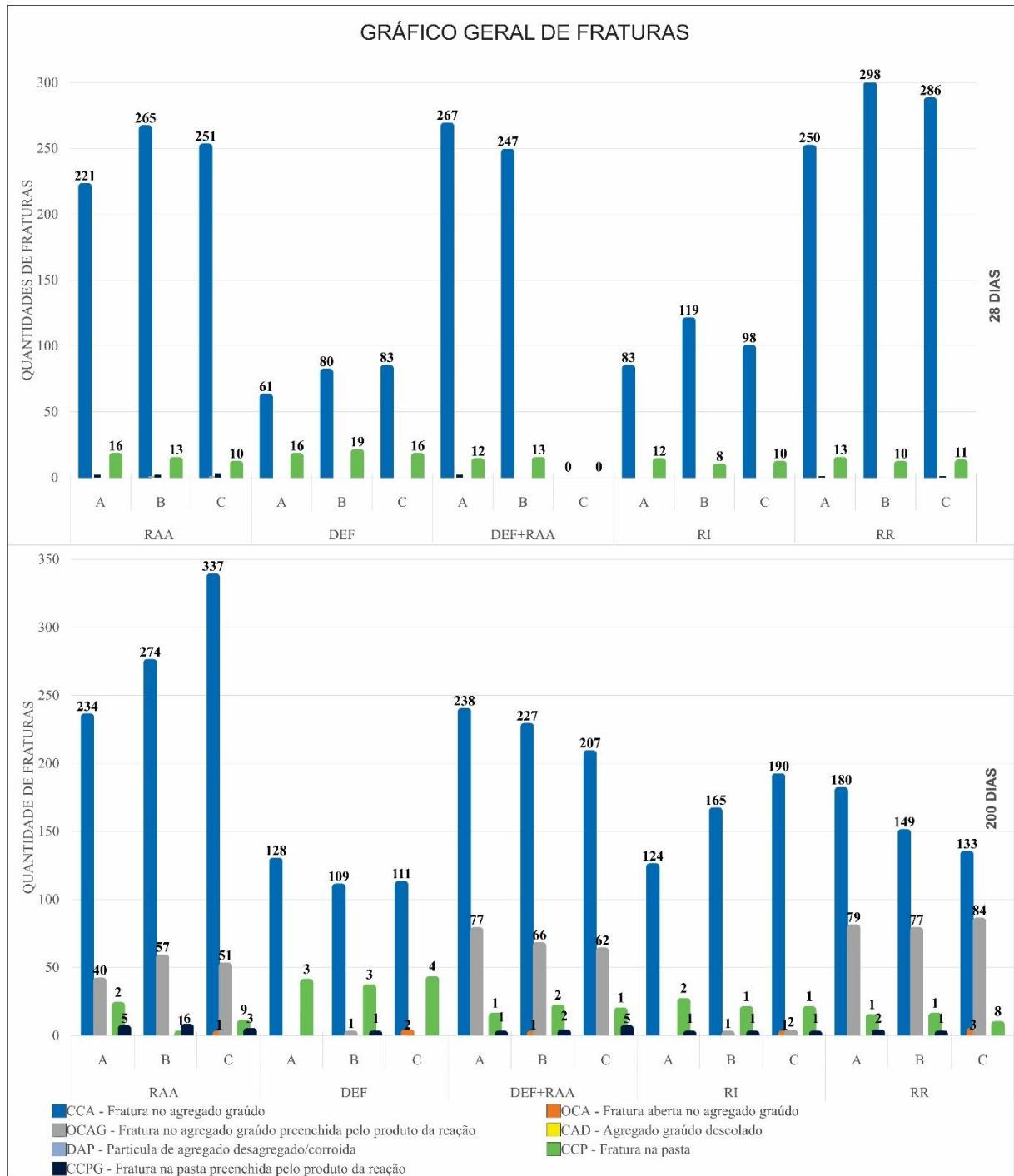
7 DISCUSSÕES

7.1 Evolução Textural

Por meio do método de DRI foi possível verificar que a reação álcali-agregado gerou um maior fraturamento do que a formação de etringita tardia, como demonstrado nos corpos de prova de RAA, RR e DEF+RAA que exibem valores de DRI maiores em relação aos corpos de prova DEF e RI (Gráfico 7). Tais dados indicam que a reação álcalis-agregado formou uma degradação mais relevante do que a formação de etringita tardia nas condições submetidas nesse trabalho, até a idade de 200 dias.

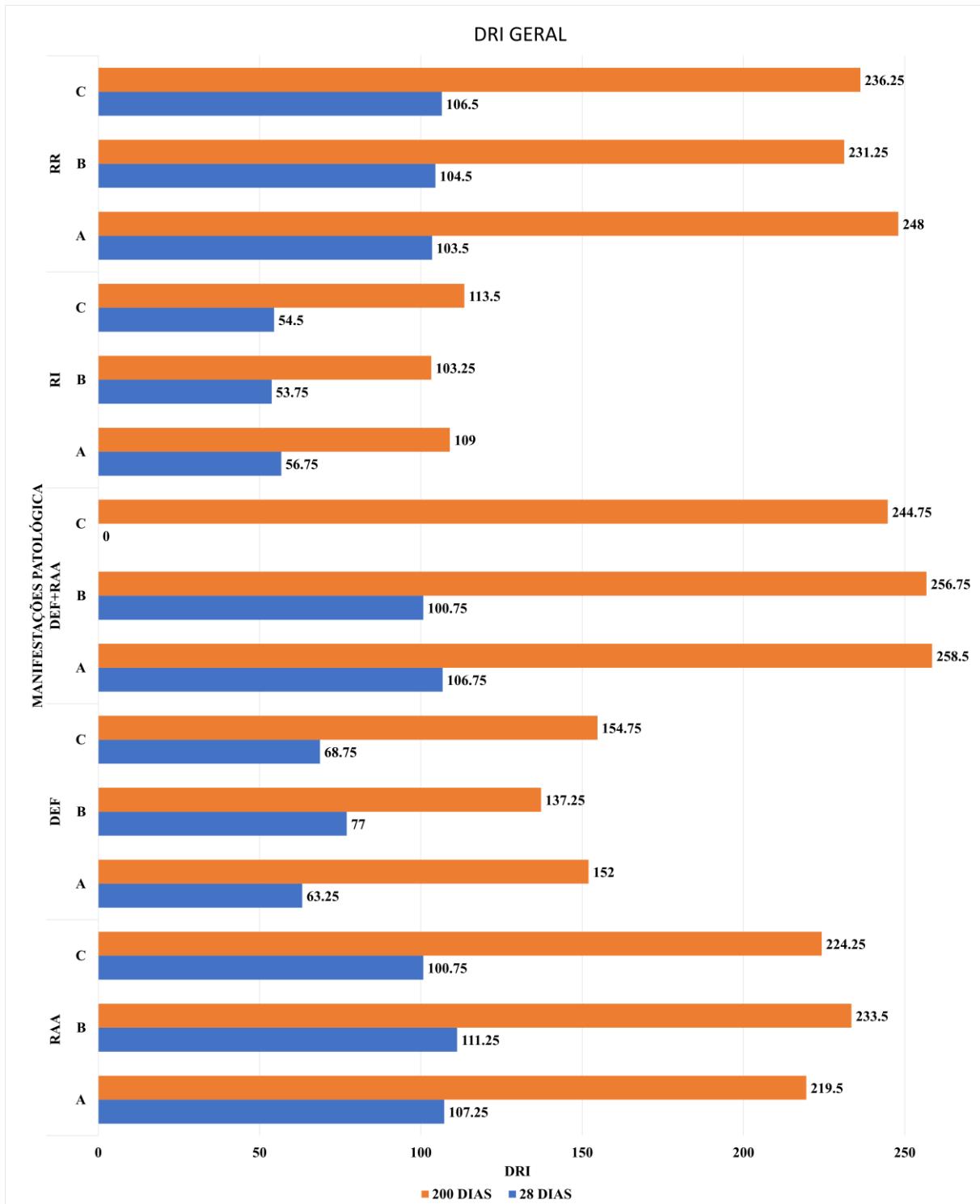
É possível observar também que o valor do DRI reflete o estado de degradação dos corpos de prova e a relação entre o tempo no qual o material está desenvolvendo as reações deletérias e os valores do índice. De modo que quanto maior o tempo, maior é a degradação (Gráfico 6) e consequentemente o maior o valor final de DRI (Gráfico 7)

Gráfico 6- Quantidade geral de fraturas em todos os corpos de prova e manifestações patológicas.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 7- Valores de DRI gerais em todos os corpos de prova e manifestações patológicas.



Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova com 28 dias contêm principalmente CCA que têm um menor fator de ponderação e pode ser entendido que ocorre com maior facilidade, já com 200 dias fraturas mais desenvolvidas começam a surgir, principalmente quando relacionado ao RAA, como as fraturas preenchidas pelos produtos da reação.

É possível discutir também que os valores de DRI dos corpos de prova de RAA e RR com 200 dias exibem valores similares (Tabela 4), com valores entre 200 e 250, apesar de serem armazenados em temperaturas diferentes. Os corpos de prova de RR foram fabricados com o intuito da reação não ocorrer de forma acelerada ao contrário do RAA, porém mesmo assim o valor de DRI gerado foi similar nos dois grupos; indicando a elevada reatividade do material.

	RAA			RR		
	A	B	C	A	B	C
DRI 28 dias	107.25	111.25	100.75	103.5	104.5	106.5
DRI 200 dias	219.5	233.5	224.25	248	231.25	236.25

Já para os valores de DEF e RI verificou-se uma diferença efetiva nos valores de DRI entre os dois grupos, pois os valores de RI não ultrapassam 60 nas amostras de 28 dias e 125 nas amostras de 200 dias, já os valores de DEF são superiores a 75 para 28 dias e estão na ordem de 150 para 200 dias. Com isso observa-se que o tratamento térmico inicial contribuiu para o desenvolvimento da etringita tardia.

Comparando as duas patologias nas condições às quais foram submetidas nesse trabalho, nota-se que a reação álcali agregado gerou uma maior degradação nos corpos de prova, quando comparada com a formação de etringita tardia até os 200 dias. Também, que a reação álcalis-agregado tende a gerar um volume maior de fraturas preenchidas pelo material gerado na reação. Na DEF é possível observar que não foram desenvolvidas fraturas preenchidas, mas principalmente as fraturas sem preenchimento no agregado graúdo.

7.2 Evolução Mineralógica

Na análise petrográfica não foi possível observar a etringita nas amostras de DEF de 28 dias, o que é de se esperar pois não deveria ocorrer ainda a formação desse material. Mas foi possível observar minerais que podem contribuir para o desenvolvimento da RAA como o vidro vulcânico; o que pode ajudar no desenvolvimento da DEF (BROWN E BOTHE 1993; POOLE et al. 1996). Com as fraturas geradas pela RAA, é possível promover a entrada de umidade, com isso a mobilização de sulfatos presentes na pasta, ajudando de forma indireta a formação da etringita secundária (POOLE et al. 2016).

Perante a isso, o basalto utilizado pode ter potencial reativo, devido a quantidade de material devitrificado (resultante da modificação do vidro vulcânico), que acima de 3% é considerado reativo (CSA A23.2-4 2014; ABNT NBR 15577-3: 2018) e nos litotipos analisados são encontradas quantidades entre 10% e 35%, um dos produtos principais dessa modificação são os argilo minerais, que se encontram no basalto substituindo os piroxênios e preenchendo as amigdalas (ABNT NBR 15577-3: 2018).

Dependendo do agregado de basalto é possível encontrar uma diferença no volume de materiais secundários, principalmente argilo minerais que é formado pela alteração do material devitrificado, e em alguns agregados ocorre um material fibroso indefinido. Além disso foram encontradas fraturas nos agregados e na interface agregado/pasta, no qual apresentam um material isotrópico preenchendo-as, considerado como a etringita tardia nas amostras de 200 dias, porém não é possível confirmar sem a realização do MEV.

Já as rochas que compõem os corpos de prova submetidos a reação álcali-agregado (RAA, RR e D+R), apresentam quartzo recristalizado como o mineral deletério em presença de álcalis (CSA A23.2-4 2014; ABNT NBR 15577-3:2018). O quartzo recristalizado ocorre principalmente nos gnaisses protomiloníticos e miloníticos, mas também ocorre nos agregados de muscovita-quartzo xisto, biotita xisto e actinolita-biotita xisto, com variações entre de 5% a 75% nos litotipos; esse mineral ocorre predominantemente com deformações intracristalinas (extinção ondulante) e recristalizado, com recuperação de contatos, granulação diminuta e em alguns casos sendo considerado como quartzo microcristalino. Com isso, quando há a presença de quartzo microcristalino, criptocristalino ou deformado em quantidades acima de 5%, os agregados são considerados potencialmente reativos (CSA A23.2-4 2014; ABNT NBR 15577-3:2018). Com 200 dias foi possível observar nos agregados submetidos a RAA, fraturas preenchidas por um material isotrópico, considerado como o produto de reação dessa manifestação patológica.

8 CONCLUSÕES

Com o presente trabalho foi possível identificar os minerais que contribuem para o desenvolvimento da reação álcalis-agregado, entretanto não foi possível observar na microscopia óptica os minerais essas alterações ocorrendo sobre esses minerais, mesmo nas amostras com 200 dias. Em relação a composição modal, o objetivo foi parcialmente alcançado pois foi possível observar apenas em uma amostra de DEF de 200 dias a formação de material interpretado como etringita tardia, e nas amostras RAA a presença de fraturas preenchidas possivelmente pelo produto desta reação; mas não ocorreram mudanças efetivas na moda dos

agregados graúdos e da pasta. De modo geral as rochas utilizadas para apresentam potencialidade reativa para a manifestação patológica de RAA, que foi evidenciada através do método do DRI. Essa reatividade se dá devido a presença de minerais deletérios encontrados na análise petrográfica, dentre eles o quartzo recristalizado, fraturado e deformado e o material devitrificado.

Em relação ao DEF, com a petrografia e o DRI não foi possível observar eficiência na reação nos períodos estipulados, necessitando um tempo maior para seu desenvolvimento. Por fim, verificou-se que além do DRI ser eficiente para avaliar a degradação do concreto, também fornece indícios do tipo de manifestação que está se desenvolvendo e a petrografia associada ao DRI, mostra um detalhamento e uma precisão melhor na interpretação dos dados, pois com a análise das rochas presentes no concreto, foi possível identificar minerais característicos dessas reações, reforçando melhor os dados obtidos.

9. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 15577: Agregados: reatividade álcali-agregado.* Rio de Janeiro, jul. 2018.
- BERGMANN, M.** et al. *Basaltos amigdalóides à zeolitas da formação Serra Geral da Bacia do Paraná: potencial para uso agronômico.* In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM**, 2013. Anais [...]. p. 168–180.
- BERGMANN, M.** et al. *Considerações sobre o potencial de uso agronômico das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná.* Porto Alegre: UFRGS, 2014.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION.** *BS 812-104: Testing aggregates. Part 104, Method for qualitative and quantitative petrographic examination of aggregates.* London, 1994.
- BRITO NEVES, B. B.** *O mapa geológico do Nordeste Oriental do Brasil, Escala 1:1.000.000.* 1983. **Tese** (Livre-Docência) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 177 p.
- BROWN, P. W.; BOTHE, J. V.** The stability of ettringite. *Advances in Cement Research*, v. 5, n. 18, p. 47–63, 1993.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION.** *CSA A23.2-4 – Concrete materials and methods of concrete construction. Appendix B – Alkali–aggregate reaction.* Toronto, 2009 (Reafirmado em 2014).
- CARMONA, L. C. M.** *Geologia, geoquímica e avaliação econômica do migmatito "Rosa Imperial", domínio meridional da Província Borborema, nordeste brasileiro.* 2002. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- CARMONA, Luis Christian de Montreuil.** Geologia, geoquímica e avaliação econômica do migmatito "Rosa Imperial", domínio meridional da Província Borborema, nordeste brasileiro. 2002. 126 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.
- FELTEN, D.; GRAHL, K. F. S.; LONDERO, C.** Levantamento de manifestações patológicas em marquises de concreto armado. *Revista Thêma et Scientia*, v. 3, n. 1, 2013.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M.-A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 27, n. 2, p. 167–191, 2000.

GOGTE, B. S. An evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkali-aggregate reactions. *Engineering Geology*, v. 7, n. 2, p. 135–153, 1973.

LE MAITRE, R. W. (ed.). *A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences - Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1989. 193 p.

MARIO, L. *Aspectos da estratigrafia das sequências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil*. 1996. **Tese** (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

MARTIN, Renaud-Pierre et al. Evaluation of different techniques for the diagnosis & prognosis of Internal Swelling Reaction (ISR) mechanisms in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 956-964, 2017.

MEDEIROS, V. C. *Aracaju NE: folha SC.24-X estados da Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Escala 1:500.000*. Brasília: CPRM, 2000. 1 CD-ROM.

MEDEIROS, V. C. et al. O furo estratigráfico de Riacho Fechado (Currais Novos/RN), domínio Rio Piranhas-Seridó (província Borborema, NE Brasil): procedimentos e resultados. *Estudos Geológicos*, v. 27, n. 3, p. 3–44, 2017.

MEDEIROS, V. C.; SANTOS, E. J. *Folha Garanhuns (SC.24-X B, escala 1:250.000)*. Integração Geológica (Relatório Interno). Recife: CPRM, 1998.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, S. K. *Study of delayed ettringite formation in Portland cement by hydration heat*. 2010. **Tese** (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

MILANI, E. J. et al. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 4, p. 473–484, 1998.

MILANI, E. J. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-oriental.* 1997. **Tese** (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MORAES, J. R. A. *Mapeamento geológico e geologia estrutural da região de Bom Conselho, Pernambuco.* 2022. **Trabalho de Conclusão de Curso** – Universidade (não informada), [local não informado].

OLIVEIRA, R. G.; SANTOS, E. J. Seção geológica-geofísica e inferências geotectônicas na porção centro-sul da Província Borborema. In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA**, 3., 1993, São Paulo. Anais [...]. v. 1, p. 643–747.

PERIN, Laisy Meurer et al. Avaliação da interação de mecanismos expansivos em concreto produzido com areia de minério de ferro. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

POOLE, A. B.; PATEL, H. H.; SHIEKH, V. Alkali silica and ettringite expansions in ‘steam-cured’ concretes. In: SHAYAN, A. (Ed.). *Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. Melbourne: [s.n.], 1996. p. 943–948.

POOLE, A.; SIMS, I. (Ed.). *Concrete petrography: a handbook of investigative techniques*. Boca Raton: CRC Press, 2016.

SANCHEZ, L. F. M. et al. Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). *Cement and Concrete Research*, v. 67, p. 74–92, 2015.

SANCHEZ, L. F. M.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B. Assessing condition of concrete affected by internal swelling reactions (ISR) through the Damage Rating Index (DRI). *Cement*, v. 1, p. 100001, 2020.

SANTOS, E. J. *Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrecionalária na Província Borborema.* In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 39., 1996, Salvador. Anais [...]. Salvador: SBG, v. 6, p. 47–50.

SANTOS, E. J. *Integração geológica e metalogenética, escala 1:250.000, Folha SC.24-X-A Belém do São Francisco, Província Borborema, NE do Brasil.* Recife: CPRM, 1998.

SANTOS, E. J. *O complexo granítico Lagoa das Pedras: acresção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema.* 1995. **Tese** (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2219 p.

SANTOS, E. J.; BRITO NEVES, B. B. Província Borborema. In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUY, Y. (coord.). *O Pré-Cambriano do Brasil.* São Paulo: Edgar Blucher, 1984. p. 123–186.

SOUZA, V. C.; SOUZA, J. C.; ROLIM FILHO, J. L. *Diagnóstico do setor de rochas ornamentais e de revestimentos do Estado de Pernambuco.* Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007.

TAYLOR, H. F. W. Sulfate reaction in concrete. In: *Réseau de centres d'excellence sur les bétons à haute performance.* Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Université de Sherbrooke, 1997.

THOMAS, M. D. A.; FOLLIARD, K. J. Concrete aggregates and the durability of concrete. *Durability of Concrete Cement Composites*, v. 10, p. 247–281, 2007.

TOLOTTI, C. D. K. *Estudo dos argilominerais de basaltos da Província Magmática do Paraná, Região do Alto Uruguai-RS.* 2015. [Tese ou Dissertação, instituição não especificada].

VAN SCHMUS, W. R. et al. Application of U-Pb in Sm-Nd geochronology to understanding the geotectonic history of the Borborema Province, NE Brazil, and its implications for the evolution of West Gondwana. In: **SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY**, 1997, Campos do Jordão-SP. *Extended Abstracts*. p. 27–29.

VAN SCHMUS, W. R.; KOZUCH, M.; BRITO NEVES, B. B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: Insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 31, p. 227–252, 2011.

VILLENEUVE, V.; FOURNIER, B.; DUCHESNE, J. Determination of the damage in concrete affected by ASR – the damage rating index (DRI). In: *14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)*. Austin, Texas (USA), 2012.

