

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na
verificação da reação álcali-agregado**

Laila Valduga

Porto Alegre
Dezembro de 2007

LAILA VALDUGA

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO DA
ASTM C 1260 NA VERIFICAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-
AGREGADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre
Dezembro de 2007

LAILA VALDUGA

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO DA
ASTM C 1260 NA VERIFICAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-
AGREGADO**

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 10 de dezembro de 2007

Prof.a Denise C. C. Dal Molin
Dra. pela Universidade do Estado de São Paulo
Orientadora

Prof. Vladimir Antonio Paulon
Dr. pela Universidade do Estado de São Paulo
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Selmo Chapira Kuperman (USP)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Nicole Pagan Hasparyk (FURNAS Centrais Elétricas S.A.)
Dra pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
PhD. pela Leeds University, UK

Ofereço este trabalho a Deus, único e pleno em sua sabedoria, pois somente agradecê-Lo, pela sua infinita bondade em nos possibilitar crescer através do conhecimento, seria pouco.

AGRADECIMENTOS

Fazer os agradecimentos de um trabalho de quatro anos é tarefa nada simples. Foram muitos os passos desta caminhada e, em muitos deles, tive companhia. Para contornar um obstáculo, para avançar mais rapidamente, para escolher a direção certa em uma encruzilhada, para não cair diante de um tropeço e, principalmente, para levantar e continuar a caminhada quando me sentei à beira do caminho, desanimada e cansada.

Agradeço, primeiramente, aos meus orientadores, Prof.^a Denise C. C. Dal Molin e Prof. Vladimir Antonio Paulon, uma parceria formidável. Seus conhecimentos sempre fizeram parecer simples a mais instigante das dúvidas.

Agradeço à Universidade do Oeste de Santa Catarina, onde trabalho, pela colaboração em todos estes anos e pelo incentivo ao meu aperfeiçoamento. O apoio foi de todos, mas personifico meus agradecimentos ao Reitor Prof. Aristides Cimadon, e ao Coordenador do curso de Engenharia Civil, Prof. Sady Zago. Este último, em especial, pelo seu apoio irrestrito e constante, às minhas pesquisas.

À Cia. de Cimento Itambé, através dos engenheiros Jorge Aoki e Aline Rosa Martins, pela doação do cimento empregado na pesquisa, pela contribuição no processo de coleta das amostras de agregado, e também pela contribuição técnica em todos os momentos que necessitei. É uma satisfação poder contar com o auxílio de profissionais de tão alto gabarito.

Ao LACTEC, nas pessoas do prof. Paulo Roberto Chamecki, Betina Lepretti Medeiros, Eustáquio Ferreira e Kleber Franke Portella. As portas deste excelente instituto sempre estiveram abertas para mim. Agradeço imensamente pelo apoio, e temo não ser digna de tanta distinção. Também ao geólogo Rodrigo Secchi e ao técnico Adilson, do Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR), pelo auxílio nas análises petrográficas.

Agradeço aos meus colegas da UFRGS, com os quais freqüentei algumas disciplinas, entre eles as amigas Francieli Tiecher e Edna Possan. À Francieli, pela troca constante de informações, já que somos pesquisadoras do mesmo tema, e à Edna, pelo auxílio na estatística dos dados. Com o auxílio de ambas o caminho se tornou mais fácil de ser trilhado.

Aos meus amigos, pelo fato de tornarem minha vida muito mais agradável. Eles constituem nosso apoio diário, nos dão a mão em momentos difíceis, ou simplesmente nos telefonam para

dizer que estão ali. É o suficiente, quando podemos chamá-los de amigos. Entre eles, à Fernanda Sgarbossa, minha ex-aluna e amiga querida, porque foi minha parceira de ensaios e nunca mediu esforços para me ajudar. Ainda mais importante, agradeço a minha amiga de mais longa data, desde os primeiros olhares e sorrisos, ainda bebê: minha irmã Sheila. Nossos laços de amizade são eternos, e agradeço a Deus por ela existir. Sua companhia na época das disciplinas cursadas na UFSC foi essencial.

Agradeço ao meu marido, Guilherme, meu par e meu complemento para todo o sempre. Ele, literalmente, carregou as pedras do caminho junto comigo, sem jamais reclamar de coisa alguma. Como a pessoa forte que é, me transmitiu firmeza, me fortaleceu, me deu confiança. Sua postura frente à vida, profissional e pessoal, me serviu de modelo em muitos momentos. A alegria por ele estar ao meu lado me serviu de alimento para a alma, em todo tempo.

E, por fim, e como tal o mais importante de tudo, agradeço aos meus pais. Mesmo se eu preenchesse páginas e páginas com agradecimentos, ainda assim esqueceria de algo. Foram os únicos a acompanharem todos os momentos desta trajetória. Incentivaram-me quando decidi começar o doutorado em uma cidade distante 520 km da nossa. Fizeram-me companhia nos dias de solidão em Porto Alegre. Percorremos muitos quilômetros juntos, e nestas viagens estreitamos cada vez mais nossa amizade, temos muitas histórias para contar, estamos ligados para a eternidade. Ouviram minhas lamúrias, enxugaram minhas lágrimas, me confortaram nas noites de pesadelos. Foram firmes comigo nos momentos necessários e nunca me deixaram desanimar. Moeram pedras comigo, me ajudaram a construir aparatos para auxiliar nos ensaios, foram meus auxiliares de leituras de ensaio em vários sábados, domingos, feriados... Para o amor, não existe folga de fim de semana.

Não existem palavras suficientes para agradecer aos meus pais, Dirceu e Bernardete, pelo quanto eles contribuíram para que eu concluísse este doutorado. A única coisa que posso fazer, eu creio, é agradecer a Deus por me dar este presente: me permitir sentir, durante esta vida tão frágil e curta, este amor tão intenso e incondicional pelos meus pais, e me sentir amada em igual intensidade.

“... Cada célula, todo fio de cabelo
Falando assim parece exagero
Mas se depender de mim
Eu vou até o fim

Não vim até aqui pra desistir agora
Não vim até aqui pra desistir”

Até O Fim
Engenheiros do Hawaii

“Eu vou a qualquer lugar, desde que seja em frente.”
Livingstone

RESUMO

VALDUGA, L. Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A reação álcali-agregado é uma patologia do concreto conhecida há mais de 60 anos no meio técnico, e envolve os álcalis, provenientes em maior parte do cimento, e certos constituintes mineralógicos dos agregados. O produto desta reação é um gel higroscópico, que, em contato com a água, aumenta de volume consideravelmente. Os danos decorrentes da reação envolvem principalmente o desenvolvimento de um quadro de fissuração intenso, o que acarreta outras diversas manifestações patológicas, e movimentações de peças estruturais. Os relatos mais freqüentes de ocorrência da reação sempre foram em estruturas hidráulicas, tais como as barragens, em função do permanente contato com a água. Entretanto, nos últimos anos, diversos outros tipos de estruturas têm sido afetados, inclusive fundações de edifícios, deixando o problema em evidência. O único modo de combater a reação é preveni-la através do uso de adições minerais, e para tal se faz necessário avaliar o agregado em questão, dispondo de um método de ensaio confiável. Este trabalho buscou analisar um dos métodos de ensaio mais utilizados no mundo todo para avaliar a reação álcali-agregado, a ASTM C 1260. Foram modificados alguns parâmetros de moldagem para verificar a influência destes nos resultados de expansão fornecidos pelo ensaio. Avaliaram-se os fatores: relação água/cimento, consistência da argamassa e forma do grão de agregado, e no total foram conduzidos 63 diferentes ensaios de expansão para analisar a influência destes fatores. Ensaio auxiliares foram realizados para justificar os resultados, e utilizou-se tratamento estatístico para verificação da validade dos mesmos. Foi observado que a forma de britagem do agregado, para posterior realização do ensaio, interfere diretamente nas condições de moldagem. E, o mais importante: isto resulta em expansões diferenciadas na idade de avaliação do agregado. Para evitar classificações errôneas de agregados através do uso da ASTM C 1260, uma norma usada em vários países, sugere-se que sejam fixados o maior número possível de parâmetros de moldagem.

Palavras-chave: reação álcali-agregado; durabilidade; método acelerado.

ABSTRACT

VALDUGA, L. Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The alkali-aggregate reaction is a concrete pathology known for more than 60 years, involving the alkalis (mostly from the cement), and some mineralogical components of the aggregates. The product of this reaction is a hygroscopic gel that, in contact with water, has its volume greatly increased. The damage resulting from this reaction is mainly a situation of intense cracking, which causes other pathological manifestations and movements of the structure. The most frequent reports of this reaction have always been in hydraulic structures, such as dams, caused by the permanent contact with water. However, in the last few years, many other kinds of structures have been affected, including building foundations; which brought the problem to international evidence. The only way to prevent the expansion caused by the reaction is the use of mineral admixtures as a substitute of part of the cement content, but first it is necessary to evaluate the aggregate in use, with a satisfactory test method. This work's purpose is to analyze one of the test methods commonly used throughout the world to evaluate the alkali-aggregate reaction, the ASTM C 1260. Some molding parameters have been modified so as to check their influence on the results of expansion obtained through this test. These factors have been evaluated: water/cement ratio, mortar consistency and shape of the aggregate particle. A total of 63 different tests of expansion were conducted to evaluate their influence. Additional tests were done so as to justify the results, and statistical analysis was used to validate the results. It was observed that the way the aggregate is crushed, for subsequent execution of the test, directly interferes in the conditions of molding. And, the most important: the way the aggregate is crushed results in different expansions and it is increased with the age of the evaluation of the test. To prevent a erroneous classification of the aggregates through the use of ASTM C 1260, a standard used in many countries, it is suggested that test conditions should be better defined.

Key-words: alkali-aggregate reaction; durability; accelerated method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: edifício residencial em Recife, de 10 anos de idade, apresentando reação álcali-agregado nos blocos de fundação.....	23
Figura 2 : reação álcali-agregado em estrutura viária na África do Sul.....	32
Figura 3: detalhe da mesma estrutura exibida na figura anterior.....	32
Figura 4: estrutura de fundação atingida por RAA, no Canadá.....	33
Figura 5: estrutura de fundação atingida por RAA, no Canadá.....	33
Figura 6: dormentes de concreto atingidos por RAA, em ferrovia na África do Sul.	34
Figura 7: reação álcali-agregado em estrutura de fundação no Canadá.....	34
Figura 8: representação esquemática do ataque de soluções alcalinas na sílica bem cristalizada.	37
Figura 9: representação esquemática do ataque de soluções alcalinas na sílica fracamente cristalizada.	37
Figura 10: composição da solução dos poros x tempo.....	38
Figura 11: mecanismo de formação do gel proveniente de RAA. a) formação do gel próximo ao agregado; b) movimentação do gel ao longo da pasta de cimento, com absorção de íons cálcio; c) gel no estado sólido, apresentando fissuras devido à retração.	40
Figura 12: esquema de progressão e consequência da expansão da RAA	41
Figura 13: textura, morfologia e composição de algumas rochas susceptíveis a RAA e características de desenvolvimento da reação.....	42
Figura 14: processo da reação álcali-agregado.....	44
Figura 15: amostra de basalto apresentando indícios de reatividade potencial (vidro vulcânico, em amarelo). Aumento: 50 x.	51
Figura 16: amostra de granito apresentando indícios de reatividade potencial (quartzo altamente deformado – Q). Aumento: 50 x.	52
Figura 17: representação da textura como difratogramas.....	56
Figura 18: figuras de pólo para o mineral biotita.....	57
Figura 19: correlação entre expansões medidas pela ASTM C – 1260 e a textura da rocha. ...	58
Figura 20: análise de rochas do estado de São Paulo segundo a NBR 9774/87.....	60
Figura 21: agregados de diferentes formas de grão, ensaiados com a mesma consistência. ...	64
Figura 22: agregados de diferentes formas de grão, ensaiados com consistência fixa e relações a/c fixas.....	64

Figura 23: agregados de diferentes formas de grão ensaiados com a relação a/c fixa 0,47.....	65
Figura 24: imagem de gel maciço gretado da reação álcali-agregado obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura.....	69
Figura 25: resumo do programa experimental.....	73
Figura 26: amostra BR (basalto reativo).....	76
Figura 27: amostra GP (granito potencialmente reativo).....	76
Figura 28: amostra GN (granito não reativo).....	77
Figura 29: moinho de rolos empregado na pesquisa (UFRGS).....	78
Figura 30: moinho de mandíbulas empregado na pesquisa (Lame/LACTEC).....	78
Figura 31: Abrasão Los Angeles empregado na pesquisa (Lame/LACTEC).....	79
Figura 32: amostras imersas em solução de NaOH a 1N.....	86
Figura 33: grãos colados nos porta-amostras, já metalizados.....	88
Figura 34: porção da matriz onde predomina anfibólio (A), clinopiroxênio (C), biotita (B) e minerais opacos (O). Aumento de 40x / luz polarizada.....	94
Figura 35: cristais de quartzo anédricos (Q) com orientação incipiente e forte extinção ondulante. Aumento de 40x / luz polarizada.....	94
Figura 36: feldspato potássico com intercrescimento perítico(F) e quartzo com extinção ondulante (Q). Aumento de 40x / luz polarizada.....	96
Figura 37: cristal de anfibólio (A) fraturado e parcialmente alterado para clorita. Aumento de 40x / luz polarizada.....	96
Figura 38: matriz de granulação fina a muito fina constituída por plagioclásio (P), clinopiroxênio (C) e minerais opacos (O). Aumento de 40x / luz polarizada.....	98
Figura 39: detalhe de cavidade preenchida por zeólita (Z) com celadonita nas bordas (cor verde). Aumento de 40x / luz polarizada.....	98
Figura 40: amostra GN La, aumento de 30x.....	100
Figura 41: amostra GN Ro, aumento de 30x.....	100
Figura 42: amostra GN La, aumento de 60x.....	100
Figura 43: amostra GN Ro, aumento de 60x.....	100
Figura 44: amostra GN La, aumento de 120x.....	100
Figura 45: amostra GN Ro, aumento de 120x.....	100
Figura 46: amostra BR La, aumento de 30x.....	101
Figura 47: amostra BR Ro, aumento de 30x.....	101
Figura 48: amostra BR La, aumento de 60x.....	101
Figura 49: amostra BR Ro, aumento de 60x.....	101

Figura 50: amostra BR La, aumento de 120x.....	101
Figura 51: amostra BR Ro, aumento de 120x.....	101
Figura 52: resultados do ensaio de índice de forma.....	102
Figura 53: amostra GN La.....	103
Figura 54: amostra GN Ro.....	103
Figura 55: amostra GP La.....	103
Figura 56: amostra GP Ro.....	103
Figura 57: amostra BR La.....	103
Figura 58: amostra BR Ro.....	103
Figura 59: influência do tipo de moagem na área específica das rochas.....	104
Figura 60: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,37, três moagens (S1).....	116
Figura 61: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,47, três moagens (S1).....	116
Figura 62: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,57, três moagens (S1).....	117
Figura 63: expansões até 182 dias, da rocha GN, três relações a/c e três moagens (S1).....	117
Figura 64: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,37, três moagens (S1).....	119
Figura 65: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,47, três moagens (S1).....	119
Figura 66: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,57, três moagens (S1).....	120
Figura 67: expansões até 182 dias, da rocha GP, três relações a/c e três moagens (S1).....	120
Figura 68: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,37, três moagens (S1).....	121
Figura 69: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,47, três moagens (S1).....	122
Figura 70: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,57, três moagens (S1).....	122
Figura 71: expansões até 182 dias, da rocha BR, três relações a/c e três moagens (S1).....	123
Figura 72: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,37, três moagens (S2).....	133
Figura 73: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,47, três moagens (S2).....	133
Figura 74: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,57, três moagens (S2).....	134
Figura 75: expansões até 182 dias, da rocha GN, três relações a/c e três moagens (S2).....	134
Figura 76: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,37, três moagens (S2).....	135
Figura 77: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,47, três moagens (S2).....	136
Figura 78: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,57, três moagens (S2).....	136
Figura 79: expansões até 182 dias, da rocha GP, três relações a/c e três moagens (S2).....	137
Figura 80: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,37, três moagens (S2).....	138
Figura 81: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,47, três moagens (S2).....	138
Figura 82: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,57, três moagens (S2).....	139
Figura 83: expansões até 182 dias, da rocha BR, três relações a/c e três moagens (S2).....	139

Figura 84: expansões até 28 dias da rocha GN, três moagens (S3).....	143
Figura 85: expansões até 182 dias, da rocha GN, três moagens (S3).....	143
Figura 86: expansões até 28 dias da rocha GP, três moagens (S3).....	144
Figura 87: expansões até 182 dias, da rocha GP, três moagens (S3).....	144
Figura 88: expansões até 28 dias da rocha BR, três moagens (S3).....	145
Figura 89: expansões até 182 dias, da rocha BR, três moagens (S3).....	145
Figura 90: análise da influência da moagem (amostras GN S1 057).....	150
Figura 91: análise da influência da idade (amostras GN S1 057).....	150
Figura 92: análise da influência da interação moagem x idade (amostras GN S1 057).....	151
Figura 93: comparativo entre os dados da série 1, rocha GN, 16 dias.....	153
Figura 94: comparativo entre os dados da série 1, rocha GN, 28 dias.....	153
Figura 95: comparativo entre os dados da série 1, rocha GN, 182 dias.....	154
Figura 96: comparativo entre os dados da série 1, rocha GP, 16 dias.....	155
Figura 97: comparativo entre os dados da série 1, rocha GP, 28 dias.....	155
Figura 98: comparativo entre os dados da série 1, rocha GP, 182 dias.....	155
Figura 99: comparativo entre os dados da série 1, rocha BR, 16 dias.....	156
Figura 100: comparativo entre os dados da série 1, rocha BR, 28 dias.....	156
Figura 101: comparativo entre os dados da série 1, rocha BR, 182 dias.....	157
Figura 102: comparativo entre os dados da série 2, rocha GN.....	157
Figura 103: comparativo entre os dados da série 2, rocha GP.....	158
Figura 104: comparativo entre os dados da série 2, rocha BR.....	158
Figura 105: comparativo entre os dados da série 3, 16 dias.....	159
Figura 106: comparativo entre os dados da série 3, 28 dias.....	159
Figura 107: comparativo entre os dados da série 3, 182 dias.....	159
Figura 108: amostra GN Ro 037 S1, aumento de 111 x.....	161
Figura 109: amostra GN Ro 037 S1, aumento de 221 x.....	161
Figura 110: amostra GN Ro 037 S1, espectro.....	162
Figura 111: amostra GN Ro 037 S2, aumento de 297 x.....	162
Figura 112: amostra GN Ro 037 S2, espectro.....	163
Figura 113: amostra GN La 037 S1, aumento de 134 x.....	164
Figura 114: amostra GN La 037 S1, aumento de 537 x (ampliação da imagem anterior).....	164
Figura 115: amostra GN La 037 S1, espectro.....	165
Figura 116: amostra GN La 037 S2, aumento de 87 x.....	165
Figura 117: amostra GN La 037 S2, aumento de 172 x.....	166

Figura 118: amostra GN La 037 S2, espectro.	166
Figura 119: absorção por imersão (médias) da Série 1.	172
Figura 120: absorção por imersão (médias) da Série 2.	172
Figura 121: absorção por imersão (médias) da Série 3.	172
Figura 122: índice de vazios (médias) da Série 1.	173
Figura 123: índice de vazios (médias) da Série 2.	173
Figura 124: índice de vazios (médias) da Série 3.	173
Figura 125: resistências à compressão das amostras da série S1.	178
Figura 126: resistências à compressão das amostras da série S2.	179
Figura 127: resistências à compressão das amostras da série S3.	179
Figura 128: gráfico “diâmetro de poro x volume acumulativo” - comparativo.	180
Figura 129: gráfico “diâmetro de poro x porosidade acumulativa” - comparativo.	181
Figura 130: correlação entre a porosidade e as expansões aos 182 dias de idade.	183
Figura 131: gráfico “diâmetro de poro x porosidade incremental” das amostras GN Ro 037 S1 e GN Ro 037 S2.	185
Figura 132: gráfico “diâmetro de poro x porosidade incremental” da amostra GN La 037 S1 e GN La 037 S2.	185
Figura 133: análise da porosidade das argamassas em função de dois critérios de tamanho de poro.	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: análise química do cimento CP V ARI utilizado.	74
Tabela 2: cadastro das amostras de agregado.	76
Tabela 3: eficiência de moagem para as três rochas e três tipos de moagem.	80
Tabela 4: quantidades aproximadas de amostras moídas.	81
Tabela 5: quantidades de cada fração da granulometria requerida pela ASTM C 1260.	81
Tabela 6: resumo das séries moldadas.	82
Tabela 7: resumo dos dados das moldagens da Série 1.	83
Tabela 8: resumo dos dados das moldagens da Série 2.	84
Tabela 9: resumo dos dados das moldagens da Série 3.	85
Tabela 10: mineralogia da amostra GN.	93
Tabela 11: mineralogia da amostra GP.	95
Tabela 12: mineralogia da amostra BR.	97
Tabela 13: resultados do ensaio de índice de forma.	102
Tabela 14: resultados de área específica e massa específica dos três tipos de rocha submetidos a moagens diferentes.	104
Tabela 15: análise dos valores obtidos para a massa específica das rochas.	105
Tabela 16: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GN, moagem Ma.	107
Tabela 17: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GN, moagem La.	108
Tabela 18: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GN, moagem Ro.	109
Tabela 19: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GP, moagem Ma.	110
Tabela 20: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GP, moagem La.	111
Tabela 21: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GP, moagem Ro.	112
Tabela 22: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado BR, moagem Ma.	113
Tabela 23: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado BR, moagem La.	114
Tabela 24: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado BR, moagem Ro.	115
Tabela 25: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GN, moagem Ma.	124
Tabela 26: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GN, moagem La.	125
Tabela 27: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GN, moagem Ro.	126
Tabela 28: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GP, moagem Ma.	127
Tabela 29: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GP, moagem La.	128
Tabela 30: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GP, moagem Ro.	129

Tabela 31: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado BR, moagem Ma.	130
Tabela 32: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado BR, moagem La.	131
Tabela 33: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado BR, moagem Ro.	132
Tabela 34: resumo dos resultados de expansão da Série 3, agregado GN, três moagens.	140
Tabela 35: resumo dos resultados de expansão da Série 3, agregado GP, três moagens.	141
Tabela 36: resumo dos resultados de expansão da Série 3, agregado BR, três moagens.	142
Tabela 37: análise de variância dos resultados de expansão da série S1 (moagem e idade).	147
Tabela 38: análise de variância dos resultados de expansão das séries S2 e S3 (moagem e idade).	148
Tabela 39: análise de variância para as amostras GN S1 057 (La, Ma e Ro).	149
Tabela 40: teste de Duncan entre amostras da série S1 e S2 - efeitos: idade e interação idade x moagem.	152
Tabela 41: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 1, moagem Ma.	167
Tabela 42: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 1, moagem Ro.	168
Tabela 43: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 1, moagem La.	168
Tabela 44: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 2, moagem Ma.	169
Tabela 45: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 2, moagem Ro.	169
Tabela 46: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 2, moagem La.	170
Tabela 47: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 3.	171
Tabela 48: análise de variância entre amostras da série 1, de mesma moagem, mas diferentes relações a/c.	175
Tabela 49: teste de Duncan entre amostras da série 1, de mesma moagem, mas diferentes relações a/c.	175
Tabela 50: análise de variância entre amostras da série 1, de mesma relação a/c, mas diferentes moagens.	176
Tabela 51: análise de variância entre amostras da série 2, de mesma relação a/c, mas diferentes moagens.	176
Tabela 52: análise de variância entre amostras da série 3, com diferentes moagens.	176
Tabela 53: teste de Duncan entre amostras da série 1, de mesmas relações a/c, mas diferentes moagens.	177
Tabela 54: teste de Duncan entre amostras da série 2, de mesmas relações a/c, mas diferentes moagens.	177
Tabela 55: teste de Duncan entre amostras da série 3, de diferentes moagens.	177
Tabela 56: tabela resumo dos dados do ensaio de porosimetria de mercúrio.	181

Tabela 57: dados da porosidade incremental por diâmetro de poro.	184
Tabela 58: porosidade incremental em função dos diâmetros dos poros.	186

LISTA DE SIGLAS

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM: American Society For Testing And Materials.

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura.

RAA: Reação Álcali-Agregado.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	20
1.2 JUSTIFICATIVA.....	26
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	27
1.3.1 Objetivos gerais.....	27
1.3.2 Objetivos específicos.....	27
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	27
1.5 LIMITAÇÕES.....	28
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 HISTÓRICO DO APARECIMENTO DA REAÇÃO.....	30
2.2 MECANISMO DA REAÇÃO.....	36
2.3 TIPOS DE REAÇÃO.....	44
2.3.1 Reação álcali-sílica.....	45
2.3.2 Reação álcali-silicato.....	46
2.3.3 Reação álcali-carbonato.....	47
2.4 ENSAIOS PARA DETECÇÃO DE AGREGADOS REATIVOS.....	48
2.4.1 Métodos de avaliação de agregados.....	49
2.4.1.1 Análise petrográfica.....	49
2.4.1.2 Análise de textura.....	53
2.4.1.3 Método Químico.....	58
2.4.2 Métodos de avaliação de concretos e argamassas.....	60
2.4.2.1 Método acelerado.....	60
2.4.2.2 Método dos prismas de concreto.....	67
2.4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	67
2.4.3 Métodos de avaliação de combinações cimento/agregado.....	69
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	72

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA	72
3.2 MATERIAIS	74
3.1.1 Cimento.....	74
3.1.2 Agregados.....	75
3.1.3 Aditivo.....	77
3.2 MÉTODOS	77
3.2.1 Ensaio Acelerado.....	77
3.2.1.1 Preparo das amostras	77
3.2.1.2 Variáveis analisadas na moldagem das argamassas	82
3.2.1.3 Leitura das barras de argamassa.....	85
3.2.2 Análise Petrográfica.....	86
3.2.2.1 Preparo das amostras	86
3.2.2.2 Metodologia de análise	87
3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura	87
3.2.4 Absorção por imersão.....	88
3.2.5 Porosimetria por mercúrio	89
3.2.6 Índice de forma.....	90
3.2.7 Área específica.....	90
4. RESULTADOS	92
4.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA	92
4.1.1 Rocha GN	92
4.1.2 Rocha GP	95
4.1.3 Rocha BR.....	97
4.2 FORMA DO GRÃO	99
4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura	99
4.2.2 Índice de forma	102
4.3 ÁREA ESPECÍFICA	104
4.4 ENSAIO ACELERADO	106
4.4.1 Série 1	106
4.4.2 Série 2.....	123

4.4.3 Série 3.....	140
4.4.4 Análise estatística.....	146
4.4.5 Correlação expansão, consistência e relação a/c.....	153
4.5 PRESENÇA DE PRODUTOS DE REAÇÃO.....	160
4.6 ABSORÇÃO POR IMERSÃO.....	167
4.7 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO.....	179
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	188
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	188
5.2 CONCLUSÕES.....	192
5.3 RECOMENDAÇÕES.....	194
REFERÊNCIAS.....	196
ANEXO A – ANÁLISES QUÍMICA E FÍSICA DO CIMENTO.....	203

1. INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Dentre todos os materiais utilizados na Engenharia Civil para tornar viável uma obra, o concreto é considerado um dos mais versáteis. Pode ser empregado em obras hidráulicas, obras marinhas, edificações urbanas e rurais, estruturas de grande porte como barragens, pontes e viadutos e também em pavimentação. Mesmo quando o concreto não é o principal material utilizado na estrutura, ele pode ser usado na vedação ou fechamento da obra, ou mesmo como parte de uma estrutura mista (concreto e aço).

Esta versatilidade se dá, em grande parte, pela facilidade com que o material pode ser confeccionado, sem a necessidade de processamentos industriais elaborados para a obtenção do produto final, como é o caso do aço.

O concreto pode ser definido, de maneira simples, como uma mistura em proporções adequadas de um aglomerante, agregados e água, podendo conter ainda adições minerais e aditivos químicos. Este proporcionamento é ajustado de acordo com as características desejadas do concreto, sejam elas almeçadas ainda no estado fresco ou no estado endurecido.

O aglomerante, geralmente um cimento Portland, promove a ligação das várias fases que compõe o concreto. Com o avanço das reações de hidratação das partículas de cimento, o sistema torna-se coeso, e os grãos de agregado miúdo e graúdo contribuem para a solidez e estabilidade do material.

Até alguns anos atrás, os agregados eram considerados materiais inertes no concreto, utilizados somente para contribuição do volume. Hoje, pesquisadores do mundo todo concordam que os agregados não são inertes e possuem um papel fundamental para a confecção de um concreto de qualidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994), uma vez que:

- a) possuem uma interface ativa com a matriz de aglomerante, além de proporcionar intertravamento mecânico;
- b) contribuem para a redução do calor de hidratação do concreto;
- c) melhoram características como a resistência à abrasão superficial;
- d) a sua forma influencia diretamente na trabalhabilidade do concreto;
- e) contribuem para a melhoria de propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, entre outras.

Além dessas influências significativas, o agregado também tem ligação direta com uma característica essencial em obras de engenharia: a durabilidade.

Alguns tipos de agregados podem conduzir a reações expansivas, que comprometem fortemente a vida útil do material. A reação álcali-agregado (RAA) é uma delas, sendo marcada pela formação de produtos que, uma vez em contato com água, expandem-se, gerando pressões e fissurações no concreto.

De acordo com Lacasse *et al.* (2003), as mudanças no volume destes produtos da reação álcali-agregado geram pressões internas na ordem de 6 a 7 MPa. Como o concreto comumente tem resistência à tração da ordem de 2 a 3 MPa, surge um quadro de fissuração que, em seguida, pode dar origem a outras manifestações patológicas do material, tais como o desencadeamento de processos de corrosão e infiltração de águas agressivas, refletindo negativamente em algumas propriedades mecânicas e elásticas. Swamy (1996) relata que em muitos países há uma degradação avançada das estruturas de concreto atingidas por RAA. Segundo o mesmo, depois de aproximadamente 1 ano de exposição, expansões da ordem de 0,6%, em um concreto levaram a perdas de 40% da resistência à compressão, 75% da resistência à flexão e 60% do módulo de elasticidade dinâmico. Hasparyk (2005) estudou as propriedades mecânicas de concretos afetados por RAA e verificou que estas são efetivamente modificadas ao longo do tempo em função da reação, principalmente o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.

O aparecimento da reação álcali-agregado resulta em deterioração progressiva das estruturas afetadas que, muitas vezes, são de grande porte. Os reparos são custosos e, na maioria das vezes, se faz necessária uma reabilitação da estrutura, para que esta se mantenha em

funcionamento (FORSTER, 1998). O problema se agrava devido ao número de estruturas afetadas. A reação álcali-agregado é um processo patológico que já se manifestou em vários países do mundo. Somente no Canadá existem mais de 1.000 estruturas afetadas (SWAMY, 1996).

O aumento da vida útil esperada das estruturas, somado à rapidez com que os projetos são concebidos e executados, de acordo com Grattan-Bellew (1997), evidencia ainda mais a necessidade de um método rápido e confiável para avaliar agregados, com a finalidade de evitar a ocorrência da reação álcali-agregado.

Até o presente momento, há duas formas de combater a RAA. A primeira delas é evitando o uso de agregados reativos em concretos que possam estar sujeitos a condições favoráveis à reação durante sua vida de serviço. Como nem sempre esta primeira opção é possível, já que, em alguns casos, a análise econômica força o uso de material reativo das proximidades da região da obra, uma segunda forma é buscada: fazer uso de inibidores da reação, tais como as adições pozolânicas e escórias de alto-forno.

Para as duas formas de precaução contra a RAA, torna-se essencial conhecer o agregado em questão e quantificar a sua reatividade, de modo a se poder utilizá-lo de forma mais segura. É necessário analisar as várias características relativas ao agregado, desde a formação e cristalização da rocha até a sua apresentação como material pétreo para concreto.

Existem diversos tipos de rochas no Brasil, com variadas mineralogias, em função da vasta extensão territorial e também dos processos geológicos que agruparam os minerais. Grande parte destas rochas é usada como agregado para concreto, sem que se disponha de um método completamente eficiente para avaliação de seu potencial em termos de desencadeamento da reação álcali-agregado.

Conforme a litologia da rocha e, conseqüentemente, o tipo de agregado utilizado em concreto, uma reação diferente se desenvolve e torna-se necessário um método de diagnóstico diferenciado. Em função da geologia predominante no território nacional, se manifestam com mais freqüência as reações do tipo álcali-sílica e álcali-silicato. A maior parte das barragens que apresentam esse tipo de deterioração em nosso país foram construídas com rochas do tipo quartzo-feldspáticas, tais como quartzito, granito e gnaisses, com ocorrências distribuídas por vasta faixa territorial (VALDUGA, 2002). A reação álcali-silicato é uma reação complexa e

ainda não perfeitamente compreendida, pois é mais lenta que as reações do tipo álcali-sílica e álcali-carbonato.

Existe no Brasil o conhecimento de mais de 30 barragens e usinas hidrelétricas atingidas por reação álcali-agregado, de acordo com Silveira *et al.* (2002), e este número tende a aumentar com o progresso de novos estudos nas estruturas já concluídas.

Casos recentes como o das fundações atingidas pela reação álcali-agregado em Recife (Figura 1) chamam a atenção da população para este problema. Andrade (2007) relata que a partir do final de 2004, com o desabamento do Edifício Areia Branca, despertou-se a necessidade da realização de inspeções nas edificações, incluindo as fundações. Com os primeiros casos ocorridos de fissuração, rapidamente foi feita a correlação com o diagnóstico realizado na Ponte Paulo Guerra (comprovadamente apresentando RAA em grande intensidade), devido à ocorrência visível de bordas de reação e de poros preenchidos com gel em testemunhos extraídos. Andrade (2007) relata que foram estimados 15 casos de fissuração em blocos de fundação na região metropolitana do Recife, de janeiro de 2005 até março de 2007. Em todos os casos em que foi realizado o ensaio petrográfico, foi confirmada a existência da reação álcali-agregado.



Figura 1: edifício residencial em Recife, de 10 anos de idade, apresentando reação álcali-agregado nos blocos de fundação (ANDRADE, 2007).

Sobre o mesmo caso de ataque de reação álcali-agregado em fundações de obras residenciais na região metropolitana do Recife, os autores Gallo *et al.* (2007) relatam já existirem 35 casos, contabilizados até junho de 2007.

Três métodos de avaliação de reatividade potencial do agregado são normalizados, até a presente data, em nosso país:

- a) NBR 9774/87 – “Agregado: Verificação da reatividade potencial pelo método químico”;
- b) NBR 9773/87 - “Agregado: Reatividade potencial de álcalis em combinação cimento-agregado”;
- c) NBR 10340/88 – “Agregados - Avaliação da reatividade potencial das rochas carbonáticas com os álcalis do cimento”.

O chamado método químico (NBR 9774/87: Agregados - Verificação da reatividade potencial pelo método químico) apresenta pouca eficácia na detecção do potencial para desenvolvimento de RAA dos tipos de agregados brasileiros, em função da composição mineralógica dos mesmos. Também há indícios de que as condições de ensaio sejam pouco agressivas e que a curva do gráfico constante nesta norma necessite de um ajuste para que possa ser utilizada. Valduga (2002) ensaiou 36 diferentes rochas do estado de São Paulo através deste método e, apesar de outras técnicas de ensaio acusarem que 60% das rochas eram reativas, o método químico classificou todas as rochas como inócuas.

A NBR 9773/87 (Agregados - Reatividade potencial de álcalis em combinações cimento/agregado) preconiza o uso do método das barras, que exige aproximadamente 6 meses para obtenção dos resultados. Em virtude dos prazos de obra, em geral, se apresentarem demasiadamente curtos, este método não se torna prático para avaliação de agregados. Também não avalia somente o agregado, e sim combinações deste com o cimento. Já a NBR 10340/88 (Agregados - Avaliação da reatividade potencial das rochas carbonáticas com os álcalis do cimento) avalia unicamente um tipo de rocha, as rochas carbonáticas.

Um outro método, não normalizado no Brasil, porém bastante popularizado entre pesquisadores, é o da ASTM C – 1260/2007 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), também chamado de Ensaio Acelerado. É bastante utilizado em todo o mundo, com algumas pequenas diferenças na metodologia, tais

como relação água/cimento, consistência das argamassas, idade de referência para ensaio, concentração e temperatura da solução para imersão das barras, entre outras. Embora seja alvo de diversas críticas, é um ensaio rápido e relativamente simples. A norma foi publicada nos Estados Unidos em 1994, e a última revisão foi feita este ano.

A análise petrográfica também tem sido considerada uma técnica auxiliar de bastante utilidade na detecção de reatividade de agregados, através da identificação dos minerais. Utilizada conjuntamente com o método acelerado e com a microscopia eletrônica de varredura, fornece resultados rápidos na previsão da potencialidade de agregados, embora não possa prever o comportamento de tal agregado no concreto ou argamassa (VALDUGA, 2002). Também traz a desvantagem de ser uma técnica apenas qualitativa.

A bibliografia nacional e internacional sobre o assunto é bastante vasta e, entretanto, ainda não se chegou a um consenso entre os pesquisadores nacionais sobre uma metodologia de ensaio de fato abrangente e efetiva. São buscados aperfeiçoamentos nos métodos já existentes com a finalidade de avaliar os agregados de forma mais segura.

Em 2005 iniciaram-se os trabalhos da ABNT, através da Comissão de Estudos de Requisitos e Métodos de Ensaio de Agregados do ABNT/CB-18, de forma a produzir uma nova norma sobre reação álcali-agregado, orientando o meio técnico sobre o assunto. O projeto desta norma será enviado ainda este ano para consulta pública, e possui seis partes, todas sob o mesmo título geral, mas diferenciadas pelos títulos específicos de cada parte. As seis partes do Projeto 18:200.01-001 – Agregados – Reatividade álcali-agregado (ABNT, 2007) são:

- a) Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso do agregado em concreto;
- b) Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto;
- c) Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto;
- d) Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado;
- e) Parte 5: Determinação da mitigação da expansão de barras de argamassa pelo método acelerado;
- f) Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.

1.2 JUSTIFICATIVA

Há cerca de 5 anos, em trabalho anterior da autora (VALDUGA, 2002), foi chamada atenção para o fato de que condições de moagem diferenciadas poderiam alterar o diagnóstico sobre rochas potencialmente reativas. Foram ensaiadas 36 amostras diferentes, entre elas agregados miúdos e graúdos, de diferentes tipos geológicos. Neste extenso programa de ensaios empregando a ASTM C 1260, foi observado à época que algumas amostras não exibiam expansões excessivas em baixas idades (até 28 dias), entretanto possuíam potencial reativo à álcalis. A análise petrográfica destas amostras apresentava indícios de reatividade, o que foi posteriormente comprovado através de microscopia eletrônica de varredura, onde se observou produtos de reação dentro dos poros, em grande quantidade. Foi observado também, durante o processo de moldagem das diversas amostras, que algumas argamassas exibiam consistência bem menor que as demais, eram de difícil moldagem, e provavelmente apresentariam mais poros depois de endurecidas. Isto poderia estar associado à forma dos grãos de agregado moído, mas na ocasião nada foi comprovado a respeito.

Posteriormente, ensaios realizados pela autora e outros pesquisadores (VALDUGA *et al.*, 2005) indicaram que condições de moldagem diferenciadas poderiam resultar em falso-negativos ou falso-positivos em testes conduzidos pela ASTM C 1260. Neste trabalho foi estudado apenas um tipo de rocha, um basalto, e não foram feitos ensaios auxiliares que subsidiassem cientificamente à idéia lançada. O fato foi constatado, mas não foram buscadas justificativas para tal.

Deste modo, esta tese foi estruturada objetivando abranger três fatores que poderiam afetar os resultados de expansão: a consistência, a relação a/c e a forma do grão. Os 36 ensaios da dissertação de mestrado foram ampliados para 63, totalizando 189 barras de argamassa. Foram acrescentados alguns ensaios auxiliares para explicar os comportamentos encontrados, e empregados como amostras três tipos litológicos diferentes, correspondentes às três faixas de classificação da ASTM C 1260. Também foram feitos tratamentos estatísticos para verificar a validade destes dados.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1 Objetivos gerais

Esta pesquisa objetiva estudar o ensaio acelerado (ASTM C 1260) e as diferentes condições de ensaio, mais especificamente de moldagem, que possam influenciar nos resultados deste ensaio, ou seja, a caracterização do agregado como reativo ou inócuo.

Os resultados obtidos com este trabalho contribuirão para a melhor compreensão do ensaio e para a análise da sua efetiva validade. Espera-se que os dados obtidos sejam subsídios para adaptações no método de ensaio, buscando seu aperfeiçoamento.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) analisar a existência de influência dos seguintes fatores de moldagem nos resultados da ASTM C 1260: relação /ac, consistência da argamassa e forma do grão;
- b) determinar qual destes fatores têm maior influência nos resultados de expansão;
- c) avaliar a possibilidade de fixar parâmetros de moldagem do ensaio da ASTM C 1260, de forma a reduzir variabilidades de resultados.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

A tese foi dividida em 4 capítulos. O primeiro, denominado Introdução, apresenta aspectos iniciais para discussão da reação álcali-agregado, expondo o tema. Também foram expostos os objetivos almejados com este trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto, abordando um histórico desta manifestação patológica, o mecanismo da reação, os diferentes tipos de RAA que se manifestam e, por fim, os métodos de ensaio mais empregados e uma abordagem mais detalhada do ensaio da ASTM C 1260.

O método utilizado na pesquisa é apresentado no Capítulo 3, com o detalhamento dos materiais e procedimentos de ensaio empregados. Para a realização desta pesquisa foram utilizadas as seguintes técnicas: análise petrográfica, ensaio acelerado (ASTM C 1260),

porosimetria de mercúrio, microscopia eletrônica de varredura e ensaios de absorção por imersão, além de alguns ensaios auxiliares.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e uma discussão prévia sobre os valores encontrados. Por fim, no Capítulo 5 são exibidas as conclusões que foram obtidas com o término da pesquisa e também algumas sugestões para trabalhos futuros.

1.5 LIMITAÇÕES

Como limitações desta tese, a primeira a ser citada é o número de amostras de agregado utilizadas para os ensaios, que foi reduzido de modo a não estender demasiadamente o programa experimental, em função dos prazos.

A segunda limitação foram os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio. Por não se dispor do equipamento necessário na própria instituição, e por limitação de recursos, não foi possível a realização de ensaios para todas as amostras.

O confronto dos resultados obtidos com a literatura não foi realizado, por não terem sido encontrados trabalhos que analisem a influência dos fatores estudados nesta tese sobre os resultados do ensaio da ASTM C 1260.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A reação álcali-agregado pode ser definida como um tipo de degradação que afeta o concreto através de um fenômeno de expansão. Os efeitos decorrentes da natureza expansiva da reação álcali-agregado (RAA) são diversos, e a fissuração só ocorre se uma expansão se desenvolve.

A velocidade de desenvolvimento da reação e magnitude das deformações envolvidas dependem de um grande número de fatores, dentre os quais se destacam a natureza e quantidade disponível de agregados reativos, os níveis de álcalis no cimento, o consumo de cimento, a temperatura ambiente, a disponibilidade de umidade e as eventuais restrições físicas à expansão, que podem ser internas e externas.

Os principais sintomas decorrentes da RAA são (adaptado de ANDRIOLO, 1999):

- a) microfissuras no concreto, principalmente na argamassa que preenche o espaço entre os agregados graúdos;
- b) fissuras na proximidade da superfície dos agregados graúdos, podendo também ocorrer na interface pasta/agregado;
- c) descolamento (perda de aderência) da argamassa junto à superfície dos agregados graúdos;
- d) possibilidade de ocorrência de bordas de reação ao redor dos agregados que reagiram com os álcalis;
- e) presença de gel exsudando ou preenchendo vazios no concreto;
- f) movimentação (abertura e/ou deslocamento relativo) de juntas de contração e de concretagem;
- g) travamento e/ou deslocamento de equipamentos e peças móveis (comportas, turbinas, eixos, pistões, etc.);

- h) fissuração característica na superfície, com panorama poligonal, havendo predominância na direção de maior dimensão. Em vários casos é confundida com o panorama de reação por sulfatos ou até mesmo retração por secagem (quando as fissuras são de pequena abertura), e com o panorama de fissuração por origem térmica (quando as fissuras são de grande abertura);
- i) fissuras de grande abertura, transversais à maior dimensão da estrutura;
- j) movimentação das superfícies livres (alteamento de cristas de barragens e soleiras de vertedouros, deflexões para montante nas estruturas de barragens).

Embora o quadro de fissurações em mapa em estruturas de concreto e o deslocamento de peças estruturais sejam considerados evidências de reação álcali-agregado, Forster (1998) alerta que estes indícios não podem ser associados unicamente à este tipo de reação. Segundo o autor, fissurações superficiais em concreto estão associadas a tensões de tração elevadas, que podem ser causadas também por carregamentos, gradientes de temperatura elevados durante a cura do concreto, ciclos de gelo e degelo e ataque por sulfatos, entre outras causas. Um diagnóstico adequado da reação álcali-agregado deve incluir também a identificação de produtos de reação.

Grattan-Bellew e Mitchell (2007) alertam que a fissuração em mapa também pode resultar de outras causas, como a retração por secagem, particularmente em peças moldadas em locais com clima desfavorável (quente e com incidência de vento) sem processo de cura adequado. Comentam ainda que este tipo de fissuração, causada por retração por secagem, aparece em horas ou dias depois da concretagem da peça, enquanto que a reação álcali-agregado costuma se tornar evidente após 5 ou 10 anos.

2.1 HISTÓRICO DO APARECIMENTO DA REAÇÃO

Blanks & Kennedy, de acordo com Mehta & Monteiro (1994, p. 165), descreveram, em 1955, os primeiros casos de deterioração por reação álcali-agregado ocorridos nos Estados Unidos. De acordo com estes autores, a primeira vez que se observou deterioração por reação álcali-agregado foi em 1922, na Usina Hidroelétrica de Buck no New River (Virgínia), apenas dez anos após a sua construção. Ao longo das décadas de 1920 e 1930, um grande número de fissuras foram observadas em pontes, barragens e pavimentos ao longo da costa da Califórnia.

O trabalho mais antigo que relata a ocorrência de reação álcali-agregado é de autoria de Stanton (1940 *apud* Forster, 1998), no qual o engenheiro americano relata o aparecimento da reação em pavimentos de concreto nos Estados Unidos. O trabalho de Stanton é um marco nas pesquisas de RAA, pois vários procedimentos de ensaio foram embasados em suas descobertas. A partir de então, evidências de deteriorações similares foram descobertas em diversos outros estados. Ao longo destes anos, a reação tem provocado a desagregação, seguida de recuperação ou desativação, de várias estruturas de concreto em muitos países.

O reconhecimento da reação como um problema ocorreu por volta de 1940, na América do Norte. Daí em diante ela foi detectada em diversas regiões do mundo. Na Dinamarca nos anos 50, na Alemanha Ocidental nos anos 60, no Reino Unido em meados dos anos 70 e no Japão nos anos 80, segundo HOBBS (1988).

De acordo com Monteiro *et al.* (2001), embora a reação dos álcalis da matriz cimentícia com agregados silicosos tenha sido relatada em 1940, somente na década de 70 é que agregados como granitos, quartzitos e gnaisses foram reconhecidos como potencialmente reativos a álcalis. Muitas barragens de concreto de grande porte já haviam sido construídas usando estes tipos de rocha como agregado e, atualmente, exibem manifestações de dano. HASPARYK, CAVALCANTI e ANDRADE (2006) comentam que um outro fator que contribuiu para o aumento da incidência da reação foi a crise do petróleo, que forçou os fabricantes de cimento a buscar uma maior eficiência energética nos seus processos, o que levou ao crescimento do teor de álcalis dos cimentos.

No Brasil, deve-se à Gitahy (1963) e Ruiz (1963) citados por PRISZKULNIK (2005), os primeiros registros sobre o tema “reação expansiva álcali-agregado em concretos”. Os dois autores exerciam, à época, as chefias das Seções de Ensaio de Concreto e de Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (IPT), respectivamente. Durante os estudos para a construção da Barragem de Jupia, no rio Paraná, examinaram o cascalho a ser utilizado como agregado para concreto, e encontraram, em sua composição, quartzo, quartzito, calcedônia, ágatas, calcários silicificados e chert, entre outros minerais. Amostras do cascalho foram submetidas a ensaios, os quais confirmaram o caráter expansivo da rocha (PRISZKULNIK, 2005).

A imagem da Figura 2 mostra um exemplo de reação álcali-agregado registrado em uma estrutura viária de concreto armado na África do Sul, com um quadro avançado de fissuração

(BLIGHT & BALLIM, 2000). Na época da foto da Figura 2 havia se passado 19 anos da construção da estrutura. Após mais 9 anos a estrutura teve que ser demolida e reconstruída. Na Figura 3 pode se observar um detalhe da mesma estrutura, na qual se verifica que as fissuras causadas pela RAA já haviam atingido 6 mm em 10 anos (BLIGHT *et al.*, 1989).

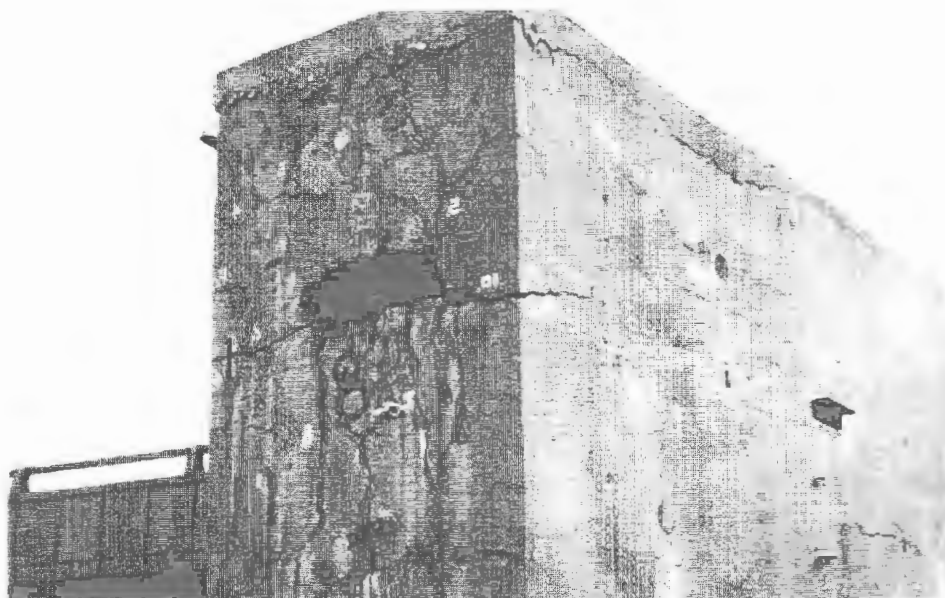


Figura 2 : reação álcali-agregado em estrutura viária na África do Sul (BLIGHT &BALLIM, 2000).

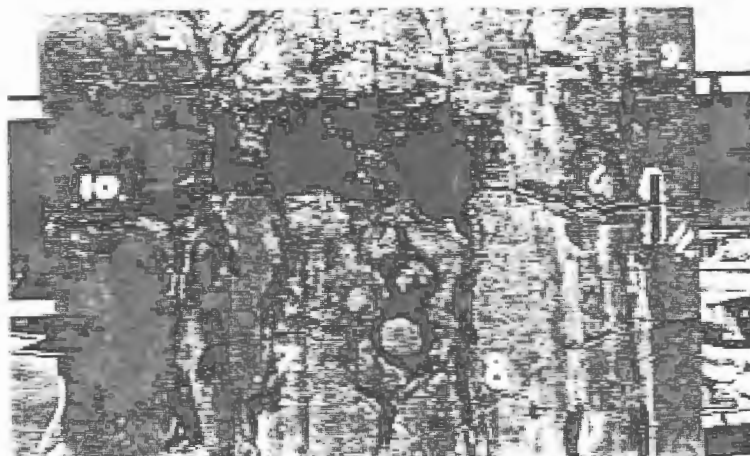


Figura 3: detalhe da mesma estrutura exibida na figura anterior (BLIGHT *et al.*, 1989).

Na Figura 4 e na Figura 5 pode se observar a ocorrência de reação em um bloco de fundação de uma torre de eletricidade, no Canadá (DURAND, 2000 e FOURNIER, 2005). Nota-se claramente o aspecto de fissuração em mapa, bastante típico da reação álcali-agregado.

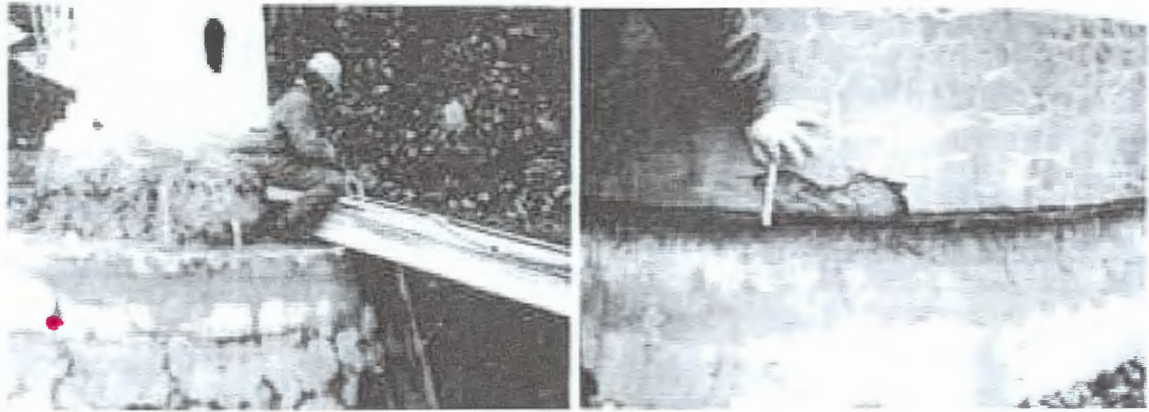


Figura 4: estrutura de fundação atingida por RAA, no Canadá (DURAND, 2000).



Figura 5: estrutura de fundação atingida por RAA, no Canadá (FOURNIER et al., 2005).

Na Figura 6 observa-se a deterioração ocorrida em dormentes de concreto, causada por RAA, em uma ferrovia na África do Sul (FOURNIER, 2005) enquanto na Figura 7 tem-se mais um exemplo de RAA em estrutura de fundação, no Canadá (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2007).



Figura 6: dormentes de concreto atingidos por RAA, em ferrovia na África do Sul (FOURNIER, 2005).



Figura 7: reação álcali-agregado em estrutura de fundação no Canadá (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2007).

Considera-se hoje que vastos depósitos de agregados reativos estão localizados nos Estados Unidos, leste do Canadá, Austrália, Nova Zelândia, África do Sul, Alemanha, Inglaterra e Islândia. No Canadá, estima-se que aproximadamente 30% dos problemas relacionados à durabilidade de barragens estão associados à reação álcali-agregado (VIEIRA *et al.*, 1996). A África do Sul, entre 1970 e 1996, gastou cerca de trezentos milhões de dólares em reparos e manutenção de estruturas afetadas por reação álcali-agregado e há outros países em que aproximadamente 25% das estruturas de barragens estão afetadas pela reação (ANDRIOLO, 1999).

No Brasil este panorama não é muito diferente. Pesquisas desenvolvidas por Paulon (1981) já apontavam o Brasil, na época, como quarto país no mundo em ocorrência de casos de reação álcali-agregado, um número calculado apenas a partir dos casos relatados. As primeiras pesquisas sobre o assunto começaram a surgir na década de 80 (PAULON, 1981) e, embora não haja números precisos, vários relatos indicam evidências de reação em barragens brasileiras em que aparecem movimentações e fissurações. Kuperman *et al.* (2000) relatam que, em 1996, foram iniciados estudos sobre o problema da reação álcali-agregado no túnel 6 do sistema da Cantareira, pertencente à Sabesp, porém diversas fissuras na estrutura já tinham sido notadas em 1989.

Andriolo (2000), em um trabalho sobre o assunto, relata os casos de barragens afetadas por reação álcali-agregado no Brasil. As 830 barragens brasileiras cadastradas perfazem um total de aproximadamente 62.700.000 m³ de concreto, sendo que a primeira análise de reação álcali-agregado no Brasil e adoção de medidas preventivas foi um estudo dos agregados utilizados na barragem de Jupia. O mesmo autor cita também ao menos 19 casos de barragens afetadas por reação álcali-agregado, onde as estruturas atingidas não se limitam apenas às barragens em si, afetando também as estruturas de Tomadas d'Água, Casas de Força e Vertedouros.

Em estruturas onde são instalados equipamentos hidrodinâmicos e elétricos, como geradores e turbinas, as conseqüências são ainda maiores, no caso de eventuais danos. Desníveis milimétricos provocados por expansões nessas estruturas podem causar paralisação de máquinas em hidrelétricas. Um caso clássico é o da UHE Apolônio Sales (Moxotó), onde ocorreram fissuração, ovalização da casa de força e roçamento de pás de turbinas (PAULON e CAVALCANTI, 1986).

Desde 1974 realizam-se seminários internacionais e nacionais, e publicam-se todos os anos diversos artigos a respeito desse assunto, dada a sua extrema importância, a partir do momento em que este processo deteriora estruturas de vulto e valor, diminuindo seu tempo de vida útil.

Embora maior atenção seja dada às ocorrências em barragens afetadas pela reação, dada sua importância econômica e suscetibilidade ao fenômeno, salienta-se que diversas outras estruturas também sofrem tal deterioração, tais como obras portuárias, blocos de fundação, pontes, viadutos, dormentes de concreto, pistas de aeroportos, túneis e estruturas rodoviárias.

2.2 MECANISMO DA REAÇÃO

A RAA é um processo químico que envolve íons alcalinos (Na e K, provenientes, principalmente, do cimento, mas também da água de amassamento do concreto, de pozolanas e de agentes externos), íons hidroxilas (OH⁻) e certos constituintes mineralógicos do agregado.

Ao se hidratar, o cimento produz silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio. Ou seja, durante a hidratação do cimento, os íons cálcio são incorporados nos produtos de hidratação, mas os íons sódio e potássio permanecem na solução. Eventualmente, os mesmos são parcialmente incorporados nos silicatos de cálcio hidratados e monossulfatos (FERRARIS, 2005).

Com a continuação da hidratação e dissolução dos componentes alcalinos do cimento na água de amassamento, a solução dos poros do concreto vai se tornando alcalina (pH \cong 13,5). Os íons hidroxila e os álcalis solúveis contribuem para o aumento do pH. A quantidade de álcalis presente na solução porosa é relacionada à quantidade de álcalis solúveis presentes no concreto.

Nesse meio (pH alto), os íons hidroxilas atacam a superfície da sílica. Algumas rochas (agregados compostos de sílica e minerais silicosos) não permanecem estáveis por longos períodos, porque o pH alcalino aumenta muito a dissolução da sílica. Para exemplificar, a solubilidade da sílica aumenta mais de duas ordens de grandeza quando o pH passa de 10 para 11,5, conforme pesquisas de Helmuth e Stark (1992). Se existirem agregados reativos e álcalis disponíveis, é natural a ocorrência da reação.

Segundo Helmuth e Stark (1992), se a sílica é bem cristalizada, as falhas na estrutura cristalina ocorrem apenas na superfície externa do agregado. Mas, no caso da sílica fracamente cristalizada, há muitas falhas na estrutura do agregado, levando à desintegração da rede inteira (Figura 8 e Figura 9).

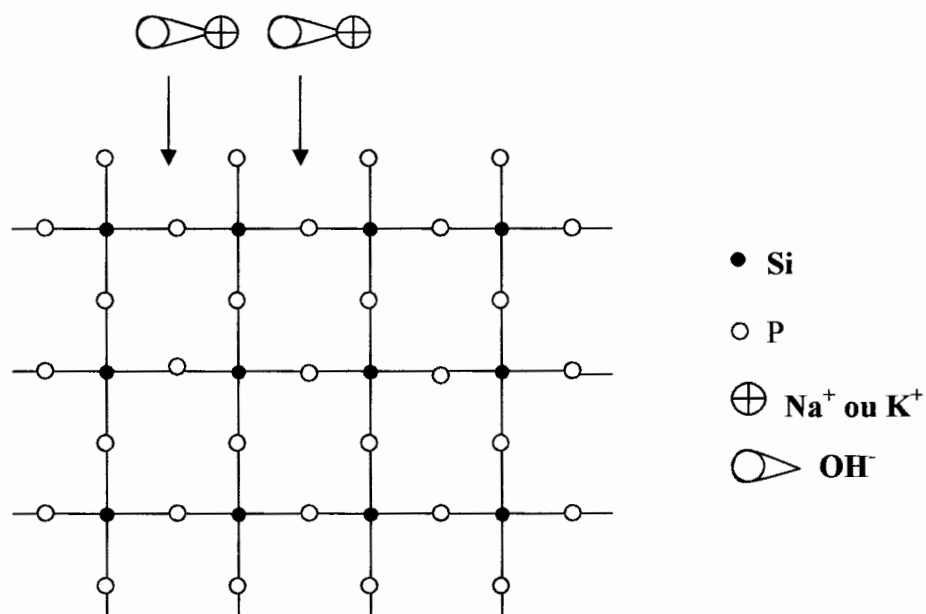


Figura 8: representação esquemática do ataque de soluções alcalinas na sílica bem cristalizada (FIGG, 1983 *apud* FERRARIS, 2005).

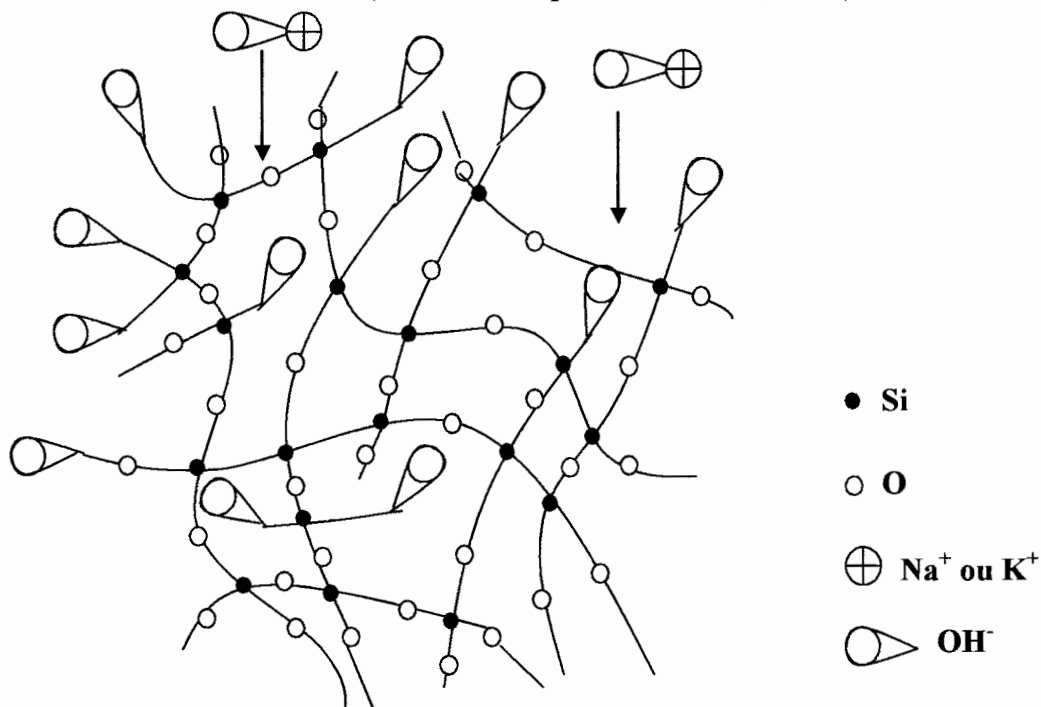


Figura 9: representação esquemática do ataque de soluções alcalinas na sílica fracamente cristalizada (FIGG, 1983 *apud* FERRARIS, 2005).

Para manter o equilíbrio, os cátions Na^+ e K^+ espalham-se sobre os íons hidroxila e a reação entre estes resulta na produção de gel. Porém, a migração de cátions de Na^+ e K^+ é lenta, conseqüentemente a migração de Ca^{++} pode começar a ocorrer. Estudos de Diamond (1983) mostram que há muito pouco cálcio na solução porosa (Figura 10), e isto é explicado pelo alto pH da solução que causa diminuição da solubilidade do $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Deste modo, tanto a ligação de Na^+ e K^+ como de Ca^{++} originam formação de gel: a diferença se dá na composição do gel formado.

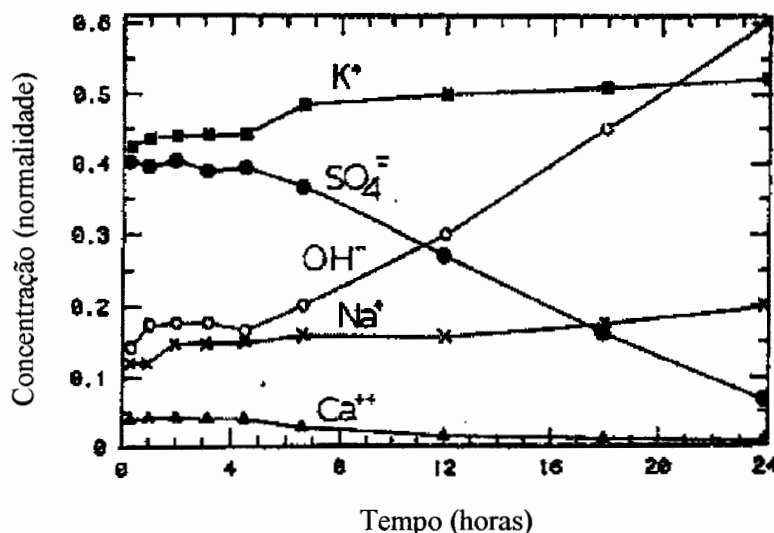


Figura 10: composição da solução dos poros x tempo (DIAMOND, 1983).

Alguns pesquisadores, como Helmuth & Stark (1992) e Hasparyk (1999), investigaram teorias acerca do mecanismo de formação de géis expansivos e não-expansivos. Segundo essas teorias, se o gel possuir alto teor de cálcio então é menos expansivo quando exposto à água e, desse modo, pode não induzir fissuras no concreto. Pesquisadores como Davies & Oberholster (1988) e Chatterji *et al.* (1988) também observaram que a natureza expansiva do gel resultante depende do teor de cálcio.

Apesar da maior parte dos trabalhos publicados não fazer distinção entre gel expansivo e não-expansivo, há conhecimento de que mais de um tipo de gel é produzido nas reações álcali-agregado.

Moranville-Regourd (1989) pesquisou a respeito da composição de produtos de RAA e observou que diferentes tipos de géis podem ser formados, variando de acordo com alguns fatores, como o tipo do agregado usado e a proporção dos materiais.

De acordo com Veiga *et al.* (1997), o gel é produto de uma reação instável e intermediária e suas características, tais como viscosidade, grau de inchamento e absorção de água dependem sobretudo de sua composição química e da presença de água. Segundo estes autores, as condições em que se encontra o concreto, as características de suas estruturas e as condições ambientais influenciam diretamente nas características do gel formado. Monteiro *et al.* (1997) também citam a existência de diferentes tipos de gel, cujas propriedades expansivas vão depender de alguns fatores como:

- a) estrutura interna do gel, ou seja, tamanho e distribuição dos poros do gel que influenciarão o comportamento expansão/retração quando sujeitos a ciclos secagem/molhagem;
- b) tamanho e forma das partículas do agregado;
- c) composição do gel;
- d) tipo e concentração dos íons nos fluidos dos poros.

Veiga *et al.* (1997) comentam que a composição química do gel pode variar também conforme o local da sua formação (no interior do agregado, poros, pasta e regiões microfissuradas), já que este também é variável devido à mobilidade do gel dentro do concreto.

De acordo com Thaulow *et al.* (1996), o teor de cálcio (Ca) aumenta na medida em que o gel se afasta do agregado, pois passa a ocorrer uma absorção dos íons de cálcio presentes na pasta de cimento. O teor de silício (Si) diminui nesta mesma ordem. O gel formado longe do agregado (rico em cálcio) possui maior viscosidade e menor capacidade de inchamento, e quando atinge o estado sólido ocorre coagulação e retração, com aparecimento de algumas fissuras na estrutura do próprio gel (VEIGA *et al.*, 1997). A Figura 11 ilustra o processo descrito.

A reação álcali-agregado é uma reação espontânea, ou seja, nas condições de pH e temperatura em que esta se desenvolve, os produtos formados pela reação são mais estáveis que os reagentes. É por esta razão que, depois de iniciado o processo de reação, praticamente não há como detê-lo.

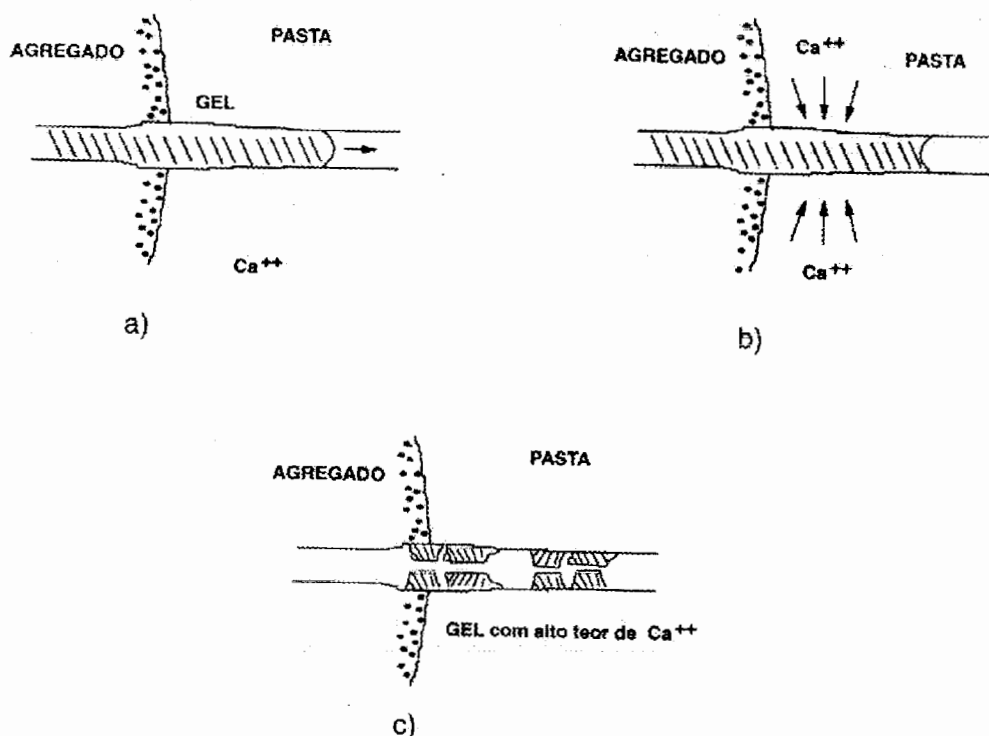


Figura 11: mecanismo de formação do gel proveniente de RAA. a) formação do gel próximo ao agregado; b) movimentação do gel ao longo da pasta de cimento, com absorção de íons cálcio; c) gel no estado sólido, apresentando fissuras devido à retração (VEIGA et al., 1997).

A formação de gel por si só não é deletéria. Porém, esse gel, por ser higroscópico, atrai as moléculas aquosas, as quais migram através da pasta de cimento. Este vai inchando e, envolto pela pasta de cimento, começa a exercer pressões hidráulicas que podem ultrapassar a resistência à tração do concreto, levando às fissurações. É, portanto, a absorção de água pelo gel um dos fatores que causa a deterioração.

Idorn *et al.* (1992) relatam que uma umidade relativa de 80% é necessária para expansão do gel, embora a formação deste possa se dar em umidades relativas mais baixas. Segundo Forster (1998), em estruturas onde é possível que a água proveniente de chuvas ou nevascas se acumule, uma progressão rápida da RAA pode ser notada. O autor também observa que fissuras em paredes de concreto aparente, vigas expostas e parapeitos são comumente observadas, bem como estruturas expostas à ação conjunta de RAA e ciclos de gelo e degelo tem sua degradação aumentada.

Cabe lembrar que o concreto tem grande capacidade de absorção de água, e isto faz com que a água tenha acesso a áreas distantes da área de contato direto com a água. Isto explica porque,

na UHE Apolônio Sales (Moxotó), por exemplo, foram detectadas reações mesmo nas partes mais altas da estrutura (PAULON e CAVALCANTI, 1986).

De acordo com um dos modelos propostos por Hobbs (1988), a expansão ocorre segundo o modelo geral mostrado a seguir (Figura 12). No estágio 1, o gel cresce nos poros induzindo tensões internas, mas não ocorrem microfissuras. No estágio 2, as pressões induzidas são aumentadas o suficiente para causar microfissuras ao redor das partículas reativas. No estágio 3, o gel migra para dentro de algumas microfissuras e há uma pequena redução das tensões internas. Já no estágio 4, as tensões internas surgidas nas microfissuras preenchidas com gel estão altas o suficiente para causar extensão das microfissuras, o que pode causar grandes expansões (HOBBS, 1988).

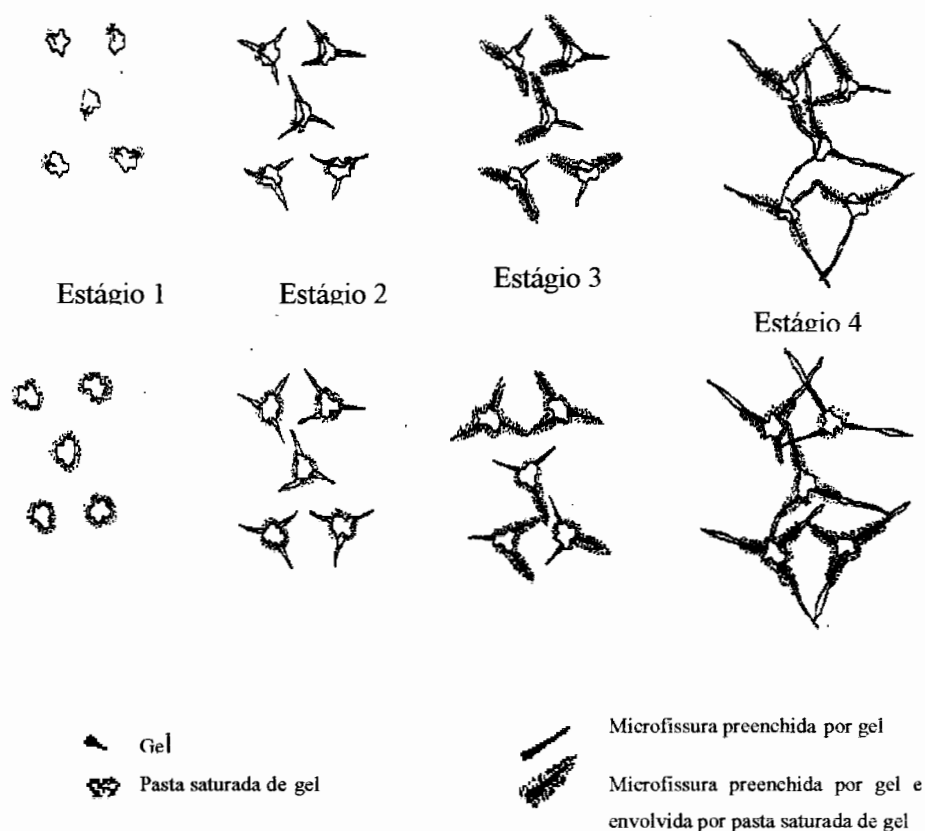


Figura 12: esquema de progressão e consequência da expansão da RAA (HOBBS, 1988).

Esta seqüência de expansão em função da reação álcali-agregado tem influência de alguns fatores como a textura, morfologia e mineralogia da rocha. A Figura 13 mostra o modelo de

reação de alguns tipos de rochas reativas devido a RAA: onde começam as fissuras e qual o comportamento das partículas do agregado, segundo Idorn *et al.* (1992).

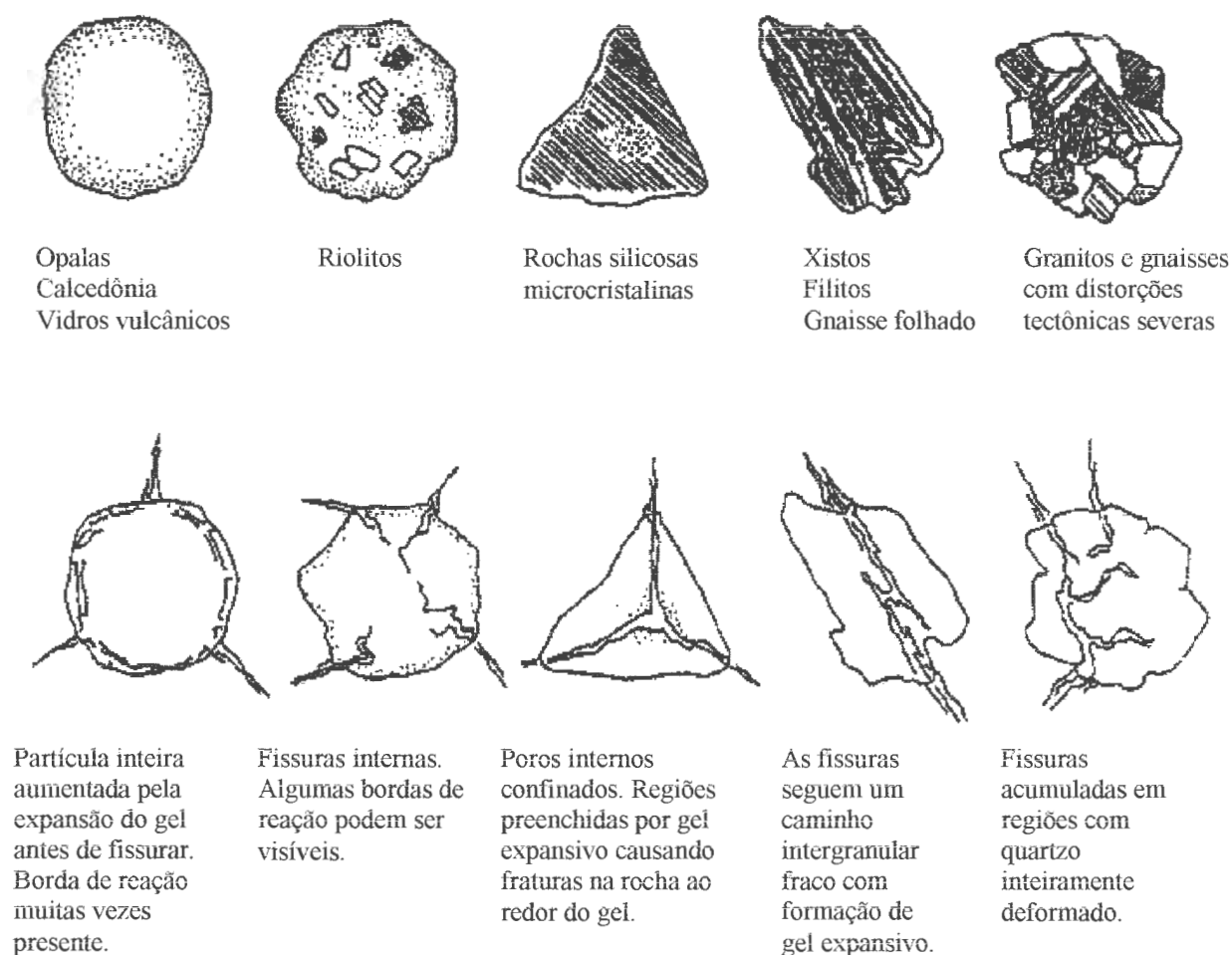


Figura 13: textura, morfologia e composição de algumas rochas suscetíveis a RAA e características de desenvolvimento da reação (IDORN *et al.*, 1992).

Outros pesquisadores também criaram modelos para explicar expansões devidas à reação álcali-agregado, assim como Hobbs o fez em 1988. Prezzi *et al.* (1997), em trabalho apresentado no I Simpósio sobre Reação Álcali-agregado em Estruturas de Concreto, explicaram o modelo da dupla camada, baseado nos princípios da química de superfícies. Tal modelo foi julgado adequado também para explicar o efeito de aditivos químicos e adições minerais na expansão de barras de argamassa, e mostrou uma forte correlação negativa entre a

expansão e a fração de carga dos cátions bivalentes no gel. Posteriormente, esta teoria foi confirmada por Hasparyk (HASPARYK, 1999).

Da formação do gel até a sua expansão e fissuração do concreto, vários fatores interferem no processo de deterioração.

Depois de ocorrida a reação e a formação de gel, a permeabilidade do concreto tem papel essencial por permitir ou não a percolação de água até o local de formação dos produtos de reação. Caso a permeabilidade seja suficientemente alta para que a água atinja o gel, este expande e então torna-se importante outra propriedade do concreto: a porosidade. Somente há aparecimento de tensões se a porosidade do concreto for baixa, caso contrário a expansão do gel pode ocorrer dentro dos poros e a fissuração não ocorre.

Com o surgimento de tensões, sempre que estas forem maiores que a resistência à tração do concreto, o quadro de fissuração será instaurado. Um breve resumo do processo da reação, desde a formação do gel até a fissuração, está na Figura 14.

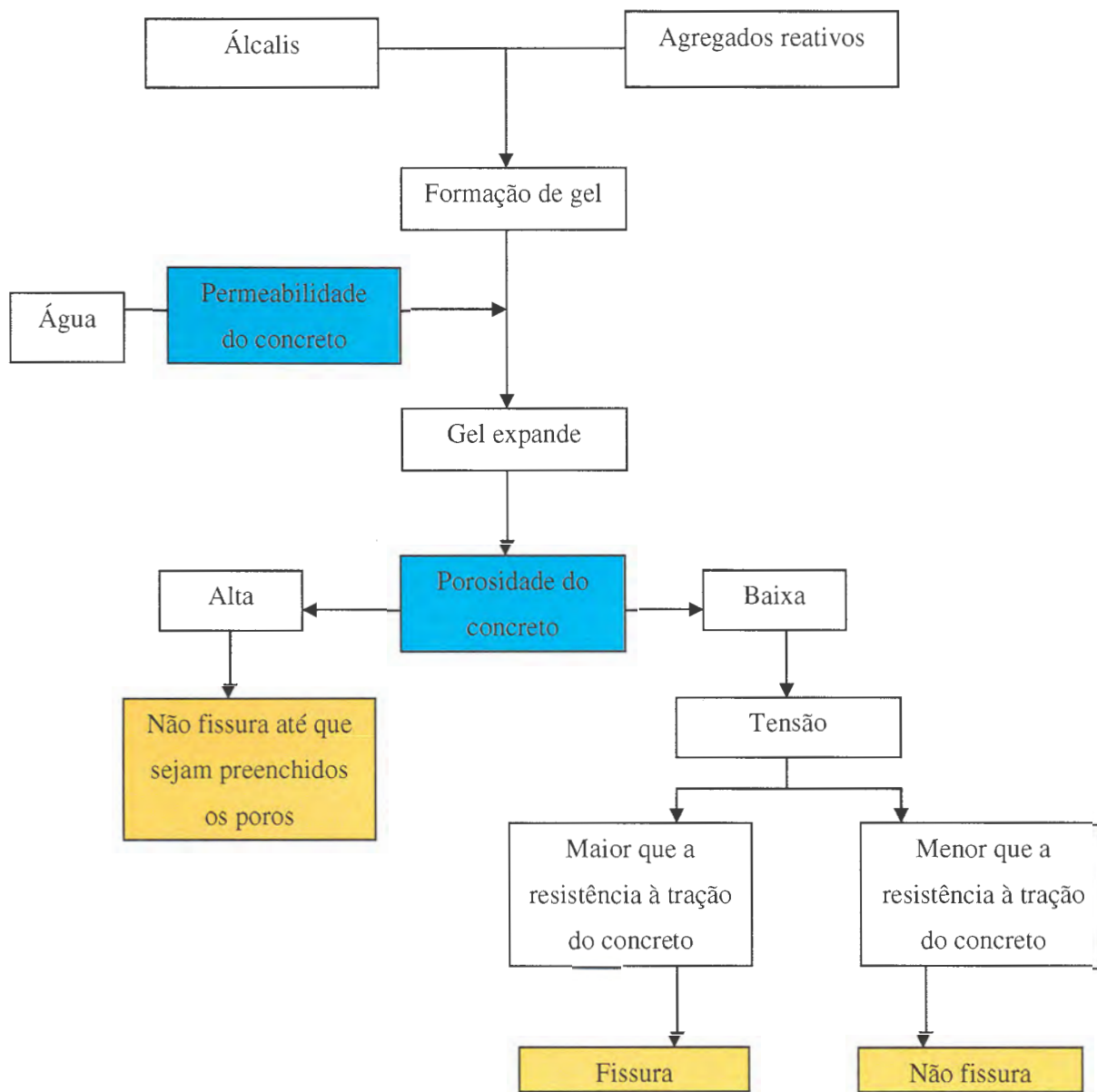


Figura 14: processo da reação álcali-agregado (baseado em: FERRARIS, 2005).

2.3 TIPOS DE REAÇÃO

A reação álcali-agregado pode se apresentar de três formas: álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato. Esta classificação é realizada de acordo com os tipos de agregados que participam da reação química.

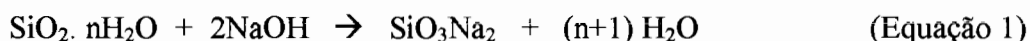
Alguns autores, como Tang *et al.* (2000), consideram a reação álcali-silicato como uma forma de reação álcali-sílica, subdividindo então os tipos de reação em apenas dois, devido à grande semelhança entre as duas primeiras: ambas formam gel e o que varia é principalmente a velocidade da reação.

2.3.1 Reação álcali-sílica

A reação álcali-sílica é o tipo de reação que tem sido mais encontrada em vários locais do mundo. Nela, as hidroxilas provenientes dos álcalis do cimento reagem com a sílica nas fases amorfa, vítrea, microcristalina ou criptocristalina presente em alguns tipos de agregados. Segundo Carman (*apud* Paulon, 1981), nas formas cristalinas de sílica, os tetraedros que formam sua estrutura estão organizados numa rede tridimensional orientada. Já nas formas vítreas, é formada uma rede tridimensional sem nenhuma orientação.

A sílica amorfa constitui a forma mais desordenada e reativa de sílica e pode estar presente em calcedônias (uma variedade de quartzo criptocristalino) e em certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais (como o pirex). Cristobalitas e tridimitas constituem formas cristalizadas metaestáveis de sílica, enquanto a opala possui sílica na forma microcristalina.

A reação álcali-sílica vai depender principalmente da cristalinidade da sílica, que poderá ser avaliada qualitativamente por microscópio óptico. A reação ocorre em duas etapas. Inicialmente deve formar-se um silicato de sódio e/ou de potássio solúvel em água; na seqüência, este silicato reage com o hidróxido de sódio, resultando em um silicato complexo. Com o hidróxido de sódio, as prováveis reações são as seguintes (PRISZKULNIK, 2005):



Na etapa seguinte, segundo Priszkulnik (2005), pela reação de um metal polivalente com um silicato alcalino, produz-se uma massa gelatinosa, amorfa, insolúvel em água, que é um complexo de íons polissilícicos, em que os íons óxido-metálicos aparecem como adsorvidos.

Apesar de 80% das rochas do planeta serem constituídas de silicatos, a sílica considerada reativa não inclui quartzo perfeitamente cristalizado e minerais que contém SiO_2 como um componente químico, tais como feldspato e mica, entre outros. De outro modo, seria muito difícil encontrar agregados não reativos (TANG *et al.*, 2000).

O gel produzido por esse tipo de reação pode ser colorido ou branco, ceroso ou aquoso. Quando molhado e exposto à dióxido de carbono, carbonata e, em seguida, quando seco, aparece esbranquiçado (HOBBS, 1988). Hasparyk (2005) fez um estudo aprofundado do gel, e encontrou quatro formas deste, com características bastante variadas.

2.3.2 Reação álcali-silicato

Na década de 40, quando pesquisadores do mundo todo começaram a tomar conhecimento das deteriorações causadas pela reação álcali-agregado, era considerado apenas um tipo de reação: a reação álcali-sílica.

Esta reação é muito semelhante à reação álcali-sílica, sendo, porém, de ocorrência mais lenta. Isto se deve ao fato dos minerais reativos estarem mais disseminados na matriz e à presença de quartzo deformado.

A reação álcali-silicato é a reação entre as hidroxilas dos álcalis do cimento e silicatos presentes em:

- a) algumas rochas sedimentares, como argilitos, siltitos, folhelhos argilosos e grauvacas;
- b) algumas rochas metamórficas, como gnaisse e quartzitos;
- c) algumas rochas magmáticas, como os granitos.

De acordo com Silveira *et al.* (2002), agregados contendo sílica na forma amorfa (que causam tipicamente a reação álcali-sílica) foram devidamente evitados no Brasil em obras de barragens, sendo que a maioria delas foi construída a partir das décadas de 50 e 60. Os autores relatam que, nesta época, muitas obras foram construídas com granitos, gnaisses e quartzitos, pois se acreditava que, pelo fato do quartzo ser um dos minerais mais estáveis na natureza, estas rochas seriam apropriadas para emprego em concreto.

Entretanto, a partir da década de 70 foi verificado que o quartzo geralmente é encontrado com a estrutura ligeiramente distorcida, em função das altas temperaturas e pressões a que foi

submetido durante o processo geológico de formação. Esta textura é conhecida como “quartzo deformado”, e é um dos fortes indícios de reatividade potencial nos tipos de rocha citados. Ainda segundo Silveira *et al.* (2002), este é o motivo pelo qual diversas barragens construídas até a década de 80, no Brasil e no exterior, passaram a apresentar problemas devidos à RAA.

O basalto, rocha ígnea bastante utilizada em obras de engenharia no sudeste e sul do Brasil, também produz uma reação do tipo álcali-silicato.

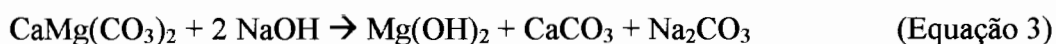
2.3.3 Reação álcali-carbonato

A reação álcali-carbonato ocorre quando agregados carbonáticos contendo calcário dolomítico e impurezas argilosas reagem com as hidroxilas dos álcalis. É o tipo de reação que mais vem sendo estudada nestes últimos anos, devido ao pouco conhecimento existente a seu respeito, à dificuldade em identificar agregados carbonáticos reativos e ao fato de que essa reação não pode ser tão facilmente inibida como a reação álcali-sílica, cita Xu *et al.* (2000).

No Canadá, Estados Unidos e China muitos casos de reação álcali-carbonato têm sido relatados, principalmente neste último país, onde vêm surgindo muitas construções nestes últimos 20 anos e as jazidas são quase na totalidade de agregados dolomíticos e calcíticos. Estacas, dormentes, pavimentos de aeroportos e pontes são as estruturas mais atingidas. Nos Canadá, no Estado de Ontario, expansões da ordem de 1,0% foram registradas em pavimentos de concreto, devido à reação álcali-carbonato (HOBBS, 1988).

A expansibilidade deste tipo de processo, embora a cristalinidade e a taxa Ca/Mg da dolomita influenciem bastante na taxa de reação, tem como fatores decisivos o tamanho dos cristais dolomíticos, sua distribuição na matriz e o grau de compactação da matriz envolvente (TANG *et al.*, 2000).

Essa reação química não apresenta formação de gel expansivo, mas a expansão é devida ao processo de desdolomitização, o que modifica o arranjo da textura do calcário e causa o aumento do volume. A reação dá lugar à formação de brucita ($Mg(OH)_2$). De acordo com Tang *et al.* (2000), o processo de desdolomitização pode ser explicado pela (Equação 3):



Se, ao invés de hidróxido de sódio nos reagentes houver presença de hidróxido de potássio, haverá formação de carbonato de potássio no lugar de carbonato de sódio.

Estudos foram conduzidos por Deng & Tang (1993), provando que a reação de desdolomitização por si só já causa expansões. Ou seja, rochas carbonáticas sem sílica reativa podem causar expansão quando reagem com álcalis.

Apesar do processo de desdolomitização ser tão questionado, já existem dados mostrando a influência da reação na interface agregado/pasta (BATIC & MILANESI, 2000). Tais estudos mostram que, apesar da formação de grandes cristais de calcita (CaCO_3) levar a um decréscimo na ligação da interface, a formação de minerais de estrutura laminar (brucita) significou uma melhora substancial da interface.

Todos esses aspectos têm levado diversos pesquisadores dos países afetados por tal tipo de reação a desenvolverem pesquisas nesse campo. No Brasil ainda não existem registros oficiais deste tipo de reação.

2.4 ENSAIOS PARA DETECÇÃO DE AGREGADOS REATIVOS

Uma vez que a expansão devido à reação álcali-agregado causa vários danos e, até hoje, não foi descoberta ainda uma maneira totalmente eficiente de interromper o ciclo de reações depois de desencadeadas, considera-se que a prevenção do problema é fator primordial. Vários autores têm buscado meios eficientes de caracterizar os agregados e classificá-los em inócuos ou deletérios.

Diversos tipos de ensaios são mencionados na bibliografia existente sobre o assunto. Alguns são internacionalmente conhecidos e utilizados por vários países, embora não normatizados nacionalmente, como é o caso da ASTM C 1260. Outros são desenvolvidos localmente e adaptados somente aos agregados de determinada região.

Os testes podem ser classificados em três tipos:

- a) métodos que avaliam os agregados, unicamente;
- b) métodos que avaliam amostras de concreto e argamassa;
- c) métodos para avaliar as combinações cimento/agregado.

Cabe ressaltar que cada metodologia de ensaio tem vantagens e desvantagens, assim como suas limitações. Em alguns casos, um método pode mostrar-se mais rápido, podendo, porém, ser utilizado com eficácia em apenas um tipo de reação. É importante observar o desempenho das metodologias em obras em que foram empregadas, para avaliar seu uso em cada situação.

Neste capítulo serão citados apenas métodos de ensaio laboratoriais, já que o enfoque dessa tese é unicamente a caracterização dos agregados. As investigações de campo não serão abordadas, por se tratarem de avaliações de estruturas de concreto que já apresentam indícios de reação, podendo ser consultadas em Silva *et al.* (1997).

2.4.1 Métodos de avaliação de agregados

Os métodos de ensaio para detecção de RAA que avaliam unicamente os agregados buscam identificar nas rochas determinadas características ou comportamentos que caracterizem expansão quando em contato com álcalis.

Os processos de investigação de reatividade do agregado mais conhecidos abordam a busca de feições geológicas, analisando a origem da rocha. É o caso das técnicas de Análise Petrográfica e Análise de Textura. Tais técnicas não avaliam o comportamento da rocha mediante presença de álcalis, mas buscam indícios de provável comportamento reativo.

O método Químico, normalizado no Brasil pela NBR 9774, avalia também o agregado, porém se embasa no comportamento deste mediante exposição em ambiente agressivo.

2.4.1.1 Análise petrográfica

A análise petrográfica é uma técnica bastante útil na detecção de agregados reativos. Através da petrografia podem-se estabelecer as características da composição mineral e textura dos agregados, indicativas de tensões latentes geradas pela atuação dos processos geológicos sobre a rocha (VIEIRA & OLIVEIRA, 1997). Busca-se, com tal análise, a identificação de fases mineralógicas reconhecidamente instáveis.

A composição mineral pode ser considerada um bom indicador do potencial reativo do agregado. Esta técnica de análise fornece resultados rápidos na previsão da reatividade potencial de agregados, embora não possa prever o comportamento de tal agregado no concreto ou argamassa e também de interações deste com o cimento utilizado.

A análise petrográfica pode ser realizada em amostras de rocha e de concreto endurecido, e as normas para realização destes ensaios são a NBR 7389/92 (Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto), e a ASTM C 856/95 (Standard practice for petrographic examination of hardened concrete), respectivamente. Abrangem diferentes técnicas: observações macroscópicas e microscópicas, estas últimas envolvendo microscopia estereoscópica (luz refletida) e microscopia óptica (luz transmitida).

Além da análise da mineralogia da rocha, é importante buscar-se indícios de reatividade. Broekmans (2004) argumenta que os materiais usados como agregado em concreto têm diversas origens geológicas e, conseqüentemente, o quartzo que eles contêm foi formado sob condições de pressão e temperatura essencialmente diferentes para cada tipo de rocha. Não só o quartzo como todos os outros minerais têm influência das condições de formação, o que se traduz em diferentes comportamentos mediante condições de exposição.

Vieira e Oliveira (1997), em uma revisão crítica sobre avaliação petrográfica da reatividade potencial de rochas, citam as duas correntes mais importantes desta metodologia :

[...] representadas por Dolar-Mantuani (1981), que infere a reatividade potencial exclusivamente a partir do ângulo de extinção do quartzo, e por Grattan-Bellew (1986) e French (1992) que avaliam a reatividade a partir de critérios mais amplos (granulação e textura da rocha) [...]

O critério de Dolar-Mantuani traduz um conceito abstrato, a reatividade potencial do agregado, em um valor numérico: o ângulo de extinção. Embora bastante prático, é também simplista: agregados com ângulo menor que 15° são considerados inertes e aqueles com ângulo maior que 25° são considerados reativos. As autoras avaliam que, para agregados graníticos e gnáissicos brasileiros, são bastante comuns ângulos de extinção entre 15° e 25° , um intervalo sem classificação proposta segundo o método de Dolar-Mantuani. Embora isto não invalide o critério, deve-se necessariamente aliá-lo a outras observações petrográficas.

Ainda neste mesmo estudo, Vieira e Oliveira (1997) fizeram a descrição petrográfica de alguns agregados usados em concreto e compararam esses resultados com os obtidos pelo método acelerado da África do Sul (NBRI). O estudo considerou os dois métodos bastante concordantes, mas frisa que a análise petrográfica deve considerar todos os aspectos que possam denotar tensões latentes (como microfissurações, estiramento dos grãos e foliação), e não se basear somente em critérios particulares (como o ângulo de extinção do quartzo). De

acordo com as autoras, as reações do tipo álcali-silicato ou álcali-sílica (as mais comuns no Brasil) podem ser identificadas a partir de algumas características gerais:

- a) presença de constituintes deletérios como por exemplo vidro vulcânico, clorofeíta, opala e calcedônia;
- b) presença de quartzo com ângulo de extinção ondulante (o ângulo de extinção do quartzo é um dos parâmetros que exprime a deformação do seu retículo cristalino);
- c) presença de minerais silicáticos (argilo-minerais, quartzo) com granulação fina ou muito fina;
- d) minerais fortemente alinhados e estirados segundo direções preferenciais, em função de cisalhamento.

Exemplos de rochas apresentando feições que são tipicamente indícios de reatividade potencial estão nas figuras a seguir. A Figura 15 mostra a micrografia sob polarizadores cruzados de um basalto submetido à análise petrográfica, onde pode ser notada a presença de vidro vulcânico (em amarelo) em grande quantidade, disperso entre os demais minerais. Na Figura 16 está a amostra de um granito, apresentando forte extinção ondulante do quartzo.

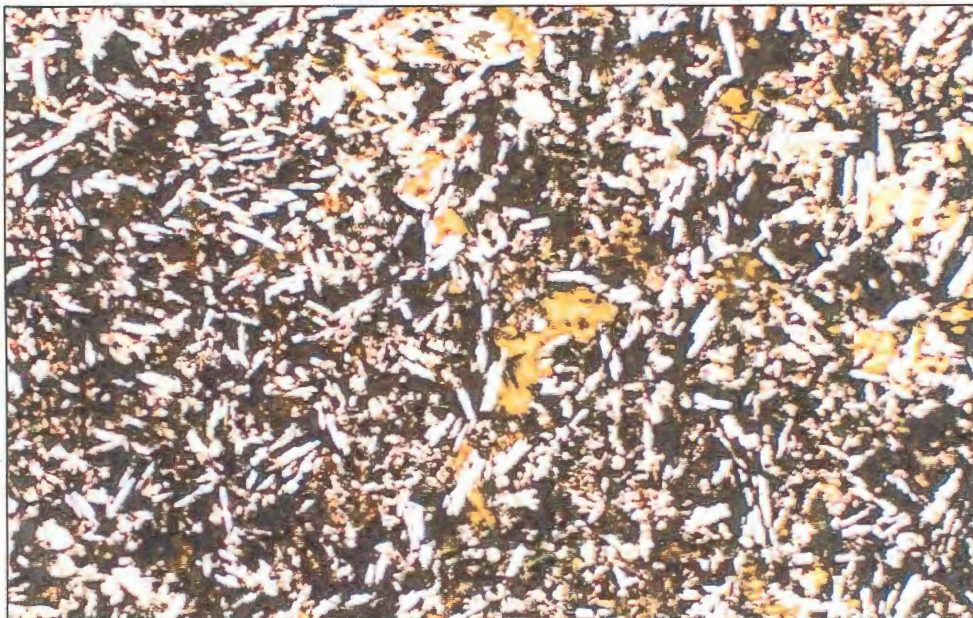


Figura 15: amostra de basalto apresentando indícios de reatividade potencial (vidro vulcânico, em amarelo). Aumento: 50 x. (VALDUGA, 2002).

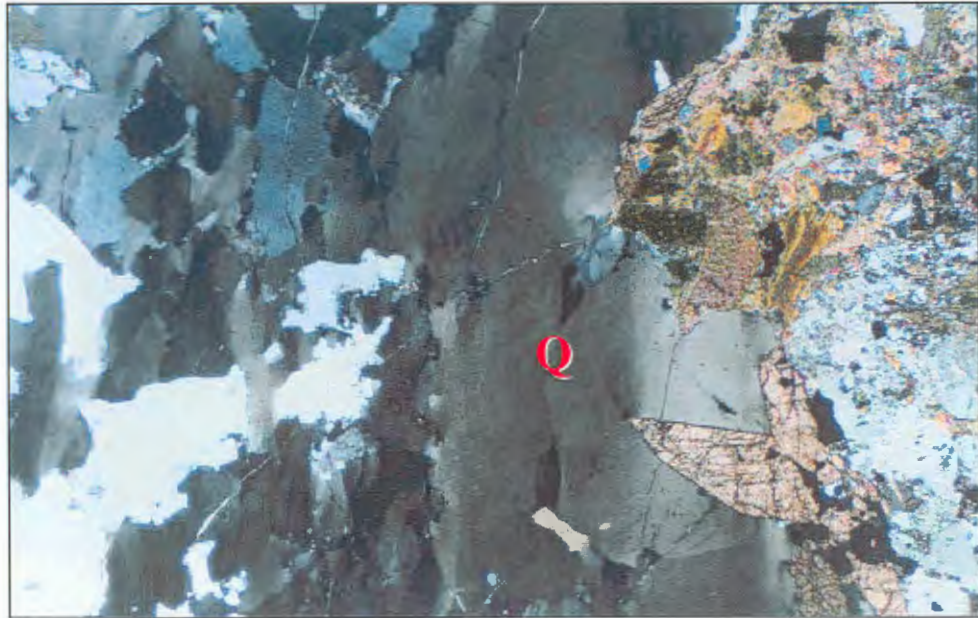


Figura 16: amostra de granito apresentando indícios de reatividade potencial (quartzo altamente deformado – Q). Aumento: 50 x. (VALDUGA, 2002).

Outro estudo bastante interessante que pode ser citado, utilizando as técnicas de análise petrográfica na detecção de RAA, é o de Armelin e Paulon (1997). Neste trabalho, os autores mostram a análise e diagnóstico da barragem de concreto da UHE de Jurupará, que já apresentava um quadro instalado de RAA, utilizando as técnicas de análise petrográfica e microscopia eletrônica, além da execução de ensaios acelerados.

Vieira (1997) faz uma descrição do procedimento de uma análise petrográfica visando avaliar a patologia RAA em concretos:

- a) análise macroscópica a olho nu: tem como objetivo a caracterização geral do concreto, para avaliar o comprometimento da sua qualidade em função de processos deletérios;
- b) análise ao microscópio estereoscópico: com atenção especial aos poros, fissuras, superfícies dos agregados e zonas de interface agregado/argamassa, com o objetivo de identificar eventuais presenças de gel ou produtos cristalizados;
- c) análise ao microscópio ótico de luz transmitida: é feita em uma lâmina de, aproximadamente, 30 μm , de modo a permitir a passagem de luz, de acordo com os procedimentos usualmente empregados para a análise de rocha;

- d) análise ao microscópio eletrônico de varredura: tem como principal objetivo a confirmação de inferências feitas a partir dos estudos ao microscópio ótico e estereoscópico.

De acordo com a autora, todas estas técnicas têm importância quando integradas, pois cada uma delas se presta a uma finalidade específica. Análises restritas à observação macroscópica e ao microscópio estereoscópico levam a resultados superficiais ou diagnósticos errados, enquanto as análises microscópicas, particularmente as realizadas em microscópio eletrônico de varredura, vão a um detalhamento que impedem a visão de conjunto.

2.4.1.2 Análise de textura

Quando a reação álcali-agregado foi descoberta e caracterizada como uma reação deletéria ao concreto, na década de 40, o principal componente mineralógico associado à reação era a sílica, nas formas amorfa, vítrea, criptocristalina ou microcristalina. Quando mais desordenada fosse a estrutura da sílica, maior seria a reatividade.

A presença de vidro vulcânico disseminado na matriz de muitas rochas de origem basáltica pôde ser considerada, desde o início das pesquisas sobre o assunto, um forte indício de reatividade potencial.

Entretanto, na década de 70, Gogte (1973) conduziu estudos que afirmavam serem as rochas quartzosas também susceptíveis à reação álcali-agregado. Granitos, gnaisses e quartzitos foram investigados e o autor chegou a resultados que mostravam a correlação entre a reatividade potencial e o ângulo de extinção ondulante das rochas. Segundo o autor, quanto mais deformado é o quartzo presente na rocha, exibindo forte extinção ondulante, mais reativa é a rocha.

Posteriormente, outros autores encontraram evidências adicionais de reatividade neste tipo de rocha. Grattan-Bellew (1992) associou a reação com a presença de quartzo microcristalino e French (1992) com o tamanho dos grãos de quartzo, a porosidade e o estado de fratura da rocha e o estiramento dos grãos.

Apesar destes indícios de reatividade em rochas quartzosas serem reconhecidos por vários cientistas e fornecerem informações importantes para a classificação da rocha quanto à reatividade potencial, autores como Monteiro *et al.* (2001) chamam atenção para o fato de que, exceto pelo tamanho do grão, informações quantitativas das características das rochas

são limitadas. Adicionalmente, o uso do ângulo de extinção para a caracterização da RAA tem sido bastante criticado, de acordo com os mesmos autores. Estes explicam que o grau de deformação de uma rocha comumente pode ser conhecido através da observação do ângulo de extinção ondulante do quartzo encontrado nesta rocha. Entretanto, a extinção ondulante do quartzo pode desaparecer quando a rocha é submetida a grandes deformações.

Monteiro *et al.* (2001) propuseram então o uso de novas técnicas para investigação de RAA: a análise de textura da rocha, através de difração de raios X e difração de nêutrons. Em seus estudos preliminares, foram encontradas correlações significativas entre o grau de orientação preferencial da rocha e as expansões obtidas em ensaios conduzidos segundo a ASTM C 1260. Foram analisadas três rochas de mesma procedência e de mesma composição química e mineralógica, sendo que a única diferença entre elas era o grau de deformação. As rochas com maior grau de deformação apresentaram maiores expansões.

Os autores também encontraram que o grau de deformação da rocha e, conseqüentemente, a sua reatividade potencial, estavam correlacionados com a textura da biotita e não com a textura do quartzo deformado para aqueles tipos de rocha. O alinhamento dos grãos da biotita leva ao desenvolvimento de foliação, o que se julga ser responsável pelo aumento da reatividade.

Monteiro *et al.* (2001) afirmam que o método da análise de textura pode fornecer um parâmetro quantitativo para análise da reatividade potencial, uma vez que a orientação preferencial da rocha pode ser considerada um indicativo de reatividade.

Kerrick e Hooton (1992) encontraram resultados similares quanto à foliação. Ensaando oito amostras de agregados, eles chegaram à conclusão de que as amostras que apresentaram maior reatividade foram aquelas com tamanhos de grãos relativamente pequenos e as altamente foliadas (apresentando alta xistosidade). O transporte de fluidos através das rochas é facilitado por planos de foliação de rochas com xistosidade, segundo geólogos, e em função disso os autores relacionam a foliação com a reatividade potencial, pois a penetração de soluções alcalinas é facilitada nestes tipos de rocha.

Wenk e Christie (1991) chamam atenção para o fato de que o termo “textura”, neste contexto, deve ser entendido como “orientação cristalográfica preferencial”, o que é diferente do significado do termo usualmente empregado em Petrografia. Para a Petrografia, “textura” envolve tamanho e forma do grão, e ainda a sua cristalinidade. Na análise de orientação

cristalográfica preferencial de rocha, os vários aspectos da textura estão intimamente ligados à deformação, que é um dos mais importantes processos geomórficos, de acordo com os autores.

2.4.1.2.1 Metodologia para ensaio

Segundo Wenk e Pannetier (1990), texturas de materiais polifásicos são inerentemente difíceis de serem determinadas. Se o tamanho do grão é suficientemente grande, um microscópio ótico com estágio universal pode ser usado, mas as informações limitam-se à orientação do quartzo e da biotita. Além disso, os autores comentam que, comumente, o tamanho do grão em amostras de rochas deformadas é demasiadamente pequeno para investigações óticas.

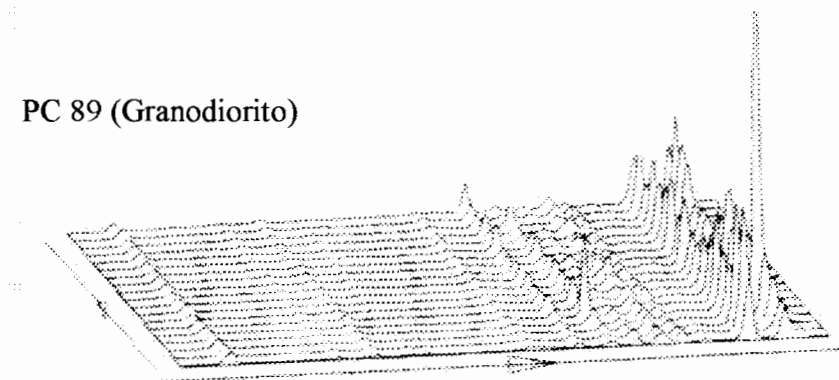
A microscopia eletrônica é uma técnica que pode ser aplicada também para a investigação de textura de rocha, tanto a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) como a Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET). Entretanto, Wenk e Pannetier (1990) afirmam que a técnica envolve medidas grão a grão, o que pode ser demasiadamente trabalhoso, tornando lenta a obtenção de resultados.

Deste modo, os métodos mais amplamente usados nos últimos anos para análise de textura vêm sendo as técnicas de difração. Monteiro *et al.* (2001) citam que a orientação dos cristais pode ser medida em um microscópio ótico equipado com um estágio universal, porém é usada mais comumente a difração de raios X, com um goniômetro de figuras de pólo. Difração de elétrons e nêutrons são técnicas mais especializadas: enquanto a difração de elétrons pode fornecer a análise grão a grão da orientação, a difração de nêutrons faz uma análise volumétrica do material.

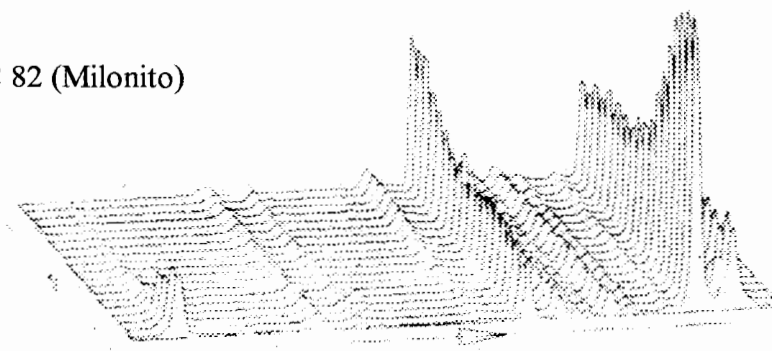
2.4.1.2.2 Interpretação dos dados

A partir da avaliação qualitativa da textura representada por difratogramas, como exemplificado na Figura 17, são construídas as chamadas figuras de pólo.

PC 89 (Granodiorito)



PC 82 (Milonito)



PC 92 (Filonito)

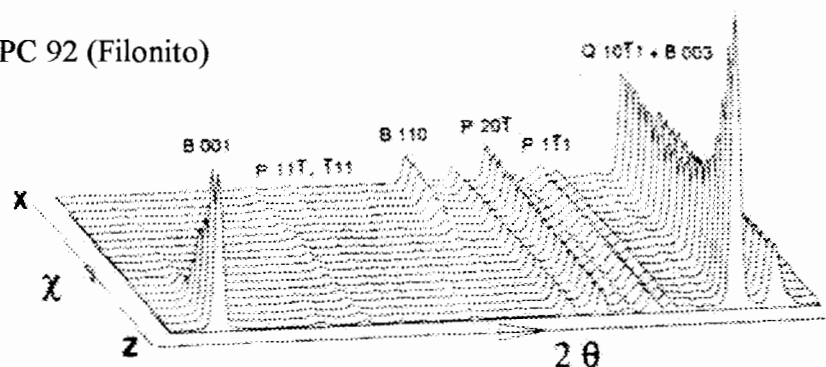


Figura 17: representação da textura como difratogramas. (WENK e PANNETIER, 1990).

Figuras de pólo podem ser construídas para cada mineral desejado, e para respectivos Índices de Miller (hkl). O Índice de Miller pode ser definido como o inverso do ponto de corte da família de planos, em cada eixo da célula unitária.

As figuras são contornadas para mostrar múltiplos de distribuição randômica e são representadas em áreas iguais de projeção.

Na Figura 18 está um exemplo de figuras de pólo construídas por Wenk e Pannetier (1990) para o mineral biotita, em três amostras de rochas de mesma composição mineral, mas com graus de deformação diferentes: um granodiorito (PC 89), um milonito (PC 82) e um filonito (PC 92). Pode se observar que, quanto maior a variação nos picos do espectro, como, por exemplo, no pico B 001 da amostra PC 92, representada na Figura 17, menor é a dispersão nas figuras de pólo (Figura 18, amostra PC 92).

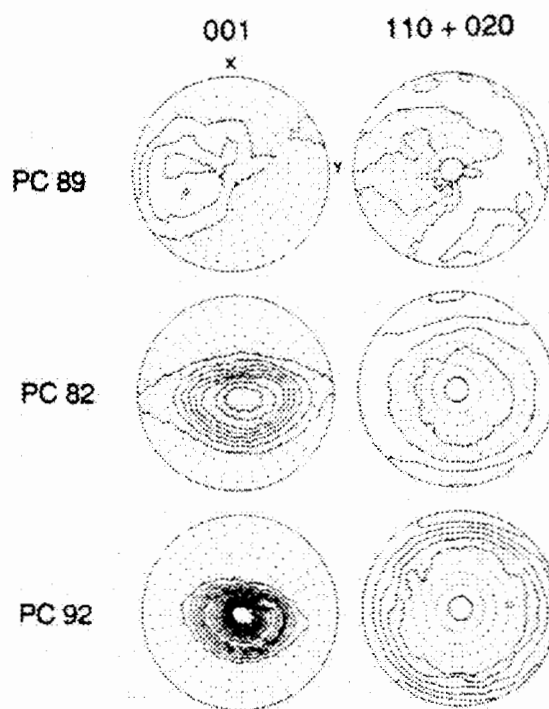


Figura 18: figuras de pólo para o mineral biotita. (WENK e PANNETIER, 1990).

A partir de figuras de pólo, Monteiro *et al.* (2001) correlacionaram, em um estudo, as expansões obtidas para cada amostra através do ensaio da ASTM C 1260 e a textura de determinados minerais representada em múltiplos de distribuição randômica. Em gráficos como o da Figura 19, os autores comprovaram existir uma boa correlação entre a textura do mineral biotita e a reatividade das três rochas analisadas.

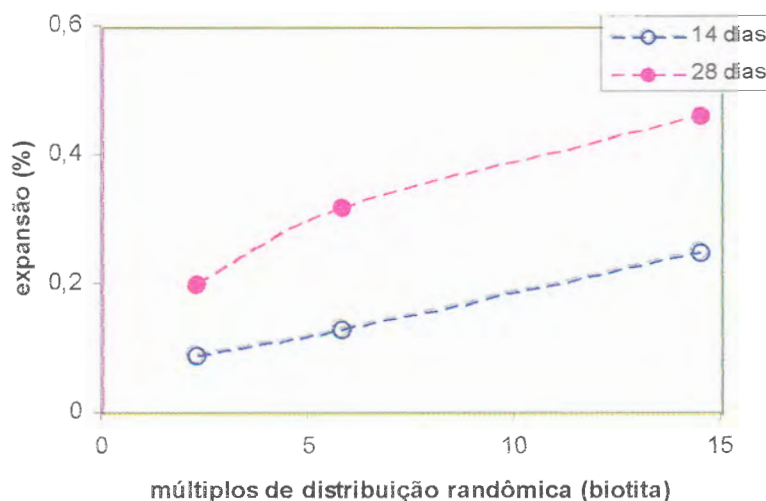


Figura 19: correlação entre expansões medidas pela ASTM C – 1260 e a textura da rocha, adaptado de Monteiro *et al.* (2001).

Segundo Wenk e Pannetier (1990), já foi demonstrado que é possível, embora difícil, construir figuras de pólo de materiais polifásicos complexos.

2.4.1.3 Método Químico

Este método de ensaio foi desenvolvido por Richard Mielenz (*apud* PAULON, 1981), entre 1947 e 1952. Este pesquisador avaliou inicialmente 71 agregados através da verificação da sílica dissolvida (S_d) e da redução da alcalinidade (R_d) e organizou estes resultados em um gráfico, adotando a curva correspondente à relação $S_d/R_d = 1$ como limite entre materiais deletérios e inócuos.

No Brasil este método é normalizado pela NBR 9774/87 (Agregados – Verificação da reatividade potencial pelo método químico) e nos Estados Unidos como ASTM C 289/03 (Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates – Chemical Method).

A única vantagem do método químico é a rapidez do ensaio. O tempo de submissão às chamadas "condições péssimas" (alta temperatura e ambiente agressivo) é bem menor que em outros métodos. A amostra fica submetida à uma solução de NaOH 1N à 80° C por apenas 24 horas.

Utiliza pequenas quantidades de amostra (aproximadamente 75 g) de apenas uma faixa granulométrica (passante na peneira 0,3mm e retida na peneira 0,15mm). Após o tempo de exposição de 24 horas, a amostra é filtrada e são feitas análises para determinação da

quantidade de sílica dissolvida no filtrado e da redução da alcalinidade da solução, inicialmente com concentração de 1N.

Classifica-se o agregado através de um gráfico (tal como o gráfico da Figura 20), onde os eixos são a redução de alcalinidade e a quantidade de sílica dissolvida, em milimoles por litro.

Diversos pesquisadores no mundo todo usam esta metodologia. OLAGUE *et al.* (1999) utilizaram a ASTM – C 289 para avaliar 46 amostras de agregados provenientes do estado do Chihuahua, no México. Kawamura *et al.* (2000) utilizaram a ASTM C 289 para classificação prévia do agregado a ser utilizado em seu estudo. Freitag *et al.* (2000) concluíram que a ASTM C 289 é um ensaio rápido e mais apropriado do que a ASTM C 1260 para agregados da Nova Zelândia.

Entretanto, apesar de ser um método bastante popular e prático, é criticado por alguns pesquisadores. Fontoura (1999) aponta três problemas apresentados por este método:

- a) o método é válido para identificação de agregados altamente reativos, porém falho na identificação de reações lentas;
- b) certos agregados têm elevadas quantidades de sílica solúvel presente, mas produzem pequenas expansões no concreto em serviço;
- c) usualmente não é aplicável para avaliar agregados oriundos de rochas carbonatadas.

Valduga (2002) mostra indícios de que as condições de ensaio sejam pouco agressivas e que a curva do gráfico constante nesta norma necessite de um ajuste para que possa ser utilizada. Em uma pesquisa onde ensaiou 36 diferentes rochas do estado de São Paulo através deste método, apesar de outras técnicas de ensaio acusarem que 60% das rochas eram reativas (amostras identificadas com quadrados vermelhos no gráfico da Figura 20), o método químico classificou todas as rochas como inócuas. A apresentação destes resultados está na Figura 20. Hasparyk (1999) ensaiou um quartzito e um basalto reativos e também verificou inconsistência do método.

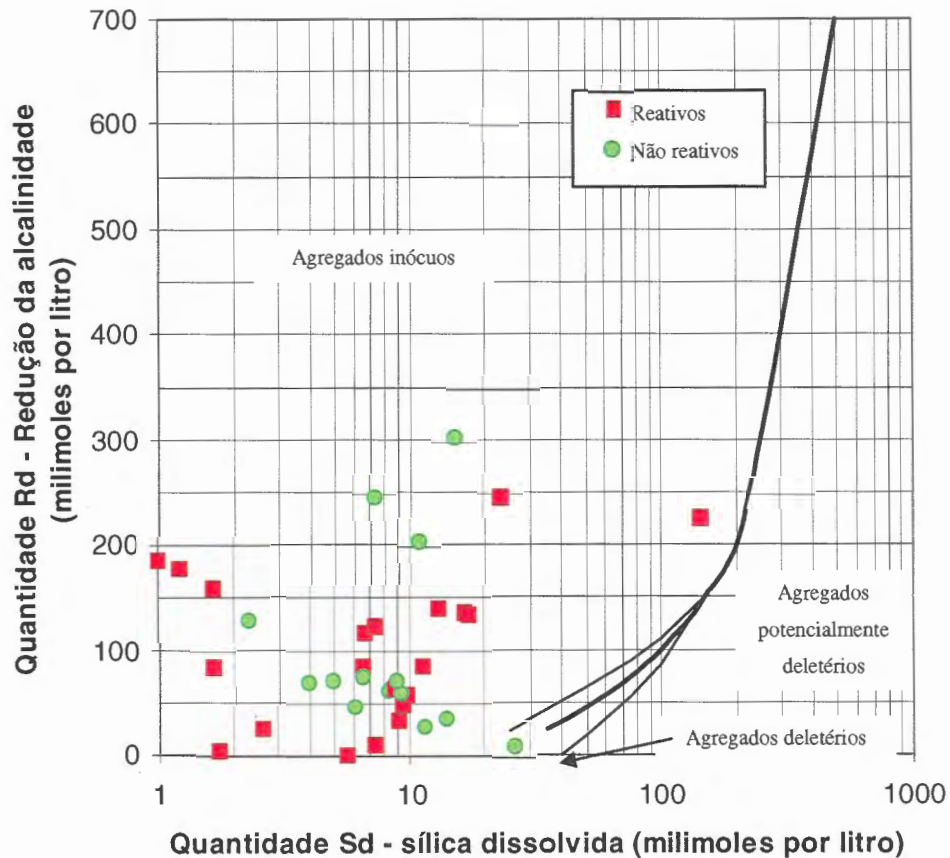


Figura 20: análise de rochas do estado de São Paulo segundo a NBR 9774/87 (baseado em: VALDUGA, 2002).

2.4.2 Métodos de avaliação de concretos e argamassas

Os métodos que avaliam concretos e argamassas confeccionados com agregados reativos são bastante empregados, pois permitem avaliar o desempenho destes agregados dentro da matriz, simulando condições de exposição. O produto de reação também pode ser avaliado, e não só a reatividade potencial da rocha como nos métodos de avaliação dos agregados apenas.

2.4.2.1 Método acelerado

O chamado método acelerado foi inicialmente desenvolvido por Oberholster e Davies (1986) e é um dos métodos mais difundidos e utilizados no mundo todo. Também chamado de NBRI ou Método Sul-Africano, consiste em moldar barras de argamassa com o agregado em faixas granulométricas e porcentagens pré-definidas, e consistência fixa (a água utilizada na mistura deve corresponder a um índice de consistência entre 105% e 120% do diâmetro inicial).

As barras são então estocadas em imersão em uma solução de NaOH 1N, a 80° C, e são tomadas medidas de expansão em idades determinadas. O objetivo é simular as condições péssimas necessárias para que a reação ocorra: alta temperatura, umidade e teor de álcalis.

Posteriormente, este método foi normalizado como ASTM C 1260, com pequenas variações. A principal delas é que as barras de argamassa são moldadas com uma relação água/cimento fixa de 0,47 (a consistência não é fixa como no método NBRI).

É chamado método acelerado porque o tempo de ensaio é bastante reduzido em comparação com outros métodos. A leitura de referência para a ASTM C 1260 é aos 16 dias de idade (14 dias de imersão na solução de NaOH), quando são observados os limites de expansão. Os limites de expansão, segundo a ASTM C 1260, são os seguintes:

- a) expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias indicam um comportamento inócuo na maior parte dos casos;
- b) expansões entre 0,10% e 0,20% aos 16 dias indicam possibilidade do agregado ter comportamento potencialmente reativo, sendo necessárias investigações complementares;
- c) expansões superiores a 0,20% aos 16 dias indicam reação deletéria.

Os resultados dos ensaios de expansão em geral são bastante discutidos, principalmente o ensaio de expansão acelerado, em virtude das condições de ensaio, julgadas muito agressivas.

2.4.2.1.1 Solução de imersão e temperatura de ensaio

Pesquisadores como Bérubé e Frenette (1994) realizaram estudos variando alguns fatores, tais como soluções de KOH, NaCl e água e temperatura de 38° C, além das condições da ASTM C 1260 (solução de NaOH a 80° C). Estes pesquisadores chegaram à conclusão de que a solução de NaOH é realmente a mais indicada para o ensaio, mas questionam a temperatura de 80° C como muito severa.

Moranville-Regourd (1989) incluiu resultados de ensaios acelerados em suas pesquisas sobre produtos de RAA em concretos e argamassas, e seu trabalho foi considerado uma parte importante nos estudos para estabelecer a validade do método acelerado NBRI. A pesquisadora concluiu que produtos de reação encontrados em barras de argamassa submetidas a ensaios acelerados (solução de NaOH 1N à 80° C) possuem composição química

e morfologias similares àqueles formados em estruturas de concreto de campo (HELMUTH e STARK, 1992).

2.4.2.1.2. Idade de referência para as leituras de expansão

Quanto à idade para avaliação da reatividade, Oberholster e Davies (1986) propuseram inicialmente como limite de expansão das barras de argamassa o valor de 0,11% aos 12 dias de ensaio. Já Shayan *et al.* (1988) estipularam que os agregados deveriam ser analisados entre 10 e 22 dias de ensaio, com 0,10% de expansão como limite.

A ASTM C 1260 foi publicada em 1994, mantendo os valores de 0,10% como limite de expansão, mas aos 14 dias de ensaio (imersão em solução alcalina). A norma recomenda, entretanto, que, para observar o comportamento de agregados com valores de expansão entre 0,1% e 0,2%, para os quais se mantém a dúvida sobre o caráter inócuo ou deletério, o ensaio seja levado, ao menos, até os 28 dias.

Valduga (2002) identificou, entre 36 amostras ensaiadas, que alguns agregados reativos somente exibiram expansões acima dos limites especificados pela ASTM C 1260 após os 16 dias de idade.

Silveira *et al.* (2002) avaliaram agregados comprovadamente reativos das Usinas Hidrelétricas de Apolônio Sales (Moxotó) e Paulo Afonso I, II, III e IV, e recomendam estender ensaios acelerados segundo a ASTM C 1260 até idades de 45 dias, para melhor identificação da fase indutiva do agregado. Silva (2007) também analisou os agregados empregados nas Usinas Hidrelétricas de Paulo Afonso I, II, III e IV e verificou que, segundo os limites de expansão da ASTM C 1260, aos 16 dias, as amostras seriam classificadas como inócuas. A pesquisadora então afirma que, a partir da constatação dos danos causados pela instalação da RAA nas usinas estudadas, conclui-se que estes limites não são aplicáveis para as litologias das rochas em questão.

Kuperman *et al.* (1997), fazendo uma apreciação crítica sobre os ensaios de expansão, questionam até que idade devem ser ensaiados os corpos-de-prova, quais os limites máximos de expansão para cada idade e ainda se os valores preconizados nas normas de outros países são adequados para o Brasil. Os autores comentam que diversos fatores são intervenientes no processo, tais como a existência de restrições em uma estrutura, que não são possíveis de se reproduzir em laboratório, e a maior relação área/volume dos corpos-de-prova de ensaios

laboratoriais em relação aos protótipos do campo, fazendo com que absorvam, por esta razão, mais água.

2.4.2.1.3 Água de amassamento

A quantidade de água adicionada na argamassa para moldagem das barras utilizadas no ensaio influencia diretamente a relação água/cimento e a consistência dessa argamassa.

A moldagem das barras de argamassa com a relação água/cimento fixa pela ASTM C 1260 (0,47) proporciona o surgimento de argamassas de diferentes consistências, função da forma e textura superficial do agregado. Isso dá origem a argamassas mais ásperas ou mais trabalháveis, de fácil moldagem ou não, e conseqüentemente barras com maior ou menor porosidade. Valduga (2002) relata casos de amostras que não exibiram expansões significativas no ensaio acelerado, entretanto uma análise das argamassas em microscópio eletrônico de varredura acusou presença de produtos de reação. O gel, nesses casos, apresentava-se dentro dos poros da argamassa, e a porosidade influenciava diretamente em um resultado negativo de reatividade potencial.

Valduga *et al.* (2005) estudaram a influência da relação água/cimento, da consistência e da forma do agregado na expansão de argamassas ensaiadas de acordo com a ASTM C 1260. Neste trabalho os autores ensaiaram o mesmo agregado, um basalto previamente analisado (VALDUGA, 2002) e comprovadamente reativo, variando alguns fatores como a forma do agregado, mediante processos de britagem diferenciados, e a relação a/c e a consistência das argamassas mediante uso de aditivo plastificante.

O agregado foi chamado de F1, F2 e F3, de acordo com os diferentes processos de britagem que foram empregados: F1 – utilizado na forma que foi recebido da pedreira que forneceu o material, F2 – material moído em Abrasão Los Angeles e F3 – material moído em moinho de mandíbulas. As relações a/c estudadas foram 0,27 , 0,37 e 0,47 (esta última empregada na ASTM C 1260). A consistência fixa empregada em uma das séries analisadas foi de (225 ± 5) mm, valor este adotado pela NBRI.

Os resultados mostraram que argamassas com mesma consistência, mas diferentes formas do grão (logo com diferentes relações a/c), não variaram expressivamente os valores de expansão (Figura 21). Porém, argamassas de mesma consistência e mesma relação a/c, mas diferentes

formas de grão, exibiram grande variação nos resultados de expansão, e esta variação aumenta quando a relação a/c diminui (Figura 22).

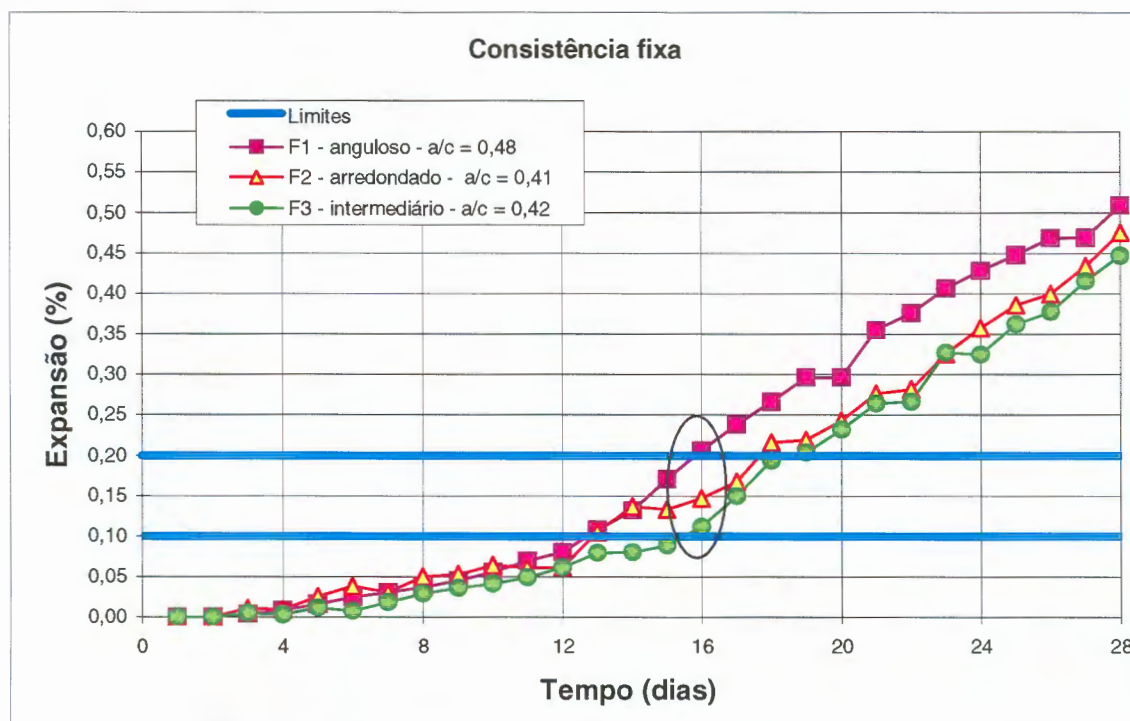


Figura 21: agregados de diferentes formas de grão, ensaiados com a mesma consistência (VALDUGA *et al.*, 2005).

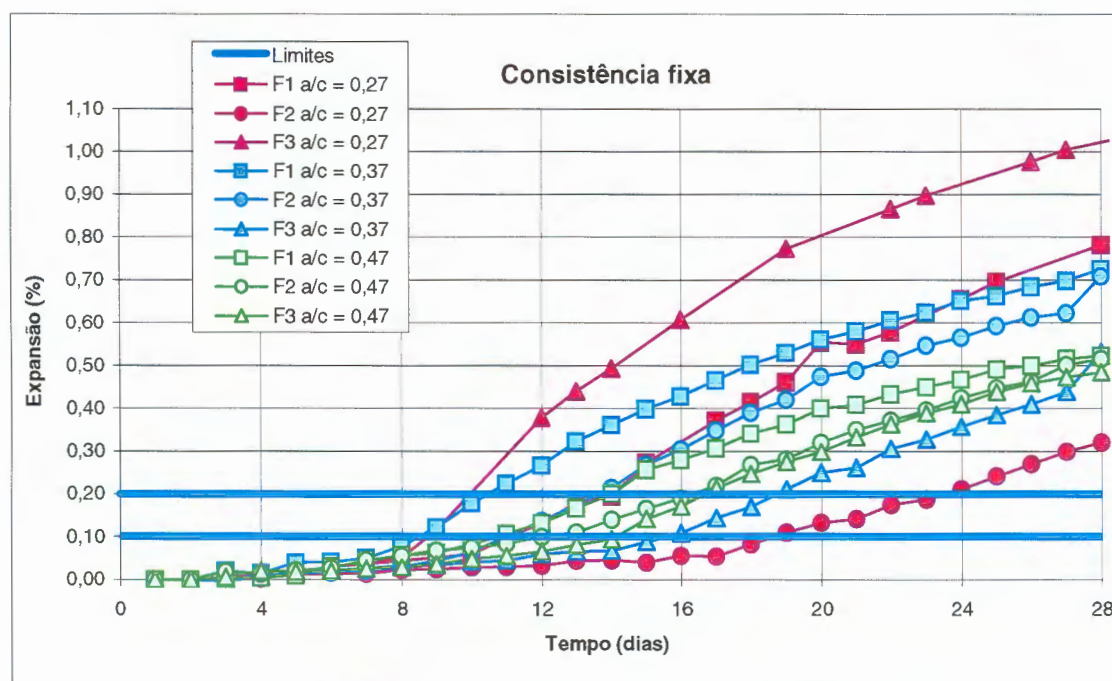


Figura 22: agregados de diferentes formas de grão, ensaiados com consistência fixa e relações a/c fixas (VALDUGA *et al.*, 2005).

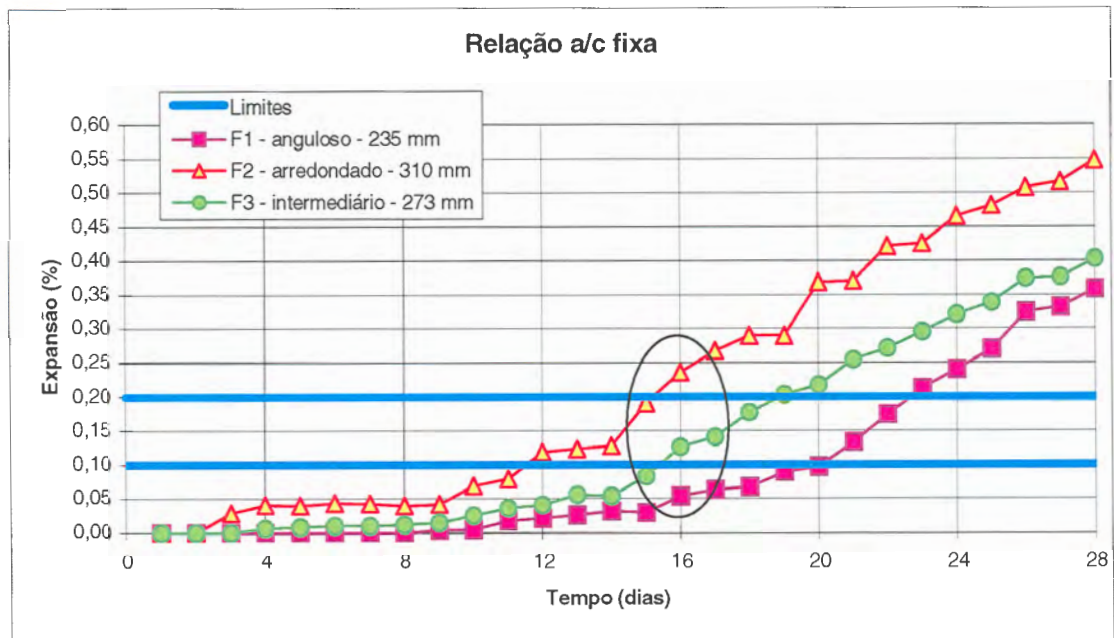


Figura 23: agregados de diferentes formas de grão ensaiados com a relação a/c fixa de 0,47 (VALDUGA *et al.*, 2005).

O dado mais notável é que o mesmo agregado, britado de formas diferentes e ensaiado com a mesma relação a/c (0,47), exibe expansões tão diferenciadas que classificam o agregado, aos 16 dias de idade, como inócuo, potencialmente reativo e reativo (Figura 23). Ou seja, o agregado é reativo, porém se recebido na forma de agregado graúdo necessitará de britagem para que seja ensaiado de acordo com a ASTM C 1260. De acordo com o processo de britagem realizado, o agregado poderia ser considerado inócuo na idade de referência do ensaio.

Isto chama atenção para a influência da forma do grão no resultado do ensaio segundo a ASTM C 1260, e para as limitações do diagnóstico da reação com este ensaio, em alguns casos. Já para análise da reatividade potencial do agregado de acordo com as condições de ensaio do NBRI, esta influência não foi muito significativa, e o agregado pôde ser classificado como reativo.

Grattan-Bellew (1997) analisou alguns métodos chamados “ultra-acelerados”, tais como o método NBRI, o método Químico e métodos que utilizam autoclave. O autor argumenta que os prazos exíguos para projetos e execução de obras, levam à necessidade de um método rápido para avaliar a reatividade do agregado em poucas semanas. O único método que tem

Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado.

sido usado e preenche estes requisitos é o método NBRI, atualmente chamado de acelerado. Entretanto, o autor sugere que cuidados devem ser tomados para a interpretação dos resultados deste método, pois, apesar de comumente apresentar resultados satisfatórios, as condições são bastante severas. Segundo Grattan-Bellew (1997), foram relatados vários casos de agregados com bom comportamento em campo, que falharam no ensaio, bem como granitos que passaram no teste e apresentaram reação quando utilizados em estruturas.

Hasparyk *et al.* (2007) citam também os chamados resultados “falso positivos” e “falso negativos”, e comentam a respeito das limitações do método. São citados: o fato do teste não reproduzir exatamente o fenômeno encontrado e as condições reais de exposição da estrutura, a análise ser feita em barras de argamassa e não de concreto, modificando assim as características do compósito de cimento analisado, a eventual inadequação do método para determinados tipos de agregados de lento comportamento e a variabilidade dos materiais empregados, mais especificamente o cimento.

Neste estudo, Hasparyk *et al.* (2007) demonstram que a finura e o teor de álcalis, na presença de um agregado reativo, influenciam significativamente nos resultados de expansão.

Farias, Hasparyk e Andrade (2007) analisaram a influência de aditivos químicos nas expansões registradas com a metodologia de ensaio da ASTM C – 1260, em argamassas com e sem adições (sílica ativa e metacaulim). Nas argamassas sem adições, o comportamento das combinações não foi alterado em relação à argamassa de referência (todas foram classificadas como reativas, com expansões maiores que 0,2% aos 16 dias). Entretanto, os autores observaram que alguns aditivos promoveram intensificação ou diminuição das expansões. As maiores variações foram obtidas para quando foram usados aditivos à base de policarboxilato e naftaleno (aproximadamente 17%), sendo que foram avaliados ainda aditivos à base de melamina e lignosulfonatos. Para as argamassas com adições o agregado continua sendo classificado como reativo aos 30 dias, porém aos 16 dias há variações bastante significativas nas expansões, deixando clara a influência dos aditivos. Os autores sugerem estudos mais aprofundados sobre este assunto, de forma a entender o fenômeno.

A eficácia do método de ensaio da ASTM C – 1260 ainda não foi plenamente comprovada, e isto é evidenciado pela influência de vários fatores, como os citados anteriormente, nos resultados do método. Uma maior quantidade de estudos a respeito ajudará a tornar mais pleno o entendimento sobre o mecanismo de funcionamento do método.

2.4.2.2 Método dos prismas de concreto

O chamado método dos prismas de concreto tem como referência a norma americana ASTM C -1293/2006 (Standard test method for concrete aggregates by determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction).

Esse método permite avaliar a potencialidade reativa de agregados miúdos ou graúdos. Se o objetivo for a avaliação de agregados graúdos, utiliza-se agregados miúdos não reativos para confecção do concreto, e vice-versa. Esta é a grande vantagem deste método, pois para realizar a análise de agregados graúdos não é necessário britá-los, alterando as características dos mesmos.

Prismas de concreto são confeccionados para o ensaio, sendo que a dimensão máxima característica do agregado graúdo deve ser 19 mm. Estes prismas são acondicionados em recipientes com atmosfera saturada de vapor d'água a uma temperatura de 38° C. O agregado é considerado reativo se a expansão em 1 ano de ensaio for igual ou maior que 0,04%.

Além da vantagem de avaliar concretos e não argamassas, eliminando assim possíveis influências da redução de tamanho do agregado, este método é considerado complementar e definitivo, pois elimina as eventuais dúvidas deixadas pelos outros métodos de ensaio. A principal desvantagem é o tempo de ensaio, que é demasiadamente longo.

2.4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura é uma técnica largamente empregada na análise da microestrutura de concretos e argamassas, dentre vários outros materiais utilizados na construção civil. É bastante utilizada para análise de produtos de hidratação do cimento e investigação de produtos de ataques de agentes agressivos, entre eles os produtos de reação álcali-agregado.

O MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) possui alta resolução e grande profundidade de foco. A amostra é alcançada por um feixe de elétrons e diversas informações podem ser fornecidas a partir dos sinais originados.

A interação dos elétrons com a superfície do concreto dão origem a 3 tipos de sinais (MARUSIN, 1995):

- a) elétrons secundários: as micrografias obtidas a partir de elétrons secundários de baixa energia apresentam a morfologia da microestrutura em 2 ou 3 dimensões. Indicada para superfícies de fratura;
- b) elétrons retroespalhados: de alta energia, refletem a diferença entre os números atômicos e distinguem as partículas através de diferença de brilho. Indicada para superfícies polidas;
- c) raios X: comumente um espectrômetro de raios X por dispersão em energia é utilizado conjuntamente ao Microscópio Eletrônico de Varredura, a fim de identificar cada elemento químico em um espectro contínuo, pela posição do seu pico. Esta análise é chamada de EDS.

Os três tipos de sinais são bastante úteis para o estudo de produtos de reação de RAA. Quando se deseja observar a morfologia do gel, os elétrons secundários são empregados. Os elétrons retroespalhados são utilizados quando a estrutura da matriz é mais densa, logo se faz útil a diferenciação dos produtos através desta técnica. E os raios X são essenciais para caracterizar os elementos que estão presentes nos produtos de reação, o que leva à confirmação da constituição química do mesmo (MARUSIN, 1995).

Diamond (2004) comenta que microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons retroespalhados não é usualmente empregada no estudo ou descrição dos agregados graúdos e miúdos, exceto em casos especiais, como na análise de amostras de agregados reativos a álcalis. Entretanto, na quantificação de elementos constituintes do gel da reação é uma técnica bastante eficiente (HASPARYK, 1999 e HASPARYK *et al.*, 1997).

Através do MEV podem ser analisadas amostras de concreto ou argamassa que tenham sido ensaiadas através de outros métodos (como o método acelerado) e exibam produtos de reação, ou mesmo fragmentos de testemunhos de concreto extraídos de obras suspeitas de apresentarem RAA. Um exemplo de imagem obtida de produtos de reação em argamassa ensaiada pelo método acelerado é mostrado na Figura 24.



Figura 24: imagem de gel maciço gretado da reação álcali-agregado obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura. (VALDUGA, 2002).

De acordo com Silva *et al.* (1997), na análise de produtos de RAA é importante a observação de bordas preenchendo as interfaces da pasta/agregado em amostras polidas, bem como de superfícies de fratura. O gel pode estar concentrado nos poros da amostra, disperso na argamassa, interfaces e depositados nas fissuras dos agregados.

O reconhecimento dos produtos de reação é feito através da morfologia e composição química, esta última dada por um espectrômetro de raios X (EDX) acoplado, que recupera a zona de raios X através da medição de sua energia, em um processo chamado microanálise (HASPARYK, 1999).

2.4.3 Métodos de avaliação de combinações cimento/agregado

A NBR 9773/87 (Reatividade potencial de álcalis em combinações cimento/agregado) consiste em moldar barras de argamassa utilizando-se as combinações de cimento e agregado que se deseja testar. O método é bastante semelhante à ASTM C 1260, com algumas diferenças:

- a) são moldadas 4 barras de argamassa;
- b) a água de amassamento é definida por um índice de consistência, que deve estar entre 105% e 120%;
- c) as leituras de expansão são feitas aos 14 dias e nas idades de 1, 2, 3, 4, 6, 9 e 12 meses;
- d) as barras ficam estocadas em ambiente de elevada umidade, à 38° C;
- e) os limites de expansão são de 0,05% aos 3 meses e 0,1% aos 6 meses.

Diversos pesquisadores consideram o método confiável em função das condições de estocagem das amostras, uma vez que não há fornecimento adicional de álcalis nem temperaturas elevadas, o que acontece no método acelerado.

A não submissão das amostras à ambiente agressivo pode ser benéfica no sentido de aproximar-se mais às condições reais em que o concreto estará submetido. Entretanto, reações mais lentas podem não ser detectadas pelo método, em função do fato de que as condições de ensaio não são tão agressivas, gerando resultados falso-negativos.

A desvantagem principal deste método é o tempo de ensaio, demasiadamente longo. A primeira leitura que servirá para comparar com os limites estabelecidos é a leitura de 3 meses, enquanto outros tipos de análise requerem bem menos tempo para uma primeira noção do comportamento do agregado.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto nesta revisão bibliográfica, observam-se limitações nos método de ensaio para avaliar o potencial de reatividade dos agregados.

Há mais de 60 anos a reação é conhecida e estudada, e há um consenso sobre a premissa de que a prevenção é única maneira de evitar problemas com esta manifestação patológica. O meio técnico está cada dia mais conciente da necessidade de se analisar previamente os agregados para a tomada de medidas preventivas.

E, dentro deste panorama, a ASTM C 1260 é ainda o método de ensaio mais usado para tal fim, por causa, em boa parte, da sua relativa simplicidade e rapidez. Descobrir os eventuais pontos falhos deste método e, se possível, aperfeiçoá-lo, foi o objetivo principal desta

pesquisa. Com a finalidade de abranger o maior número possível de variáveis sobre o ensaio, o programa experimental exposto a seguir foi desenvolvido.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais empregados para o desenvolvimento desta tese, bem como os procedimentos de ensaio e análise utilizados.

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Tendo em vista que o objetivo principal deste trabalho era analisar a influência das condições de moldagem nos resultados da ASTM C 1260, este foi o principal método utilizado, com variação de três parâmetros: a forma do grão de agregado, e a consistência e a relação água/cimento das argamassas.

Adicionalmente, para confirmação e validação dos resultados, foram executados alguns ensaios auxiliares:

- a) Para uma avaliação mais completa da reação álcali-agregado, foram efetuados ensaios de análise petrográfica das rochas estudadas e análise através de microscopia eletrônica de varredura em algumas amostras de argamassa submetidas ao ensaio acelerado ASTM C 1260;
- b) Para análise da porosidade das argamassas confeccionadas para o ensaio acelerado foram feitos ensaios de absorção por imersão e porosimetria por intrusão de mercúrio;
- c) A forma do grão foi verificada através da análise por microscopia eletrônica e também indiretamente através da superfície específica, pelo ensaio de Blaine.

Na Figura 25 é apresentado um fluxograma com o resumo do programa experimental do trabalho.

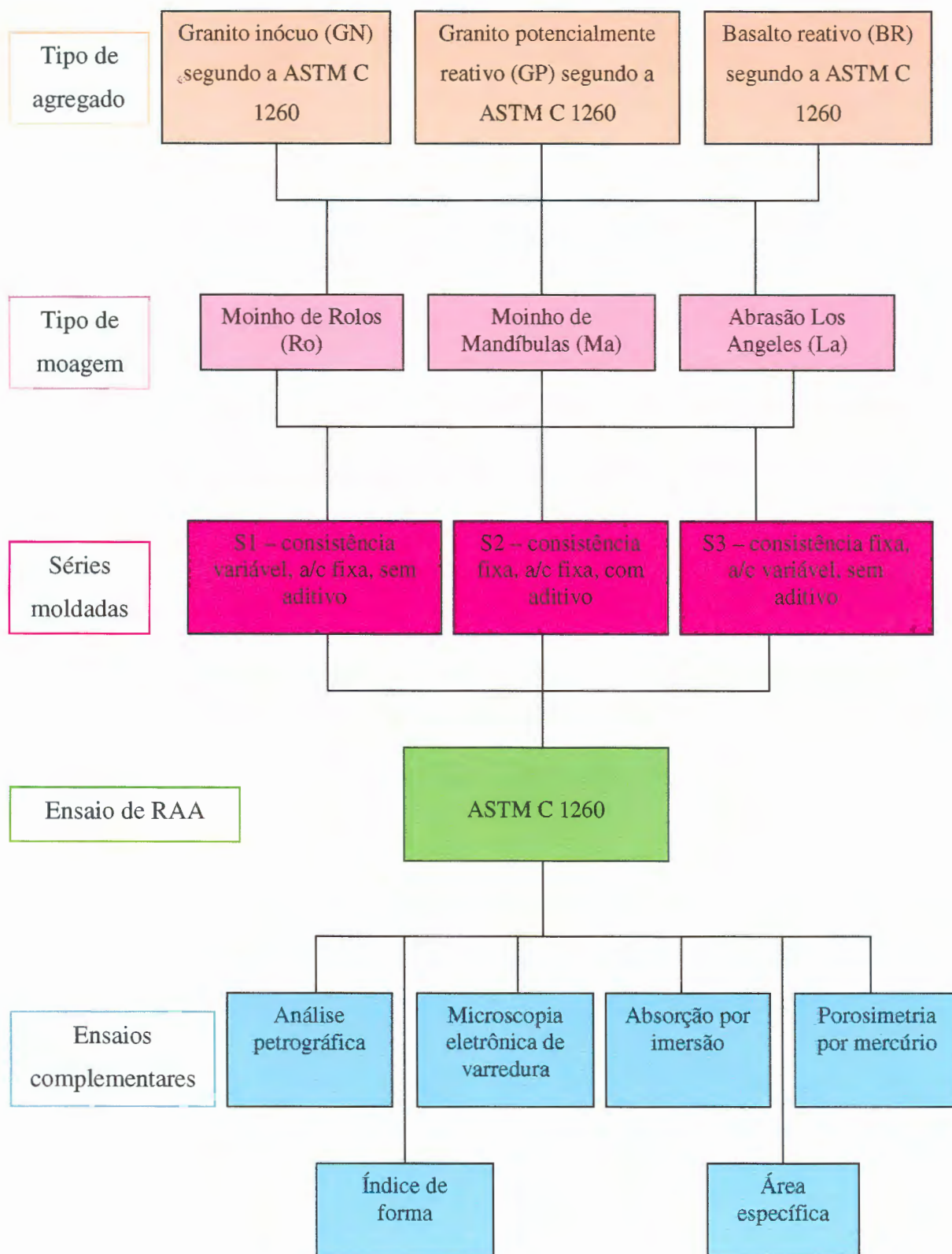


Figura 25: resumo do programa experimental.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento empregado nesta pesquisa foi do tipo CP V ARI, Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Em estudos objetivando a análise da reatividade potencial de rochas, é o mais comumente empregado, pois possui uma quantidade menor de adições que outros cimentos comerciais. Estas adições, se presentes, podem inibir o caráter reativo do agregado, invalidando a classificação da rocha como reativa ou inócua.

O cimento do tipo CP V ARI também foi escolhido em função de desenvolver reações de hidratação mais rápidas nas primeiras idades, o que é importante quando se utilizam métodos acelerados.

O equivalente alcalino do cimento utilizado foi de 0,59 %. A análise química do cimento empregado nesta pesquisa, realizada em maio de 2007, encontra-se apresentada na Tabela 1. As demais análises, realizadas em fábrica, encontram-se no Anexo A.

Tabela 1: análise química do cimento CP V ARI utilizado.

Determinação	%
CaO	60,16
SiO ₂	19,18
MgO	5,49
Al ₂ O ₃	4,12
SO ₃	3,00
Fe ₂ O ₃	2,58
K ₂ O	0,73
Na ₂ O	0,11

3.1.2 Agregados

Os agregados objetos deste estudo foram escolhidos de acordo com o critério da reatividade potencial, definida inicialmente pelo método acelerado ASTM C 1260.

Buscou-se trabalhar com dois grupos de agregados bastante encontrados em território nacional. Com isso, foram escolhidos granitos e basaltos como os dois grandes grupos de rochas a serem estudados, uma vez que comumente são comercializados e empregados como agregado para fabricação de concreto.

Ainda, de acordo com Valverde (2007), 70% da produção de agregados graúdos no país são granitos, 20% são basaltos, e 10% são calcários. Deste modo, o grupo de amostras composto por dois granitos e um basalto torna-se representativo da produção mineral de agregados do país.

Dentro destes dois grupos, basaltos e granitos, selecionaram-se agregados que se encaixassem nas três classificações propostas pela ASTM C 1260: inócuos, potencialmente reativos e reativos. Foi selecionada uma rocha dentro de cada classificação da ASTM C 1260. A seleção preliminar destes agregados foi feita com base nos dados de Tiecher (2005), que ensaiou os agregados utilizando a ASTM C 1260, e procedeu a britagem dos mesmos utilizando moinho de rolos.

Têm-se, então, duas variáveis para análise:

- a) Tipo de rocha;
- b) Grau de reatividade da rocha.

Na Tabela 2 consta um resumo desta seleção preliminar de agregados para o estudo. Foram coletados, de cada amostra, 4 tambores de 200 litros cada, totalizando aproximadamente 1 tonelada de cada rocha. As amostras estão apresentadas nas figuras a seguir.

Tabela 2: cadastro das amostras de agregado.

Denominação da amostra	Grupo litológico	Local de coleta	Classificação quanto à reatividade (ASTM C – 1260) *	
BR	Basalto	Região oeste de Santa Catarina	Reativa	Expansão maior que 0,2% aos 16 dias
GP	Granito	Região metropolitana de Curitiba - PR	Potencialmente reativa	Expansão entre 0,1% e 0,2% aos 16 dias
GN	Granito	Região norte de Santa Catarina	Inócua	Expansão menor que 0,1% aos 16 dias

* Obs.: classificação feita por Tiecher (2005).



Figura 26: amostra BR (basalto reativo).



Figura 27: amostra GP (granito potencialmente reativo).



Figura 28: amostra GN (granito não reativo).

3.1.3 Aditivo

O aditivo utilizado para ajuste das consistências das argamassas nesta pesquisa experimental foi um superplastificante, à base de sais sulfonatos de sódio, e proporciona aumento da fluidez de concretos e argamassas. O mesmo foi escolhido por possuir base química muito semelhante ao aditivo utilizado nos estudos de Valduga *et al.* (2005).

3.2 MÉTODOS

Os métodos empregados para desenvolvimento desta pesquisa estão descritos a seguir.

3.2.1 Ensaio Acelerado

O ensaio acelerado teve a ASTM C 1260 como base, e foi realizado no Laboratório de Materiais e Solos da Unoesc – Joaçaba/SC.

3.2.1.1 Preparo das amostras

As amostras de rocha, quando coletadas, apresentavam diâmetro máximo de partícula de 19 mm. Eram então homogeneizadas, quarteadas, e posteriormente moídas.

Para que se obtivessem três formas de grão diferentes, foi realizada a moagem de cada uma das rochas de três formas distintas:

- a) Moagem em moinho de rolos (Figura 29);
- b) Moagem em moinho de mandíbulas (Figura 30);
- c) Moagem em Abrasão Los Angeles (Figura 31).



Figura 29: moinho de rolos empregado na pesquisa (UFRGS).

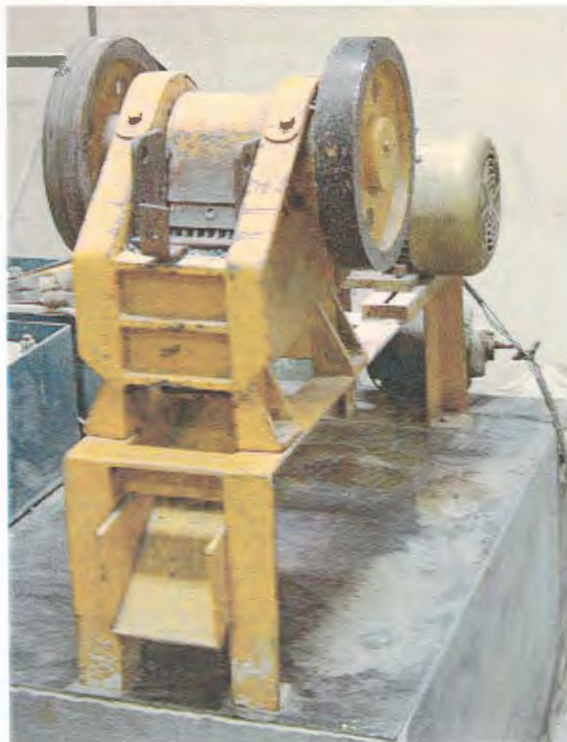


Figura 30: moinho de mandíbulas empregado na pesquisa (Lame/LACTEC).



Figura 31: Abrasão Los Angeles empregado na pesquisa (Lame/LACTEC).

Para a moagem em moinho de rolos, o procedimento consistia em passar a amostra duas vezes pelo moinho, até que as partículas ficassem menores que o solicitado pela ASTM C 1260, ou seja, menores que 4,8 mm.

No equipamento de mandíbulas a amostra foi passada duas vezes pelo moinho e, após peneiramento, as partículas maiores que 4,8 mm eram novamente moídas, mediante mais duas passadas pelo moinho. O material que resultasse ainda maior que 4,8 mm, era então descartado.

Já para o aparelho de Abrasão Los Angeles o procedimento foi o seguinte: a amostra era colocada dentro o equipamento juntamente com as esferas de aço e o aparelho era ligado por 30 minutos. Após este tempo, a amostra era peneirada e o material maior que 4,8 mm voltava novamente ao aparelho para uma segunda moagem. Terminada esta segunda moagem, que durava mais 30 minutos, a amostra era novamente peneirada e as partículas ainda maiores que 4,8 mm eram então descartadas.

Foi calculada, para cada tipo de moagem, o que se chamou de eficiência de moagem. Consiste em calcular quantos quilos de amostra integral é necessário que se moa para que se obtenha quantidade suficiente para o ensaio. Em todos os processos de moagem, a dificuldade maior

consiste em obter a fração de menor diâmetro, que é a de 0,15 mm. Obtida esta fração, as demais sempre são obtidas em quantidade abundante.

A eficiência de moagem definida nesta pesquisa, objetivando realizar ensaios de reação álcali-agregado, pode ser definida como:

$$E = \frac{\text{quantidade de fração } 0,15\text{mm obtida}}{\text{quantidade total de amostra peneirada}} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

A Tabela 3 apresenta os dados de eficiência de moagem para cada uma das rochas amostradas e também para cada tipo de moagem.

Tabela 3: eficiência de moagem para as três rochas e três tipos de moagem.

Amostra	Moagem	Eficiência de moagem média (%)
BR	RO (rolos)	4,2
	MA (mandíbulas)	2,0
	LA (Los Angeles)	1,1
GP	RO (rolos)	4,7
	MA (mandíbulas)	2,7
	LA (Los Angeles)	2,6
GN	RO (rolos)	6,8
	MA (mandíbulas)	6,0
	LA (Los Angeles)	3,8

Como se pode observar, o processo de moagem que tem a menor eficiência é o processo através de Abrasão Los Angeles, que rendeu de 1,1 % a 3,8 %, dependendo do tipo de rocha. Em consequência disto, uma quantidade maior de amostra teve que ser moída neste tipo de britador.

A Tabela 4 exibe as quantidades totais de amostra moída para cada rocha e cada processo de britagem.

Tabela 4: quantidades aproximadas de amostras moídas.

Amostra	Moagem	Amostra moída (kg)
BR	RO (rolos)	100
	MA (mandíbulas)	150
	LA (Los Angeles)	220
GP	RO (rolos)	80
	MA (mandíbulas)	120
	LA (Los Angeles)	120
GN	RO (rolos)	70
	MA (mandíbulas)	120
	LA (Los Angeles)	120
Total		1.100

Depois de britadas as amostras foram peneiradas, para separação das frações granulométricas indicadas pela norma. Para cada ensaio são moldadas 3 barras de argamassa, para as quais são necessárias as quantidades existentes na Tabela 5.

Tabela 5: quantidades de cada fração da granulometria requerida pela ASTM C 1260.

Peneiras		Massa (%)	Massa (g)
Passante	Retido		
4,8 mm	2,4 mm	10	99,00
2,4 mm	1,2 mm	25	247,50
1,2 mm	0,6 mm	25	247,50
0,6 mm	0,3 mm	25	247,50
0,3 mm	0,15 mm	15	148,50

Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado.

Após peneiradas as amostras foram então lavadas para retirada dos finos (partículas menores que 0,15 mm), e secas em estufa. Este procedimento também foi realizado de acordo com a ASTM C 1260.

3.2.1.2 Variáveis analisadas na moldagem das argamassas

Como o objetivo deste trabalho foi investigar a influência da variação da moldagem nos resultados do ensaio da ASTM C 1260, foram delineadas algumas variáveis para análise, a saber:

- a) Relação água/cimento;
- b) Consistência;
- c) Forma do grão.

Foram moldadas três séries para análise das variáveis: Série 1, Série 2 e Série 3 (S1, S2 e S3). Na Série 1 foram moldadas argamassas com consistência variável, ou seja, foi utilizada água suficiente para obter a relação água/cimento desejada, sem fazer uso de aditivo. Na Série 2 foi fixada a consistência das argamassas de acordo com a maior consistência obtida na Série 1, e então utilizado aditivo para manter esta consistência nas outras argamassas. E na Série 3 também foi mantida fixa a consistência, porém agora sem uso de aditivo, então houve variação nas relações a/c.

Tabela 6: resumo das séries moldadas.

Série	Consistência	Relação a/c	Aditivo
S1	Variável	Fixa	Não
S2	Fixa	Fixa	Sim
S3	Fixa	Variável	Não

As relações a/c analisadas foram, além da prevista na ASTM C 1260 (0,47), um valor acima (0,57) e um valor abaixo (0,37). A consistência fixada na Série 2 foi a obtida a partir da argamassa mais fluida da Série 1, que foi $340 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$. Às outras argamassas desta série, menos fluidas, foi acrescentado aditivo superplastificante para obter-se a mesma consistência supracitada. Já para a Série 3, a consistência foi fixada em $225 \pm 5 \text{ mm}$, que é o valor constante na NBRI (norma sul-africana), variando a relação a/c.

A Tabela 7 exibe um resumo dos dados de moldagens da Série 1, enquanto que a Tabela 8 se refere à Série 2 e a Tabela 9 à Série 3. Nestas tabelas e nas demais ao longo do trabalho, a sigla La refere-se à moagem em equipamento de Abrasão Los Angeles, Ma significa moagem em britador de Mandíbulas e Ro refere-se à britagem em moinho de Rolos.

Tabela 7: resumo dos dados das moldagens da Série 1.

Amostra	Moagem	Relação a/c	Consistência (mm)
S1 GN	La	0,57	344
		0,47	282
		0,37	185
	Ma	0,57	320
		0,47	261
		0,37	145
	Ro	0,57	298
		0,47	243
		0,37	153
S1 GP	La	0,57	337
		0,47	280
		0,37	188
	Ma	0,57	310
		0,47	250
		0,37	136
	Ro	0,57	280
		0,47	239
		0,37	144
S1 BR	La	0,57	327
		0,47	277
		0,37	176
	Ma	0,57	311
		0,47	249
		0,37	135
	Ro	0,57	298
		0,47	238
		0,37	125

Tabela 8: resumo dos dados das moldagens da Série 2.

Amostra	Moagem	Relação a/c	Consistência (mm)	Aditivo	
				(g)	(%)
S2 GN	La	0,57	340	-	-
		0,47	333	1,87	0,47
		0,37	330	5,58	1,40
	Ma	0,57	340	0,67	0,17
		0,47	331	2,67	0,67
		0,37	330	12,68	3,17
	Ro	0,57	330	0,90	0,23
		0,47	347	3,33	0,83
		0,37	332	12,63	3,16
S2 GP	La	0,57	330	0,13	0,03
		0,47	333	1,94	0,49
		0,37	330	6,0	1,50
	Ma	0,57	336	1,02	0,26
		0,47	332	2,90	0,73
		0,37	330	22,0	5,50
	Ro	0,57	348	1,88	0,47
		0,47	344	3,30	0,83
		0,37	334	20,0	5,00
S2 BR	La	0,57	344	0,56	0,14
		0,47	334	2,30	0,58
		0,37	340	12,94	3,24
	Ma	0,57	331	1,45	0,36
		0,47	332	4,47	1,12
		0,37	330	22,04	5,51
	Ro	0,57	334	1,15	0,29
		0,47	334	3,50	0,88
		0,37	335	20,0	5,00

Tabela 9: resumo dos dados das moldagens da Série 3.

Amostra	Moagem	Relação a/c	Consistência (mm)	Água (g)
S3 GN	La	0,40	226	178,00
	Ma	0,44	225	192,40
	Ro	0,45	227	198,01
S3 GP	La	0,40	224	175,00
	Ma	0,44	223	195,00
	Ro	0,45	228	200,00
S3 BR	La	0,41	226	180,00
	Ma	0,44	228	195,00
	Ro	0,45	229	200,00

Os procedimentos de mistura das argamassas seguiram as recomendações da ASTM C 1260, no que diz respeito à ordem de mistura dos materiais, ao tempo de mistura, à moldagem das barras de argamassa, aos procedimentos de cura inicial e desforma das barras.

3.2.1.3 Leitura das barras de argamassa

Para uniformizar as leituras de expansão, todas as amostras foram lidas no primeiro, segundo, terceiro e quarto dia. Depois desta data foram feitas leituras duas vezes por semana até os 28 dias, aos 7, 9, 14, 16, 21, 23 e 28 dias. Após os 28 dias foram feitas leituras uma vez por semana (35 dias, 42 dias, e assim respectivamente) até os 6 meses de idade (182 dias ou 24 semanas).

A ASTM C 1260 estabelece leituras até os 16 dias de idade, ou então, para os casos em que a expansão aos 16 dias se situar entre 0,1 % e 0,2 %, recomenda que as leituras sejam levadas até os 28 dias.

No presente trabalho todas as leituras das amostras foram levadas não apenas até os 28 dias, mas até os 6 meses, para que se delineasse mais completamente o comportamento das amostras e para que se pudesse observar uma idade de estabilização das expansões.

Na Figura 32 observa-se as amostras em ensaio no tanque, totalizando 189 barras de argamassa.

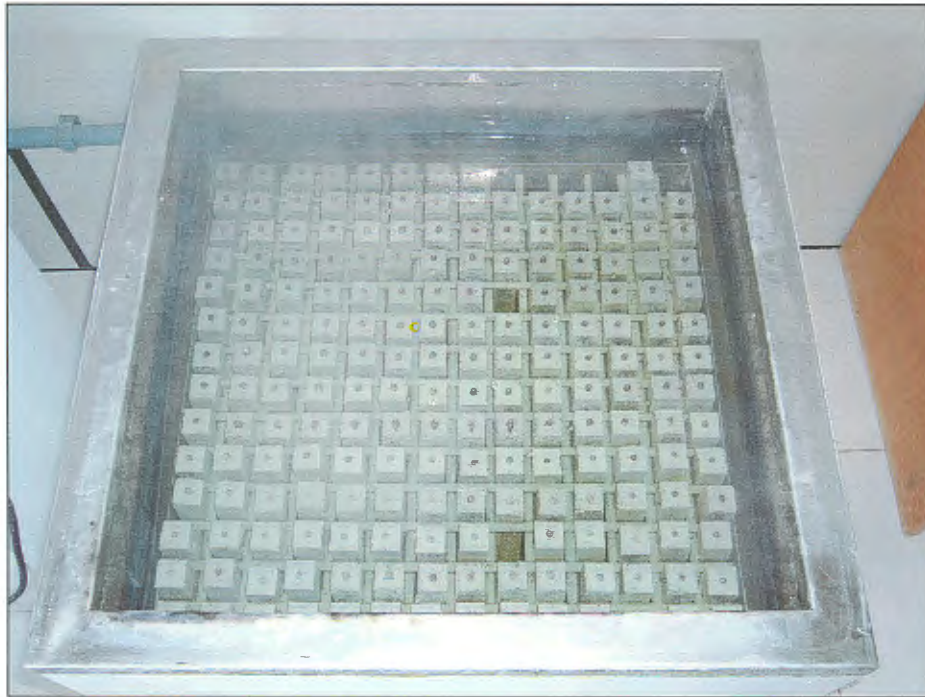


Figura 32: amostras imersas em solução de NaOH a 1N.

3.2.2 Análise Petrográfica

A análise petrográfica das três rochas utilizadas na pesquisa foi realizada no LAMIR – Laboratório de Análise de Minerais e Rochas, do Departamento de Geologia, da Universidade Federal do Paraná (Curitiba – PR). A análise foi executada pelo geólogo da instituição, com acompanhamento da doutoranda em todas as etapas. O equipamento usado foi um microscópio petrográfico de luz transmitida e refletida, marca Olympus, modelo PX 60.

3.2.2.1 Preparo das amostras

Para o ensaio de análise petrográfica em agregados graúdos, inicialmente são observadas algumas informações a respeito da rocha a ser analisada (uniformidade). Em seguida, procede-se o preparo de lâminas delgadas, com cerca de 30 μm de espessura, a fim de que o material esteja na espessura exata para observação em microscópio óptico de luz transmitida.

Lâminas delgadas sem impregnação foram preparadas para as amostras de agregado graúdo. O processo consistiu, inicialmente, na escolha de um fragmento representativo da rocha a ser estudada, de tamanho aproximado de 3 a 4 cm. Como a rocha foi coletada em dimensões comumente utilizadas na construção civil (19 e 25 mm), uma quantidade relativamente grande da rocha fragmentada teve que ser analisada, a fim de que fossem escolhidos fragmentos verdadeiramente representativos.

Após esta etapa, a rocha foi cortada de um dos lados de maneira a ficar plana e foi colada com uma resina em uma lâmina de vidro. Seguiu-se a laminação da rocha até que ela estivesse suficientemente fina para ser polida em politriz.

Durante todo este processo de polimento, o estágio em que se encontra a amostra é acompanhado através de microscópio de luz transmitida, para que seja possível o controle da espessura dos minerais.

3.2.2.2 Metodologia de análise

Todos os materiais foram analisados ao microscópio óptico de luz transmitida, através de técnicas petrográficas usuais, baseando-se na ASTM C 295.

O ensaio tem por objetivo o conhecimento dos minerais e o comportamento do agregado quanto à reatividade álcali-agregado. Procedeu-se a classificação petrográfica de cada amostra, procurando identificar minerais deletérios, observando-se a textura, estrutura, dimensão, orientação e possível alteração dos mesmos. As imagens registradas estão apresentadas no trabalho (seção 4.1).

3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura

A técnica de microscopia eletrônica foi usada para dois fins: avaliação da forma do grão após os diversos tipos de moagem e verificação da existência de produtos de reação nas barras de argamassa do ensaio da ASTM C – 1260.

Para a avaliação da forma do grão foi inicialmente selecionada a fração das rochas moídas passante na peneira de diâmetro 0,30 mm e retida na peneira de diâmetro 0,15 mm. Esta fração foi lavada e seca em estufa, para então ser preparada para a avaliação em microscópio eletrônico.

O preparo das amostras para este fim consistiu em colar nos portas-amostra uma fita dupla face e então, sob a fita, colar os grãos da amostras.

Deste modo a amostra seguiu para a metalização com ouro (Figura 33), para então ser realizada a análise da forma dos grãos com auxílio do microscópio eletrônico.



Figura 33: grãos colados nos porta-amstras, já metalizados.

Para a verificação da existência de produtos de reação nas barras de argamassa, as amostras foram fragmentadas com dimensões de, no máximo, 1 cm, de modo a serem descartadas as partes mais externas das barras (região de maior concentração de NaOH da solução de ensaio). Os fragmentos foram colados nos porta-amstras e então receberam metalização com carbono, uma vez que nestas amostras foi realizado ensaio de EDS, para verificação dos elementos químicos dos materiais analisados.

Os ensaios para avaliação da forma do grão foram realizados no CME – Centro de Microscopia Eletrônica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O equipamento do CME utilizado era da marca JEOL, modelo JSM - 6060.

Já os ensaios para verificação da existência de produtos de reação nas barras de argamassa foram realizados no LACTEC, em Curitiba – PR. O equipamento utilizado foi um microscópio da marca Philips, modelo XL 30, com detetor de elétrons secundários e sonda analítica por espectroscopia de energia dispersiva de raios X, marca EDAX.

3.2.4 Absorção por imersão

O ensaio de absorção por imersão seguiu a NBR 9778/2006 - Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão.

Os ensaios foram realizados para apenas um tipo de rocha, com o intuito de avaliar a existência de correlação entre o comportamento das expansões do ensaio da ASTM C – 1260

e as variações na porosidade indicadas pela absorção por imersão. Buscou-se saber qual era, efetivamente, a diferença na porosidade das argamassas das diferentes séries moldadas.

A rocha escolhida para o comparativo foi o granito denominado de GN, por ser a rocha da qual se dispunha maior quantidade de material para os ensaios.

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões 5 x 10 cm, com argamassas idênticas às utilizadas no ensaio acelerado (ASTM C 1260). Manteve-se o mesmo traço empregado para cada uma das séries, com mesma relação a/c e porcentagem de aditivo.

A NBR 9778/2006 recomenda que sejam utilizados pelo menos dois corpos-de-prova para cada amostra, e que o resultado final seja a média das duas determinações. Foram utilizados para este trabalho 3 corpos-de-prova para cada amostra, para posterior tratamento estatístico.

Após 28 dias de cura, imersos em água, os corpos-de-prova foram então determinadas a massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada, índice de vazios e absorção.

Posteriormente, ao fim dos ensaios de absorção por imersão, os corpos-de-prova foram rompidos à compressão, para comparativo das características dos mesmos e confirmação dos resultados. Apesar destes resultados não poderem expressar a resistência real das argamassas moldadas, pois as amostras são submetidas à fervura e à secagem em estufa no ensaio de absorção, ainda assim servem como comparativo entre as amostras, pois todos os corpos-de-prova foram submetidos às mesmas condições.

O rompimento foi realizado nos corpos-de-prova com idade de 91 dias, aproximadamente 2 meses após o término do ensaio de absorção. No período após o ensaio de absorção, os corpos-de-prova foram mantidos em cura ao ar, em temperatura ambiente.

3.2.5 Porosimetria por mercúrio

Para uma medida complementar da porosidade, além do ensaio de absorção por imersão, foram escolhidas algumas amostras para a determinação da porosidade por intrusão de mercúrio.

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio permite não só a determinação do volume total de poros, como também a distribuição de tamanho dos mesmos. Como o mercúrio não

molha a maioria dos materiais, pois apresenta alta tensão superficial, quando colocado em contato com uma amostra é necessário que se introduza uma pressão que supere esta tensão superficial. Durante a porosimetria por mercúrio é medida a pressão efetivada sobre o mercúrio, que por sua vez pressiona a amostra, e o volume de mercúrio que penetra a amostra nesta pressão. Quanto menor o poro, maior será a pressão necessária para que o mercúrio entre no poro (GOUVEA, 2007).

Por ocasião da moldagem das barras de argamassa para o ensaio acelerado (ASTM C 1260), foram confeccionadas, para cada amostra, uma barra a mais. Ou seja, no total foram moldadas 4 barras para cada amostra, 3 foram submetidas ao ensaio acelerado e uma barra adicional foi estocada para realização do ensaio de porosimetria de mercúrio.

Esta barra adicional foi moldada juntamente com as barras do ensaio acelerado para reproduzir fielmente a porosidade encontrada nas amostras submetidas à expansão. Foram confeccionadas com o mesmo tamanho e geometria das barras do ensaio acelerado, com a mesma argamassa e também com o mesmo modo de adensamento.

Depois de desformadas, após 24 horas, as barras foram imersas em acetona, para interrupção das reações de hidratação, por mais 24 horas, e então estocadas em dessecador, sendo mantidas no vácuo até a data de ensaio. As amostras foram ensaiadas com 91 dias de idade.

O ensaio foi realizado na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). O equipamento utilizado foi um porosímetro da marca Micromeretics, modelo Auto Pore II 9215.

3.2.6 Índice de forma

O ensaio de índice de forma seguiu a NBR 7809/06.

Para cada amostra foram selecionados 200 grãos, passantes na peneira 9,5 mm e retidos na peneira 4,8 mm. Os grãos foram medidos (espessura e comprimento) e então se procedeu ao cálculo do índice de forma de cada amostra, para cada moagem.

3.2.7 Área específica

O ensaio de Blaine foi utilizado para verificação da área específica das amostras moídas por diferentes processos.

Cada uma das 3 rochas foi moída de 3 formas diferentes: em britador de rolos, em britador de mandíbulas e em equipamento de Abrasão Los Angeles. No total, 9 amostras foram ensaiadas:

- a) GN La – amostra GN moída no Abrasão Los Angeles;
- b) GN Ma – amostra GN moída no britador de mandíbulas;
- c) GN Ro – amostra GN moída no britador de rolos;
- d) GP La – amostra GP moída no Abrasão Los Angeles;
- e) GP Ma – amostra GP moída no britador de mandíbulas;
- f) GP Ro – amostra GP moída no britador de rolos;
- g) BR La – amostra BR moída no Abrasão Los Angeles;
- h) BR Ma – amostra BR moída no britador de mandíbulas;
- i) BR Ro – amostra BR moída no britador de rolos.

De cada amostra moída, selecionou-se a fração correspondente à passante na peneira de abertura 0,15 mm e retida na peneira de abertura 0,075 mm. As amostras foram então lavadas e secas em estufa a 105° C, para posterior realização do ensaio.

A norma empregada para realização do ensaio foi a NBR NM 76/1998 – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine).

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados nesta pesquisa.

4.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA

As características petrográficas das rochas estudadas estão descritas nesta seção, bem como estão apresentadas as imagens registradas durante a análise petrográfica.

4.1.1 Rocha GN

Esta rocha foi inicialmente classificada como granito, por ser esta a nomenclatura usual para comercialização da mesma. Entretanto, após a análise petrográfica, a rocha foi classificada como uma rocha metamórfica, proveniente do metamorfismo dinâmico (regime rúptil/dúctil) em rocha de composição granulítica. Uma provável nomenclatura da rocha poderia ser granulito cataclasado ou então protomilonito. Para uma classificação mais exata, seriam necessários fragmentos maiores e também uma análise global da pedreira em questão.

A rocha tem cor cinza, com matriz de granulação média (0,5 a 1 mm) constituída por feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, biotita, anfibólio, clinopiroxênio e minerais opacos. Tem porfiroclastos (fragmentos de minerais com granulação maior que a matriz) de feldspato potássico e quartzo. Apresenta foliação milonítica definida pela orientação subparalela de minerais micáceos (biotita), quartzo estirado com extinção ondulante e presença de minerais fraturados.

A porcentagem estimada dos minerais presentes na rocha está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10: mineralogia da amostra GN.

Mineral	Quantidade estimada (%)
Quartzo	30
Anfibólio	25
Clinopiroxênio	15
Biotita	5
Feldspato potássico (Microclínio)	15
Plagioclásio	5
Opacos	5

O quartzo (30%) de granulação fina a média está anédrico, fraturado e com forte extinção ondulante. Apresenta orientação incipiente. Ocorre associado ao feldspato potássico e plagioclásio. Como porfiroclasto (< 5%) tem granulação grossa, está fraturado e com extinção ondulante.

O feldspato potássico (15%) apresenta granulação fina a média, está anédrico e fracamente sericitizado. Ocorre associado ao quartzo e plagioclásio. Como porfiroclasto (10%) tem granulação grossa, está fraturado e parcialmente sericitizado.

O plagioclásio (5%) de granulação média está subédrico e ocorre associado ao quartzo e feldspato potássico.

O anfibólio (25%) de granulação média está anédrico a subédrico, pouco fraturado e com alguns cristais parcialmente alterados para clorita. Ocorre associado ao clinopiroxênio, biotita e minerais opacos.

O clinopiroxênio (15%) de granulação média está anédrico a subédrico, fraturado e com bordas uralitizadas.

Os minerais opacos (5%) de granulação fina a média estão anédricos a subédricos e ocorrem associados ao anfibólio e clinopiroxênio.

A biotita (5%) de granulação fina está subédrica e orientada subparalelamente, definindo a foliação milonítica.

A textura é milonítica (fragmentada/ deformada), com estado microfissural moderado e grau de alteração fraco.

A estrutura apresenta foliação milonítica definida pela orientação subparalela de minerais micáceos (biotita), quartzo estirado com extinção ondulante e presença de minerais fraturados.

As fotomicrografias onde podem ser visualizados os minerais estão nas figuras a seguir (Figura 34 e Figura 35).

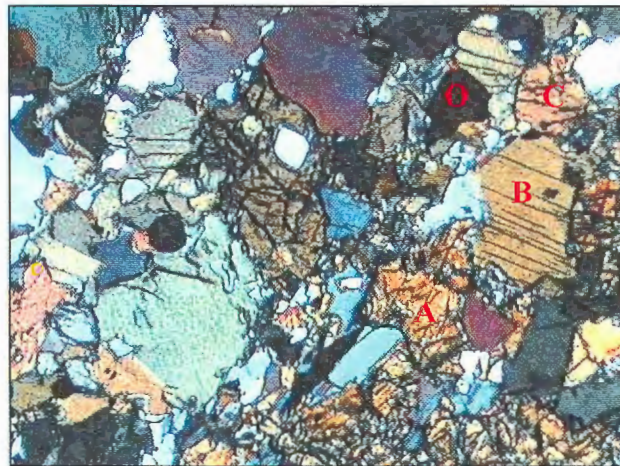


Figura 34: porção da matriz onde predomina anfibólio (A), clinopiroxênio (C), biotita (B) e minerais opacos (O). Aumento de 40x / luz polarizada.

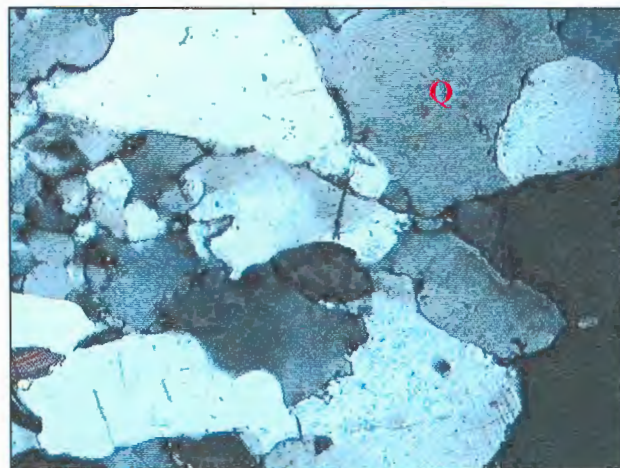


Figura 35: cristais de quartzo anédricos (Q) com orientação incipiente e forte extinção ondulante. Aumento de 40x / luz polarizada.

4.1.2 Rocha GP

Esta amostra constitui-se de uma rocha ígnea, e foi classificada como álcali feldspato granito. A rocha possui cor cinza claro com matriz de granulação grossa (1 a 1,5 mm) constituída por feldspato potássico, quartzo, anfibólio, biotita, plagioclásio e minerais opacos. Apresenta fenocristais (minerais de maior tamanho em relação a matriz) de feldspato potássico. Tem estrutura maciça e textura fanerítica inequigranular porfirítica.

A porcentagem estimada dos minerais presentes na rocha está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: mineralogia da amostra GP.

Mineral	Quantidade estimada (%)
Feldspato potássico	60
Quartzo	20
Anfibólio	10
Biotita	05
Opacos	5
Carbonato	-
Plagioclásio	-

O feldspato potássico (60%) tem granulação média a grossa, está subédrico a anédrico e pouco fraturado. Apresenta intercrescimento pertítico. O contato entre os cristais é planar a irregular. Como fenocristal (< 5%) está euédrico a subédrico e com intercrescimento pertítico.

O quartzo (20%) tem granulação média a grossa, está anédrico, pouco fraturado e com extinção ondulante. Ocorre associado ao feldspato potássico.

O anfibólio (10%) tem granulação média, está anédrico a subédrico, fraturado e com alguns cristais parcialmente cloritizados/ argilizados.

A biotita (5%) e os minerais opacos (5%) têm granulação fina a média, estão anédricos a subédricos e ocorrem associados ao anfibólio.

O carbonato tem granulação média, está subédrico e ocorre nos interstícios dos cristais de feldspato potássico.

O plagioclásio ocorre como microlamelas nos cristais de feldspato potássico, caracterizando o intercrescimento peritítico.

A textura é fanerítica inequigranular porfírica, com grau de alteração fraco e estado microfissural também fraco. A estrutura da rocha é maciça.

As fotomicrografias onde podem ser visualizados os minerais da amostra estão nas figuras a seguir (Figura 36 e Figura 37).

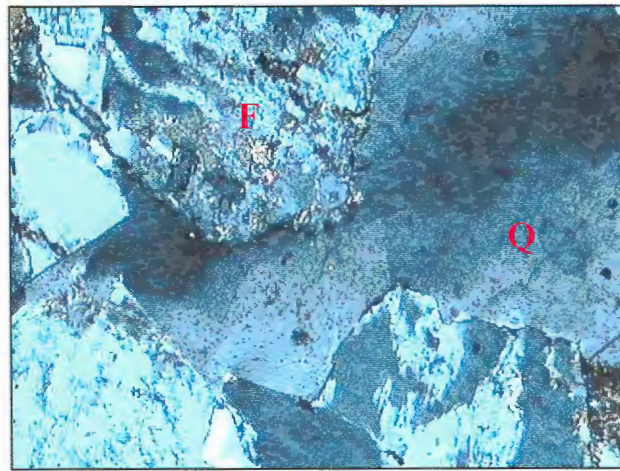


Figura 36: feldspato potássico com intercrescimento peritítico(F) e quartzo com extinção ondulante (Q). Aumento de 40x / luz polarizada.

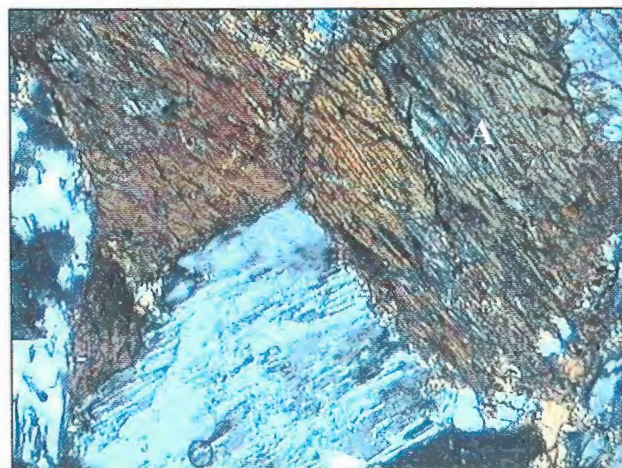


Figura 37: cristal de anfibólio (A) fraturado e parcialmente alterado para clorita. Aumento de 40x / luz polarizada.

4.1.3 Rocha BR

Esta amostra constitui-se de uma rocha vulcânica de composição básica, classificada como um basalto vesicular. É uma rocha de cor cinza escura com matriz de granulação muito fina a fina (inferior a 0,2 mm) constituída essencialmente por plagioclásio, clinopiroxênio, minerais opacos e vidro vulcânico. Apresenta microfenocristais (minerais de maior tamanho em relação à matriz) de plagioclásio.

Sua textura é fanerítica inequigranular porfirítica com matriz intergranular.

A estrutura amigdaloidal possui cavidades preenchidas por zeólitas e celadonita. Localmente, apresenta estrutura de fluxo definida pela orientação subparalela de plagioclásios.

A porcentagem estimada dos minerais presentes na rocha está apresentada na Tabela 12.

Tabela 12: mineralogia da amostra BR.

Mineral	Quantidade estimada (%)
Plagioclásio (Andesina / Labradorita)	40
Clinopiroxênio (Augita)	35
Opacos	20
Vidro vulcânico	5

O plagioclásio na matriz (40%) tem granulação fina a muito fina, está subédrico a euédrico, ripiforme e pouco fraturado. Alguns cristais estão orientados subparalelamente definindo uma estrutura de fluxo incipiente. Como microfenocristal (5%) está euédrico a subédrico, ripiforme e pouco fraturado.

O clinopiroxênio na matriz (35%) tem granulação muito fina a fina, está anédrico e com aspecto granular. Ocorre nos interstícios dos cristais de plagioclásio definindo a textura intergranular.

Os minerais opacos na matriz (20%) têm granulação fina e estão subédricos.

O vidro vulcânico (5%) ocorre nos interstícios dos cristais de plagioclásio, clinopiroxênio e minerais opacos.

A textura é intergranular (cristais ripiformes de plagioclásio com clinopiroxênio intersticial). Localmente, traquítica (definida pela orientação subparalela de plagioclásios). O estado microfissural é fraco.

A estrutura é amigdaloidal, caracterizada por cavidades arredondadas preenchidas por zeólitas e celadonita. Localmente, apresenta estrutura de fluxo definida pela orientação subparalela de plagioclásios.

As fotomicrografias onde podem ser visualizados os minerais da amostra estão nas figuras a seguir (Figura 38 e Figura 39).

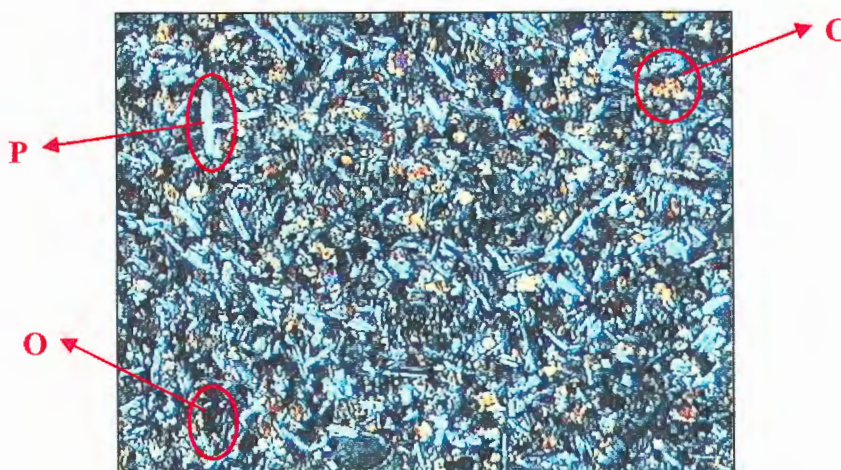


Figura 38: matriz de granulação fina a muito fina constituída por plagioclásio (P), clinopiroxênio (C) e minerais opacos (O). Aumento de 40x / luz polarizada.

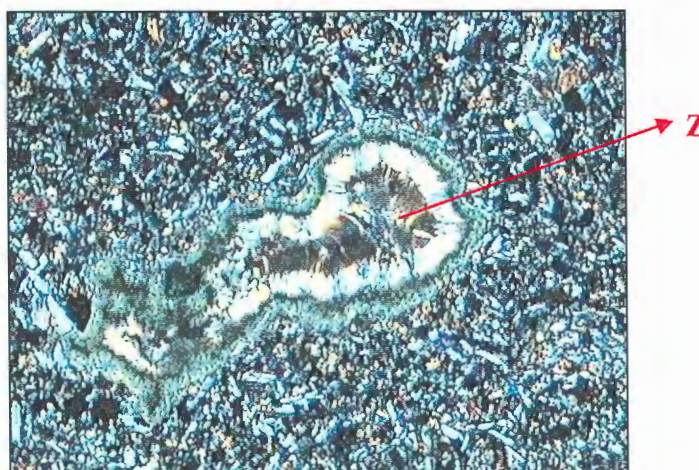


Figura 39: detalhe de cavidade preenchida por zeólita (Z) com celadonita nas bordas (cor verde). Aumento de 40x / luz polarizada.

4.2 FORMA DO GRÃO

A forma dos grãos foi analisada de duas maneiras: através da análise de imagens de microscopia eletrônica de varredura, qualitativamente, e através do índice de forma, quantitativamente.

4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura

Das três amostras de rocha analisadas nesta tese, foram selecionadas duas para a confecção de imagens: a amostra GN e a amostra BR. Destas duas amostras, foram selecionados os dois tipos de moagens que dão origem a formas de grão mais distintas: moagem em Abrasão Los Angeles e moagem em moinho de rolos. Portanto, as amostras ensaiadas nesta seção foram: GN La, GN Ro, BR La e BR Ro.

As imagens foram realizadas em três magnitudes distintas: 30 x, 60 x e 120 x de aumento.

Na figuras a seguir (Figura 40 à Figura 45) estão as imagens das amostras GN La e GN Ro, em diferentes aumentos, e da Figura 46 à Figura 51 estão as imagens das amostras BR La e BR Ro.

Pode se observar, nas três imagens da amostra GN La, que os grãos são mais arredondados, enquanto que na amostra GN Ro nota-se mais arestas e pontas angulosas. Também pode se observar na amostra GN Ro maior quantidade de partículas lamelares, achatadas, enquanto que na amostra GN La as partículas são mais regulares em tamanho.

O mesmo se aplica à amostra BR. A amostra de basalto moída em Los Angeles tem partículas mais arredondadas e a moída em moinho de rolos é mais angulosa. Observa-se também, nesta amostra, diferença na superfície dos grãos. Na Figura 51, nota-se a superfície “escavada” e irregular da amostra BR Ro. Ou seja, há indícios de que também ocorram mudanças de textura entre diferentes tipos de moagem.

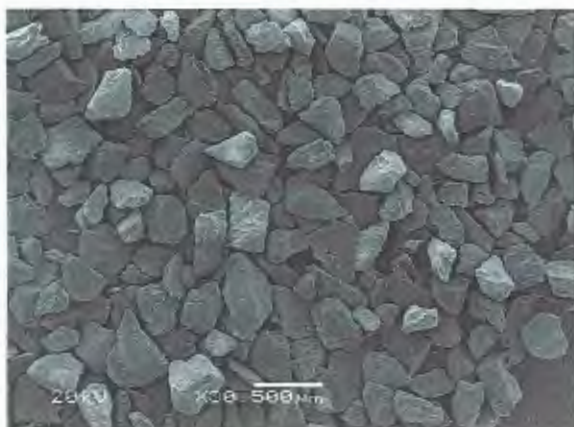


Figura 40: amostra GN La, aumento de 30x.



Figura 41: amostra GN Ro, aumento de 30x.

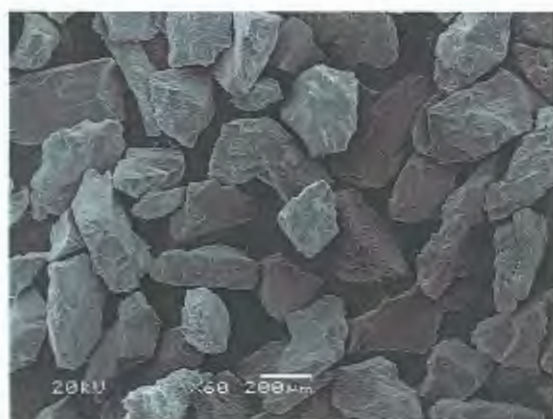


Figura 42: amostra GN La, aumento de 60x.

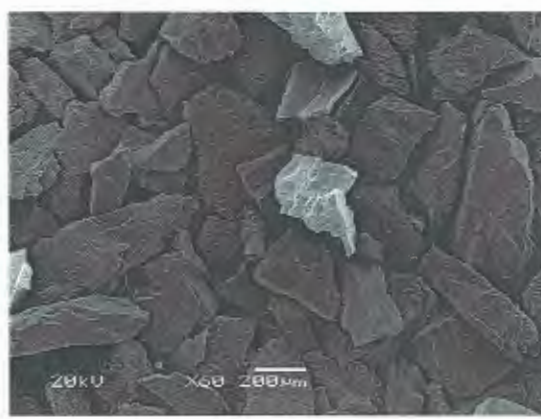


Figura 43: amostra GN Ro, aumento de 60x.



Figura 44: amostra GN La, aumento de 120x.



Figura 45: amostra GN Ro, aumento de 120x.



Figura 46: amostra BR La, aumento de 30x.

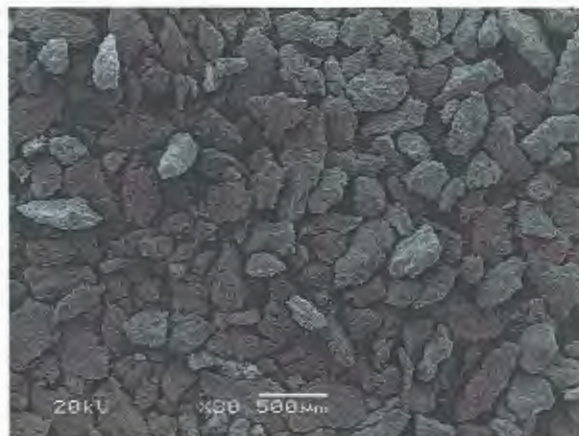


Figura 47: amostra BR Ro, aumento de 30x.

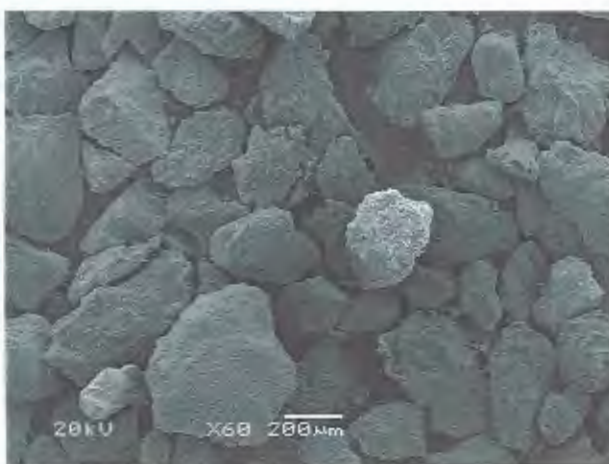


Figura 48: amostra BR La, aumento de 60x.

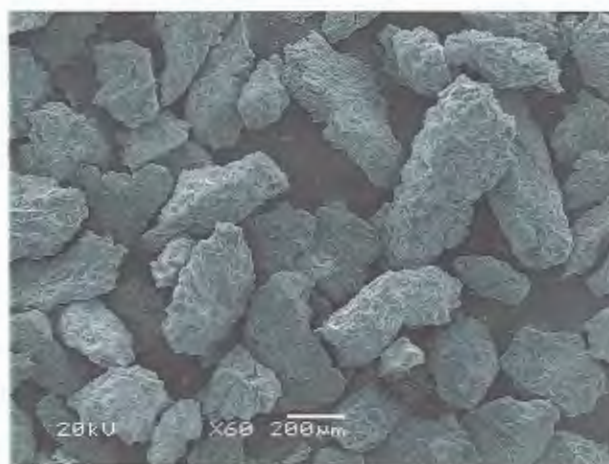


Figura 49: amostra BR Ro, aumento de 60x.

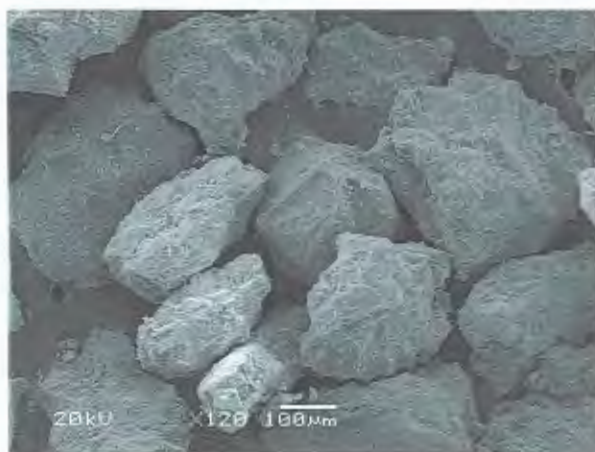


Figura 50: amostra BR La, aumento de 120x.

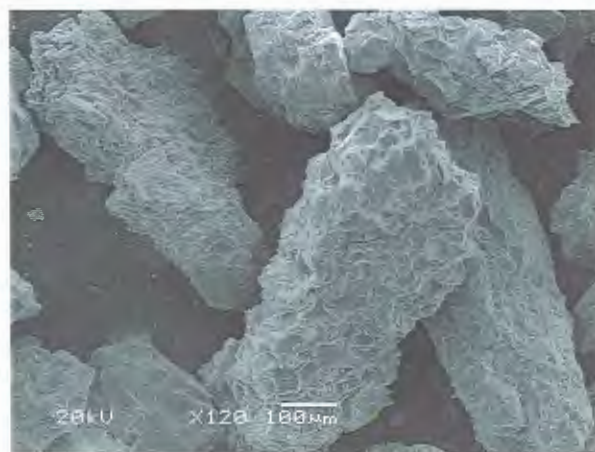


Figura 51: amostra BR Ro, aumento de 120x.

4.2.2 Índice de forma

Os resultados encontrados para o índice de forma das amostras encontram-se na Tabela 13. Na Figura 52, os dados são dispostos em um gráfico, para melhor visualização da diferença de forma encontrada nas amostras.

Tabela 13: resultados do ensaio de índice de forma.

Amostra	Índice de forma
GN La	1,7
GN Ma	1,9
GN Ro	5,9
GP La	1,9
GP Ma	2,0
GP Ro	5,7
BR La	1,7
BR Ma	1,9
BR Ro	3,7

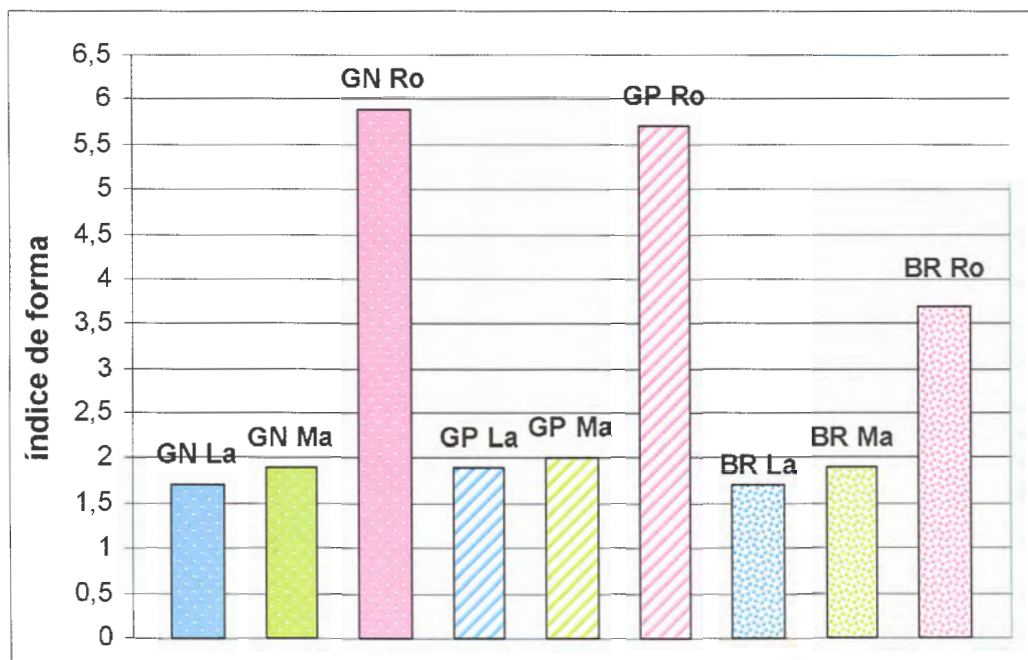


Figura 52: resultados do ensaio de índice de forma.

Para as três rochas analisadas o índice de forma das amostras britadas no moinho de Rolos é notadamente maior que os demais. Entre as amostras moídas no Los Angeles e no britador de Mandíbulas não há uma diferença muito grande entre os valores de índice de forma, embora as primeiras tenham forma mais regular que as segundas (índice de forma menor, mais próximo de 1).

Na seqüência, têm-se algumas imagens das amostras que foram utilizadas para medição do ensaio de índice de forma, destacando as amostras moídas em moinho de Rolos e em Los Angeles. Os resultados dos ensaios expressam numericamente o que visualmente pode ser observado nas figuras a seguir.



Figura 53: amostra GN La.

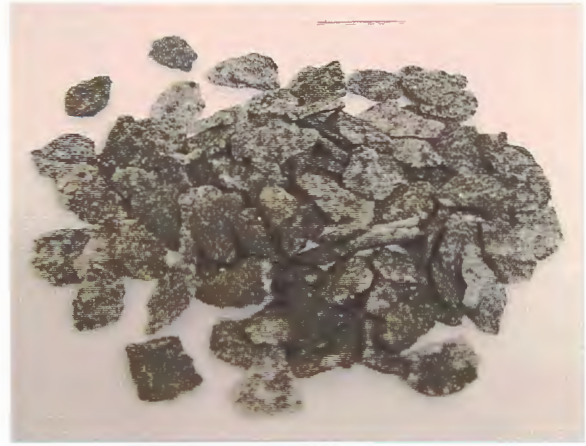


Figura 54: amostra GN Ro.



Figura 55: amostra GP La.

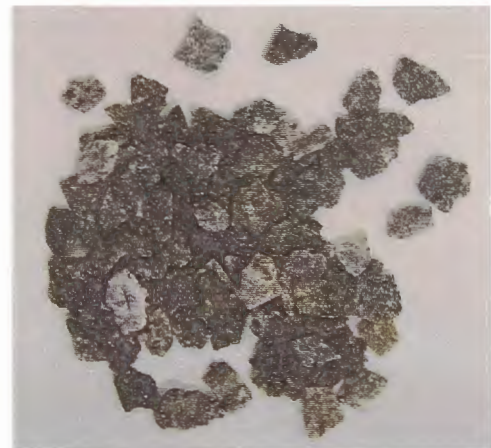


Figura 56: amostra GP Ro.



Figura 57: amostra BR La.



Figura 58: amostra BR Ro.

4.3 ÁREA ESPECÍFICA

Os resultados obtidos no ensaio da área específica (Blaine) para os três tipos de rocha e três tipos de moagem encontram-se na Tabela 14. Na Figura 59 está um comparativo gráfico da influência dos tipos de moagem na área específica das rochas.

Tabela 14: resultados de área específica e massa específica dos três tipos de rocha submetidos a moagens diferentes.

Amostra	Massa específica (ton/m ³)	Área específica (cm ² /g)
GN LA	2,86	2770
GN MA	2,87	1740
GN RO	2,84	1450
GP LA	2,69	2920
GP MA	2,69	1910
GP RO	2,73	1760
BR LA	2,97	2630
BR MA	2,94	1970
BR RO	2,97	1870

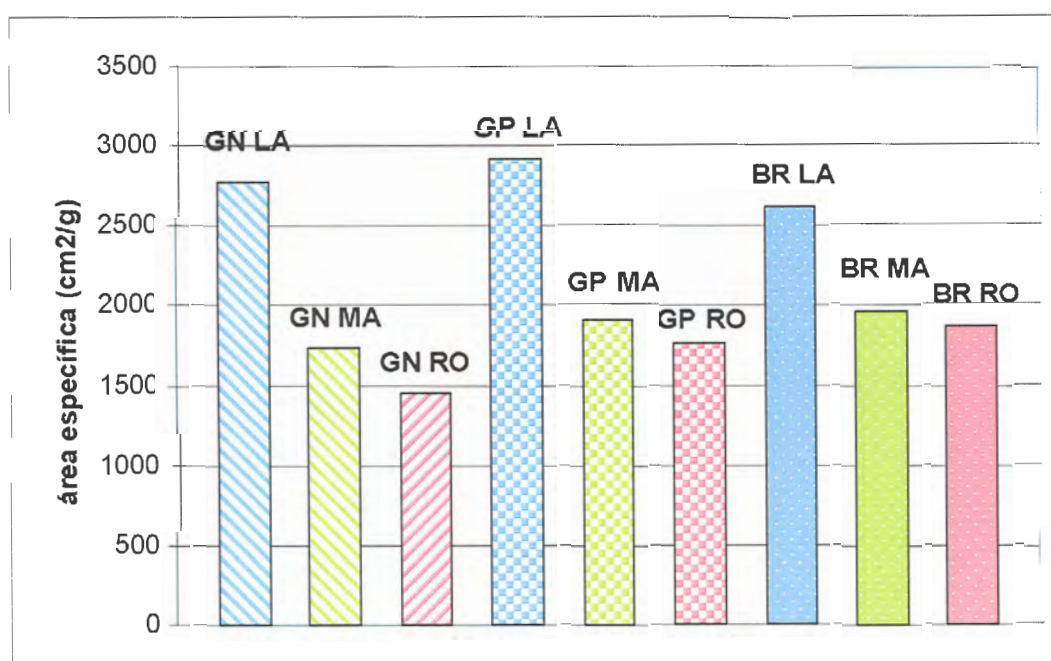


Figura 59: influência do tipo de moagem na área específica das rochas.

Observa-se, analisando a Tabela 14, que o processo de moagem não altera significativamente a massa específica da rocha, como esperado, sendo que os valores encontrados para cada tipo de rocha são bem próximos para os três tipos de moagem. A Tabela 15 apresenta os cálculos estatísticos sobre os valores de massa específica, onde se observa os baixos coeficientes de variação (0,01%).

Tabela 15: análise dos valores obtidos para a massa específica das rochas.

Rocha	Moagem	Massa específica (ton/m³)
GN	La	2,86
	Ma	2,87
	Ro	2,84
	média	2,86
	desvio padrão	0,02
	coef. variação (%)	0,01
GP	La	2,69
	Ma	2,69
	Ro	2,73
	média	2,70
	desvio padrão	0,02
	coef. variação (%)	0,01
BR	La	2,97
	Ma	2,94
	Ro	2,97
	média	2,96
	desvio padrão	0,02
	coef. variação (%)	0,01

Já na análise da Figura 59 pode-se concluir que a moagem que resulta em maior área específica, para todas as rochas, é a moagem no Abrasão Los Angeles, seguida pelo moinho de Mandíbulas e então pelo moinho de Rolos.

Para a rocha GN, por exemplo, a diferença de área específica é tão acentuada, que a moagem no moinho de Rolos faz com que a rocha tenha aproximadamente metade da área específica que tem quando moída no Abrasão Los Angeles.

Isto reflete diretamente a forma do grão, mais arredondada para a moagem no Los Angeles e mais angulosa para a moagem no moinho de Rolos.

O fato da amostra moída no Abrasão Los Angeles apresentar maior superfície específica indica que estes grãos terão maior interface para a reação álcali-agregado.

4.4 ENSAIO ACELERADO

Como descrito na metodologia, foram moldadas três séries para análise de variáveis nos ensaios de expansão: Série 1, Série 2 e Série 3 (S1, S2 e S3). Na Série 1 foram moldadas argamassas com consistência variável, na Série 2 foi fixada a consistência das argamassas de acordo com o maior valor obtido na Série 1, e então utilizado aditivo para manter esta consistência nas outras argamassas, e na Série 3 também foi mantida fixa a consistência, porém agora sem uso de aditivo, sendo permitida variação nas relações a/c.

Todas as barras foram moldadas seguindo o mesmo método, descrito na metodologia, e ensaiadas exatamente da mesma maneira, com leituras nas mesmas idades e submetidas às mesmas condições de estocagem e leitura. Isto para evitar a interferência de outros fatores nos resultados de expansão que não aqueles que se desejava analisar.

Em todas as amostras foi observado quadro de fissuração, visível a olho nu.

Cabe salientar aqui que as condições de classificação da ASTM C 1260 (limites de expansão de 0,1% e 0,2%) são válidas somente para as condições de moldagem previstas na norma, ou seja, relação a/c 0,47, e idade de referência de 16 dias. Entretanto, para fins comparativos, neste trabalho foram consideradas, adicionalmente, as demais condições de moldagem e idades estudadas.

A seguir são apresentados os resultados do ensaio acelerado para cada uma das séries.

4.4.1 Série 1

Na série 1 têm-se três rochas, cada uma britada de três formas diferentes, e para cada moagem foram utilizadas três relações a/c diferentes. Deste modo, têm-se 27 ensaios de expansão para a S1.

Nas tabelas a seguir (Tabela 16 à Tabela 24) estão apresentados, para cada ensaio, os resultados individuais das três barras utilizadas no ensaio, e em seguida a média destes três resultados. Juntamente com a identificação da amostras está indicada a consistência obtida para aquela argamassa.

Os valores individuais de cada barra (cp 1, cp 2 e cp 3) indicados nas tabelas a seguir foram analisados estatisticamente, a fim de determinar se a média calculada é representativa. Para

todas as amostras não houve diferença significativa entre as três barras, indicando que a média representa verdadeiramente o grupo. Também foi feita a verificação de existência de resultados espúrios, e nenhum valor individual está afastado da média mais do que o dobro do desvio.

As médias foram utilizadas para a representação gráfica das expansões, que serão apresentadas na seqüência. Para a análise estatística entre as amostras foram utilizadas as três repetições de que se dispunha, ou seja, os resultados das barras cp 1, cp 2 e cp 3.

Tabela 16: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GN, moagem Ma.

Idade de ensaio	Série 1											
	GN Ma 057 - 320 mm				GN Ma 047 - 261 mm				GN Ma 037 - 145 mm			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,038	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,010	0,000	0,000	0,003	0,007	0,000	0,000	0,002	0,023	0,021	0,021	0,022
7	0,013	0,016	0,038	0,022	0,051	0,040	0,039	0,043	0,051	0,053	0,051	0,052
9	0,051	0,036	0,067	0,051	0,068	0,060	0,066	0,065	0,076	0,078	0,076	0,077
14	0,119	0,118	0,090	0,109	0,085	0,080	0,102	0,089	0,136	0,117	0,119	0,124
16	0,105	0,107	0,111	0,108	0,135	0,099	0,120	0,118	0,128	0,129	0,132	0,130
21	0,138	0,136	0,131	0,135	0,163	0,110	0,185	0,153	0,157	0,202	0,170	0,176
23	0,157	0,184	0,141	0,161	0,177	0,117	0,185	0,160	0,183	0,174	0,186	0,181
28	0,180	0,196	0,162	0,179	0,250	0,109	0,241	0,200	0,206	0,204	0,221	0,210
35	0,211	0,127	0,210	0,183	0,245	0,186	0,305	0,245	0,253	0,246	0,271	0,257
42	0,260	0,238	0,274	0,257	0,318	0,261	0,351	0,310	0,277	0,272	0,313	0,288
49	0,296	0,294	0,277	0,289	0,383	0,327	0,372	0,361	0,316	0,365	0,344	0,342
56	0,273	0,249	0,322	0,281	0,438	0,410	0,410	0,419	0,330	0,342	0,361	0,345
63	0,287	0,249	0,339	0,292	0,430	0,415	0,448	0,431	0,338	0,333	0,375	0,348
70	0,353	0,300	0,342	0,332	0,439	0,400	0,439	0,426	0,342	0,344	0,385	0,357
77	0,326	0,309	0,347	0,327	0,457	0,399	0,450	0,435	0,393	0,378	0,432	0,401
84	0,360	0,332	0,354	0,349	0,461	0,406	0,454	0,440	0,456	0,409	0,458	0,441
91	0,404	0,370	0,409	0,395	0,481	0,400	0,453	0,445	0,437	0,376	0,486	0,433
98	0,417	0,418	0,449	0,428	0,498	0,485	0,512	0,498	0,433	0,428	0,482	0,448
105	0,420	0,420	0,443	0,428	0,480	0,523	0,548	0,517	0,457	0,452	0,511	0,473
112	0,437	0,406	0,435	0,426	0,492	0,521	0,581	0,531	0,476	0,467	0,525	0,490
119	0,469	0,403	0,433	0,435	0,481	0,520	0,598	0,533	0,478	0,464	0,529	0,491
126	0,459	0,403	0,437	0,433	0,515	0,540	0,621	0,559	0,504	0,506	0,568	0,526
133	0,454	0,459	0,469	0,461	0,632	0,624	0,633	0,630	0,524	0,512	0,583	0,540
140	0,504	0,512	0,499	0,505	0,678	0,648	0,657	0,661	0,525	0,527	0,572	0,541
147	0,510	0,514	0,504	0,509	0,674	0,650	0,657	0,660	0,550	0,584	0,609	0,581
154	0,530	0,545	0,554	0,543	0,696	0,615	0,668	0,660	0,551	0,539	0,628	0,573
161	0,537	0,546	0,540	0,541	0,700	0,622	0,678	0,667	0,573	0,560	0,638	0,590
168	0,541	0,568	0,509	0,539	0,715	0,628	0,680	0,674	0,591	0,564	0,653	0,603
175	0,546	0,569	0,524	0,546	0,748	0,693	0,737	0,726	0,621	0,590	0,680	0,630
182	0,561	0,588	0,572	0,573	0,736	0,712	0,760	0,736	0,636	0,622	0,708	0,655

Tabela 17: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GN, moagem La.

Idade de ensaio	Série 1											
	GN La 057 - 344 mm				GN La 047 - 282 mm				GN La 037 - 185 mm			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,001	0,054	0,080	0,045	0,023	0,034	0,016	0,024	0,000	0,010	0,000	0,003
4	0,047	0,053	0,040	0,047	0,037	0,025	0,020	0,028	0,001	0,032	0,015	0,016
7	0,047	0,079	0,057	0,061	0,092	0,044	0,039	0,059	0,048	0,076	0,055	0,060
9	0,105	0,081	0,059	0,082	0,118	0,074	0,071	0,087	0,076	0,132	0,111	0,106
14	0,100	0,120	0,143	0,121	0,149	0,137	0,112	0,132	0,169	0,183	0,162	0,171
16	0,174	0,126	0,115	0,138	0,152	0,131	0,150	0,144	0,187	0,218	0,216	0,207
21	0,166	0,170	0,175	0,170	0,268	0,198	0,218	0,228	0,190	0,260	0,229	0,226
23	0,235	0,213	0,190	0,213	0,254	0,224	0,227	0,235	0,213	0,248	0,273	0,245
28	0,212	0,252	0,279	0,248	0,305	0,288	0,288	0,293	0,268	0,293	0,309	0,290
35	0,275	0,296	0,297	0,289	0,354	0,315	0,319	0,329	0,339	0,358	0,363	0,353
42	0,344	0,344	0,408	0,366	0,386	0,377	0,369	0,378	0,369	0,441	0,413	0,408
49	0,367	0,405	0,389	0,387	0,460	0,440	0,460	0,454	0,409	0,476	0,471	0,452
56	0,409	0,428	0,422	0,420	0,470	0,443	0,487	0,467	0,471	0,526	0,496	0,498
63	0,475	0,435	0,441	0,451	0,531	0,491	0,483	0,502	0,517	0,529	0,564	0,537
70	0,426	0,462	0,467	0,452	0,551	0,524	0,515	0,530	0,532	0,586	0,604	0,574
77	0,437	0,481	0,488	0,469	0,554	0,523	0,511	0,529	0,577	0,597	0,604	0,593
84	0,460	0,499	0,494	0,484	0,555	0,548	0,545	0,549	0,574	0,599	0,600	0,591
91	0,463	0,517	0,508	0,496	0,534	0,558	0,562	0,551	0,611	0,681	0,644	0,645
98	0,493	0,554	0,555	0,534	0,591	0,591	0,589	0,590	0,626	0,665	0,651	0,647
105	0,509	0,550	0,564	0,541	0,614	0,618	0,651	0,628	0,692	0,722	0,684	0,699
112	0,511	0,572	0,603	0,562	0,600	0,614	0,650	0,621	0,701	0,754	0,717	0,724
119	0,535	0,581	0,595	0,570	0,613	0,648	0,651	0,637	0,700	0,724	0,726	0,717
126	0,558	0,606	0,624	0,596	0,619	0,657	0,663	0,646	0,717	0,755	0,751	0,741
133	0,557	0,606	0,621	0,595	0,607	0,652	0,709	0,656	0,731	0,771	0,767	0,757
140	0,566	0,623	0,640	0,610	0,657	0,692	0,738	0,695	0,727	0,781	0,769	0,759
147	0,599	0,652	0,661	0,638	0,671	0,711	0,715	0,699	0,772	0,812	0,806	0,797
154	0,635	0,676	0,696	0,669	0,644	0,690	0,707	0,681	0,788	0,823	0,820	0,811
161	0,638	0,682	0,705	0,675	0,686	0,736	0,744	0,722	0,768	0,834	0,822	0,808
168	0,645	0,720	0,713	0,692	0,725	0,736	0,766	0,742	0,814	0,705	0,887	0,802
175	0,647	0,692	0,718	0,686	0,721	0,763	0,770	0,751	0,825	0,852	0,886	0,854
182	0,669	0,718	0,747	0,711	0,761	0,783	0,785	0,776	0,845	0,871	0,876	0,864

Tabela 18: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GN, moagem Ro.

Idade de ensaio	Série 1											
	GN Ro 057 - 298 mm				GN Ro 047 - 243 mm				GN Ro 037 - 153 mm			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,016	0,003	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,007	0,041	0,000	0,016	0,017	0,023	0,020	0,020	0,015	0,017	0,040	0,024
7	0,013	0,043	0,000	0,019	0,053	0,045	0,050	0,049	0,044	0,044	0,051	0,046
9	0,041	0,065	0,024	0,043	0,063	0,077	0,066	0,068	0,054	0,057	0,085	0,065
14	0,088	0,119	0,066	0,091	0,098	0,094	0,068	0,087	0,076	0,056	0,062	0,065
16	0,111	0,098	0,092	0,100	0,119	0,104	0,093	0,105	0,079	0,074	0,081	0,078
21	0,091	0,119	0,084	0,098	0,154	0,132	0,110	0,132	0,077	0,111	0,083	0,091
23	0,123	0,116	0,079	0,106	0,159	0,152	0,115	0,142	0,088	0,105	0,098	0,097
28	0,116	0,142	0,106	0,121	0,173	0,162	0,129	0,155	0,095	0,103	0,120	0,106
35	0,145	0,160	0,167	0,157	0,207	0,203	0,172	0,194	0,123	0,139	0,143	0,135
42	0,169	0,183	0,176	0,176	0,229	0,215	0,180	0,208	0,133	0,144	0,146	0,141
49	0,175	0,204	0,171	0,184	0,242	0,258	0,202	0,234	0,138	0,156	0,166	0,153
56	0,234	0,228	0,230	0,231	0,266	0,275	0,242	0,261	0,163	0,155	0,203	0,174
63	0,213	0,248	0,245	0,235	0,290	0,281	0,259	0,277	0,179	0,185	0,215	0,193
70	0,222	0,258	0,219	0,233	0,304	0,301	0,252	0,286	0,184	0,199	0,220	0,201
77	0,236	0,264	0,269	0,256	0,306	0,319	0,296	0,307	0,190	0,214	0,250	0,218
84	0,242	0,282	0,225	0,250	0,343	0,330	0,297	0,324	0,181	0,198	0,218	0,199
91	0,252	0,287	0,260	0,266	0,346	0,342	0,359	0,349	0,213	0,226	0,258	0,232
98	0,271	0,323	0,278	0,291	0,354	0,356	0,306	0,338	0,216	0,231	0,253	0,233
105	0,292	0,323	0,284	0,300	0,345	0,365	0,346	0,352	0,235	0,248	0,273	0,252
112	0,297	0,326	0,295	0,306	0,377	0,369	0,365	0,370	0,240	0,254	0,279	0,258
119	0,298	0,327	0,292	0,305	0,370	0,359	0,325	0,351	0,238	0,254	0,271	0,254
126	0,309	0,334	0,304	0,316	0,381	0,370	0,344	0,365	0,240	0,256	0,276	0,257
133	0,323	0,366	0,324	0,337	0,388	0,372	0,352	0,371	0,245	0,253	0,278	0,259
140	0,320	0,347	0,316	0,328	0,390	0,379	0,348	0,373	0,265	0,247	0,260	0,258
147	0,322	0,349	0,318	0,330	0,410	0,398	0,370	0,393	0,258	0,268	0,292	0,273
154	0,344	0,374	0,366	0,361	0,433	0,425	0,396	0,418	0,257	0,268	0,296	0,274
161	0,366	0,389	0,362	0,373	0,435	0,425	0,397	0,419	0,258	0,267	0,299	0,275
168	0,377	0,404	0,375	0,385	0,449	0,435	0,407	0,430	0,275	0,279	0,320	0,291
175	0,375	0,408	0,376	0,386	0,477	0,447	0,414	0,446	0,269	0,284	0,334	0,296
182	0,373	0,397	0,369	0,380	0,464	0,496	0,442	0,467	0,284	0,294	0,341	0,306

Tabela 19: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GP, moagem Ma.

Idade de ensaio	Série 1											
	GP Ma 057 - 310 mm				GP Ma 047 - 250 mm				GP Ma 037 - 136 mm			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,023	0,046	0,042	0,037
4	0,011	0,011	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,026	0,047	0,049	0,041
7	0,026	0,022	0,008	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,040	0,078	0,089	0,069
9	0,044	0,068	0,009	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,076	0,097	0,110	0,094
14	0,058	0,055	0,075	0,063	0,034	0,059	0,059	0,051	0,082	0,102	0,120	0,101
16	0,081	0,069	0,039	0,063	0,038	0,060	0,062	0,053	0,100	0,124	0,148	0,124
21	0,095	0,090	0,111	0,099	0,040	0,059	0,075	0,058	0,171	0,134	0,118	0,141
23	0,106	0,091	0,102	0,100	0,060	0,065	0,078	0,068	0,187	0,149	0,147	0,161
28	0,129	0,109	0,100	0,112	0,130	0,078	0,080	0,096	0,178	0,167	0,167	0,171
35	0,163	0,181	0,116	0,153	0,086	0,138	0,093	0,106	0,143	0,177	0,199	0,173
42	0,219	0,162	0,141	0,174	0,114	0,199	0,155	0,156	0,165	0,182	0,207	0,184
49	0,187	0,164	0,154	0,168	0,132	0,189	0,153	0,158	0,173	0,238	0,244	0,218
56	0,204	0,179	0,165	0,183	0,151	0,204	0,181	0,179	0,175	0,223	0,240	0,213
63	0,222	0,191	0,228	0,214	0,165	0,184	0,181	0,177	0,237	0,224	0,245	0,235
70	0,242	0,232	0,208	0,227	0,183	0,183	0,164	0,177	0,246	0,231	0,249	0,242
77	0,248	0,239	0,214	0,233	0,212	0,195	0,166	0,191	0,244	0,265	0,225	0,245
84	0,259	0,228	0,221	0,236	0,191	0,239	0,205	0,212	0,209	0,274	0,298	0,260
91	0,335	0,248	0,245	0,276	0,224	0,239	0,237	0,233	0,219	0,305	0,284	0,269
98	0,291	0,240	0,254	0,262	0,240	0,238	0,255	0,244	0,202	0,273	0,298	0,257
105	0,346	0,268	0,281	0,298	0,236	0,245	0,277	0,253	0,233	0,276	0,320	0,276
112	0,299	0,264	0,259	0,274	0,279	0,248	0,275	0,267	0,231	0,294	0,326	0,283
119	0,312	0,286	0,278	0,292	0,314	0,299	0,322	0,312	0,226	0,296	0,318	0,280
126	0,304	0,275	0,265	0,281	0,321	0,341	0,298	0,320	0,256	0,317	0,302	0,292
133	0,335	0,275	0,287	0,299	0,368	0,365	0,286	0,340	0,320	0,315	0,296	0,311
140	0,383	0,289	0,351	0,341	0,341	0,346	0,309	0,332	0,304	0,309	0,281	0,298
147	0,357	0,305	0,332	0,332	0,368	0,319	0,353	0,347	0,285	0,322	0,311	0,306
154	0,371	0,320	0,319	0,337	0,402	0,332	0,409	0,381	0,270	0,325	0,300	0,298
161	0,367	0,321	0,335	0,341	0,405	0,373	0,392	0,390	0,218	0,349	0,337	0,302
168	0,381	0,327	0,397	0,369	0,386	0,379	0,392	0,385	0,258	0,335	0,363	0,319
175	0,388	0,341	0,342	0,357	0,402	0,405	0,390	0,399	0,296	0,370	0,349	0,338
182	0,419	0,371	0,375	0,389	0,403	0,411	0,380	0,398	0,312	0,380	0,364	0,352

Tabela 20: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GP, moagem La.

Idade de ensaio	Série 1											
	GP La 057 - 337 mm				GP La 047 - 280 mm				GP La 037 - 188 mm			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,030	0,009	0,004	0,014	0,000	0,012	0,003	0,005	0,000	0,008	0,011	0,006
4	0,022	0,027	0,028	0,026	0,011	0,014	0,011	0,012	0,009	0,010	0,016	0,012
7	0,043	0,056	0,057	0,052	0,010	0,032	0,020	0,021	0,025	0,022	0,018	0,022
9	0,124	0,064	0,031	0,073	0,057	0,045	0,049	0,050	0,047	0,031	0,028	0,035
14	0,098	0,094	0,063	0,085	0,085	0,077	0,070	0,077	0,074	0,058	0,039	0,057
16	0,117	0,096	0,050	0,088	0,078	0,069	0,094	0,080	0,087	0,078	0,075	0,080
21	0,153	0,133	0,123	0,136	0,127	0,125	0,125	0,126	0,090	0,123	0,113	0,109
23	0,145	0,172	0,098	0,138	0,142	0,128	0,132	0,134	0,139	0,140	0,155	0,145
28	0,169	0,173	0,126	0,156	0,176	0,163	0,170	0,169	0,165	0,165	0,186	0,172
35	0,177	0,199	0,155	0,177	0,196	0,185	0,190	0,190	0,197	0,203	0,229	0,210
42	0,206	0,227	0,186	0,206	0,260	0,213	0,234	0,236	0,235	0,259	0,263	0,252
49	0,309	0,253	0,225	0,262	0,249	0,229	0,242	0,240	0,248	0,255	0,307	0,270
56	0,296	0,264	0,247	0,269	0,271	0,243	0,256	0,257	0,250	0,269	0,296	0,272
63	0,282	0,308	0,240	0,277	0,308	0,294	0,302	0,301	0,278	0,293	0,315	0,295
70	0,307	0,301	0,258	0,289	0,327	0,289	0,310	0,309	0,312	0,315	0,323	0,317
77	0,312	0,312	0,277	0,300	0,312	0,294	0,320	0,309	0,318	0,322	0,331	0,324
84	0,315	0,320	0,289	0,308	0,331	0,331	0,333	0,332	0,318	0,347	0,352	0,339
91	0,305	0,329	0,291	0,308	0,338	0,323	0,342	0,334	0,338	0,371	0,374	0,361
98	0,329	0,374	0,326	0,343	0,395	0,340	0,368	0,368	0,345	0,375	0,383	0,368
105	0,336	0,353	0,325	0,338	0,379	0,352	0,372	0,368	0,349	0,381	0,384	0,371
112	0,357	0,360	0,338	0,352	0,386	0,345	0,375	0,369	0,360	0,393	0,400	0,384
119	0,352	0,364	0,345	0,353	0,391	0,365	0,379	0,378	0,365	0,413	0,427	0,401
126	0,375	0,388	0,389	0,384	0,396	0,370	0,384	0,383	0,378	0,409	0,416	0,401
133	0,361	0,371	0,415	0,382	0,402	0,366	0,390	0,386	0,387	0,416	0,424	0,409
140	0,368	0,378	0,411	0,385	0,421	0,394	0,409	0,408	0,413	0,440	0,454	0,436
147	0,406	0,412	0,457	0,425	0,433	0,407	0,409	0,416	0,437	0,470	0,477	0,462
154	0,420	0,423	0,437	0,427	0,431	0,405	0,422	0,419	0,448	0,478	0,486	0,471
161	0,427	0,431	0,448	0,435	0,454	0,419	0,437	0,437	0,465	0,481	0,516	0,487
168	0,431	0,456	0,431	0,439	0,451	0,429	0,441	0,441	0,470	0,481	0,512	0,488
175	0,427	0,457	0,430	0,438	0,470	0,440	0,454	0,455	0,473	0,503	0,514	0,497
182	0,449	0,450	0,446	0,448	0,484	0,453	0,469	0,469	0,508	0,577	0,545	0,543

Tabela 21: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado GP, moagem Ro.

Idade de ensalo	Série 1											
	GP Ro 057 - 280 mm				GP Ro 047 - 239 mm				GP Ro 037 - 144 mm			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,006	0,012	0,009	0,002	0,003	0,009	0,005
4	0,012	0,000	0,000	0,004	0,024	0,024	0,020	0,023	0,011	0,006	0,010	0,009
7	0,156	0,000	0,000	0,052	0,043	0,097	0,044	0,061	0,020	0,015	0,015	0,017
9	0,195	0,019	0,026	0,080	0,054	0,168	0,046	0,089	0,032	0,035	0,029	0,032
14	0,217	0,048	0,052	0,106	0,114	0,166	0,080	0,120	0,059	0,051	0,053	0,054
16	0,257	0,048	0,056	0,120	0,116	0,162	0,095	0,124	0,065	0,041	0,057	0,054
21	0,276	0,087	0,113	0,159	0,135	0,179	0,120	0,145	0,100	0,070	0,086	0,085
23	0,338	0,076	0,117	0,177	0,178	0,154	0,116	0,149	0,105	0,079	0,112	0,099
28	0,356	0,084	0,097	0,179	0,188	0,181	0,131	0,166	0,112	0,100	0,121	0,111
35	0,312	0,112	0,108	0,177	0,192	0,219	0,171	0,194	0,129	0,130	0,131	0,130
42	0,331	0,127	0,170	0,209	0,210	0,221	0,178	0,203	0,156	0,184	0,161	0,167
49	0,362	0,146	0,141	0,216	0,226	0,279	0,234	0,246	0,132	0,149	0,170	0,150
56	0,381	0,176	0,164	0,240	0,270	0,293	0,247	0,270	0,177	0,159	0,167	0,168
63	0,337	0,180	0,189	0,235	0,259	0,283	0,239	0,260	0,186	0,192	0,161	0,180
70	0,349	0,183	0,188	0,240	0,297	0,308	0,247	0,284	0,206	0,192	0,207	0,202
77	0,346	0,211	0,211	0,256	0,299	0,314	0,269	0,294	0,207	0,203	0,206	0,206
84	0,348	0,203	0,212	0,254	0,314	0,332	0,290	0,312	0,230	0,215	0,221	0,222
91	0,349	0,219	0,286	0,285	0,319	0,352	0,320	0,330	0,234	0,236	0,237	0,236
98	0,353	0,228	0,296	0,292	0,328	0,350	0,303	0,327	0,241	0,232	0,243	0,239
105	0,375	0,239	0,310	0,308	0,351	0,369	0,320	0,347	0,240	0,263	0,237	0,247
112	0,384	0,251	0,289	0,308	0,364	0,373	0,321	0,353	0,237	0,238	0,245	0,240
119	0,398	0,267	0,273	0,313	0,365	0,381	0,310	0,352	0,274	0,254	0,257	0,262
126	0,407	0,269	0,282	0,319	0,368	0,381	0,333	0,360	0,250	0,242	0,250	0,247
133	0,394	0,289	0,289	0,324	0,399	0,387	0,347	0,378	0,258	0,251	0,257	0,255
140	0,376	0,273	0,282	0,310	0,374	0,386	0,351	0,371	0,283	0,273	0,280	0,278
147	0,354	0,275	0,283	0,304	0,391	0,410	0,385	0,395	0,298	0,291	0,291	0,293
154	0,351	0,301	0,306	0,319	0,419	0,432	0,390	0,414	0,293	0,291	0,295	0,293
161	0,360	0,320	0,326	0,336	0,418	0,432	0,386	0,412	0,307	0,299	0,304	0,303
168	0,370	0,324	0,334	0,343	0,425	0,445	0,402	0,424	0,296	0,296	0,303	0,298
175	0,373	0,328	0,336	0,346	0,426	0,470	0,409	0,435	0,306	0,312	0,314	0,311
182	0,365	0,324	0,332	0,340	0,473	0,462	0,436	0,457	0,361	0,346	0,350	0,352

Tabela 22: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado BR, moagem Ma.

Idade de ensaio	Série 1											
	BR Ma 057 - 311 mm				BR Ma 047 - 249 mm				BR Ma 037 - 135 mm			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,033	0,015	0,000	0,016	0,020	0,060	0,026	0,035	0,018	0,000	0,015	0,011
4	0,074	0,070	0,053	0,066	0,047	0,080	0,089	0,072	0,048	0,000	0,050	0,033
7	0,103	0,211	0,228	0,181	0,190	0,156	0,237	0,194	0,122	0,171	0,111	0,135
9	0,215	0,227	0,225	0,222	0,206	0,225	0,212	0,215	0,155	0,155	0,146	0,152
14	0,255	0,237	0,237	0,243	0,248	0,250	0,241	0,246	0,185	0,151	0,188	0,175
16	0,222	0,238	0,273	0,244	0,260	0,264	0,221	0,248	0,188	0,157	0,190	0,178
21	0,269	0,247	0,254	0,257	0,258	0,272	0,248	0,259	0,200	0,139	0,190	0,176
23	0,270	0,248	0,255	0,258	0,268	0,292	0,251	0,270	0,218	0,189	0,211	0,206
28	0,269	0,260	0,264	0,264	0,265	0,318	0,245	0,276	0,206	0,203	0,205	0,205
35	0,265	0,274	0,267	0,269	0,307	0,324	0,288	0,306	0,214	0,198	0,232	0,215
42	0,261	0,270	0,275	0,269	0,292	0,352	0,283	0,309	0,213	0,209	0,232	0,218
49	0,278	0,267	0,313	0,286	0,298	0,338	0,276	0,304	0,223	0,170	0,237	0,210
56	0,281	0,268	0,288	0,279	0,291	0,368	0,276	0,312	0,214	0,162	0,218	0,198
63	0,272	0,320	0,291	0,294	0,290	0,355	0,276	0,307	0,210	0,210	0,211	0,210
70	0,285	0,279	0,286	0,284	0,278	0,351	0,298	0,309	0,218	0,208	0,241	0,223
77	0,295	0,285	0,287	0,289	0,294	0,357	0,299	0,316	0,250	0,179	0,236	0,222
84	0,293	0,284	0,291	0,289	0,300	0,322	0,320	0,314	0,250	0,197	0,234	0,227
91	0,308	0,300	0,305	0,305	0,318	0,367	0,324	0,336	0,250	0,200	0,224	0,225
98	0,304	0,297	0,299	0,300	0,315	0,363	0,321	0,333	0,227	0,209	0,228	0,222
105	0,275	0,312	0,295	0,294	0,298	0,372	0,332	0,334	0,247	0,192	0,263	0,234
112	0,307	0,299	0,291	0,299	0,310	0,384	0,344	0,346	0,251	0,188	0,256	0,232
119	0,286	0,297	0,307	0,297	0,310	0,363	0,340	0,338	0,256	0,226	0,228	0,237
126	0,294	0,291	0,304	0,296	0,309	0,382	0,356	0,349	0,256	0,249	0,240	0,248
133	0,315	0,289	0,302	0,302	0,314	0,381	0,352	0,349	0,256	0,241	0,260	0,252
140	0,313	0,299	0,300	0,304	0,312	0,379	0,345	0,345	0,231	0,260	0,222	0,237
147	0,312	0,291	0,315	0,306	0,313	0,374	0,340	0,342	0,248	0,196	0,275	0,239
154	0,314	0,295	0,299	0,303	0,321	0,344	0,345	0,337	0,246	0,177	0,264	0,229
161	0,316	0,289	0,299	0,301	0,317	0,357	0,342	0,339	0,253	0,186	0,247	0,229
168	0,328	0,297	0,304	0,309	0,314	0,366	0,346	0,342	0,282	0,212	0,249	0,248
175	0,316	0,297	0,302	0,305	0,328	0,375	0,346	0,350	0,268	0,202	0,261	0,244
182	0,317	0,313	0,319	0,316	0,332	0,401	0,347	0,360	0,277	0,211	0,268	0,252

Tabela 23: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado BR, moagem La.

Idade de ensaio	Série 1											
	BR La 057 - 327 mm				BR La 047 - 277 mm				BR La 037 - 176 mm			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,011	0,004	0,012	0,042	0,047	0,034	0,029	0,015	0,007	0,017
4	0,039	0,062	0,095	0,065	0,081	0,101	0,114	0,099	0,055	0,093	0,035	0,061
7	0,125	0,164	0,147	0,145	0,209	0,225	0,212	0,215	0,127	0,122	0,135	0,128
9	0,148	0,172	0,204	0,175	0,226	0,251	0,266	0,248	0,167	0,178	0,185	0,177
14	0,133	0,180	0,217	0,177	0,225	0,251	0,268	0,248	0,232	0,239	0,248	0,240
16	0,112	0,182	0,223	0,172	0,220	0,253	0,275	0,249	0,231	0,240	0,266	0,245
21	0,137	0,185	0,229	0,184	0,236	0,263	0,281	0,260	0,248	0,237	0,255	0,247
23	0,129	0,188	0,236	0,184	0,244	0,276	0,294	0,271	0,253	0,269	0,262	0,261
28	0,134	0,191	0,227	0,184	0,301	0,283	0,303	0,296	0,259	0,247	0,269	0,258
35	0,148	0,206	0,271	0,208	0,251	0,281	0,366	0,299	0,305	0,255	0,285	0,281
42	0,164	0,209	0,261	0,211	0,275	0,291	0,309	0,292	0,273	0,267	0,274	0,271
49	0,153	0,217	0,278	0,216	0,268	0,298	0,380	0,315	0,291	0,275	0,302	0,289
56	0,150	0,232	0,275	0,219	0,280	0,297	0,385	0,321	0,294	0,259	0,353	0,302
63	0,162	0,217	0,261	0,213	0,273	0,314	0,369	0,319	0,285	0,264	0,282	0,277
70	0,162	0,204	0,257	0,208	0,284	0,315	0,325	0,308	0,277	0,269	0,276	0,274
77	0,184	0,208	0,260	0,217	0,301	0,328	0,326	0,318	0,285	0,283	0,281	0,283
84	0,178	0,218	0,259	0,218	0,315	0,320	0,325	0,320	0,302	0,275	0,279	0,285
91	0,158	0,218	0,255	0,210	0,296	0,312	0,330	0,313	0,289	0,290	0,301	0,293
98	0,160	0,220	0,255	0,212	0,293	0,322	0,329	0,315	0,285	0,283	0,296	0,288
105	0,165	0,226	0,263	0,218	0,297	0,326	0,337	0,320	0,287	0,263	0,275	0,275
112	0,163	0,232	0,256	0,217	0,276	0,319	0,338	0,311	0,275	0,265	0,278	0,273
119	0,163	0,220	0,256	0,213	0,294	0,322	0,329	0,315	0,326	0,275	0,323	0,308
126	0,166	0,239	0,263	0,223	0,288	0,316	0,327	0,310	0,267	0,261	0,268	0,265
133	0,156	0,239	0,254	0,216	0,285	0,309	0,331	0,308	0,265	0,256	0,266	0,262
140	0,161	0,229	0,254	0,215	0,286	0,321	0,325	0,311	0,297	0,276	0,284	0,285
147	0,189	0,257	0,256	0,234	0,289	0,320	0,329	0,312	0,291	0,286	0,296	0,291
154	0,183	0,240	0,272	0,232	0,279	0,316	0,324	0,306	0,278	0,271	0,284	0,278
161	0,173	0,232	0,263	0,223	0,283	0,314	0,325	0,307	0,285	0,284	0,281	0,283
168	0,180	0,227	0,267	0,225	0,287	0,309	0,319	0,305	0,278	0,270	0,284	0,277
175	0,178	0,222	0,270	0,223	0,289	0,323	0,328	0,313	0,285	0,280	0,291	0,286
182	0,180	0,233	0,272	0,229	0,297	0,325	0,330	0,318	0,301	0,320	0,315	0,312

Tabela 24: resumo dos resultados de expansão da Série 1, agregado BR, moagem Ro.

Idade de ensaio	Série 1											
	BR Ro 057 - 298 mm				BR Ro 047 - 238 mm				BR Ro 037 - 125 mm			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,011	0,028	0,000	0,013	0,030	0,039	0,034	0,035	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,098	0,110	0,101	0,103	0,047	0,062	0,054	0,054	0,055	0,026	0,057	0,046
7	0,242	0,274	0,213	0,243	0,286	0,272	0,287	0,282	0,124	0,098	0,133	0,118
9	0,246	0,270	0,234	0,250	0,287	0,289	0,290	0,289	0,163	0,117	0,156	0,146
14	0,250	0,270	0,241	0,254	0,298	0,281	0,288	0,289	0,151	0,132	0,168	0,150
16	0,252	0,289	0,231	0,257	0,314	0,288	0,328	0,310	0,181	0,139	0,170	0,163
21	0,262	0,270	0,229	0,253	0,312	0,293	0,328	0,311	0,158	0,151	0,178	0,162
23	0,244	0,275	0,244	0,254	0,313	0,303	0,322	0,312	0,154	0,153	0,175	0,161
28	0,246	0,287	0,248	0,260	0,328	0,292	0,329	0,316	0,170	0,158	0,175	0,168
35	0,273	0,273	0,264	0,270	0,327	0,331	0,314	0,324	0,223	0,168	0,194	0,195
42	0,260	0,312	0,238	0,270	0,317	0,330	0,320	0,323	0,223	0,172	0,189	0,195
49	0,304	0,309	0,247	0,287	0,324	0,315	0,326	0,322	0,231	0,175	0,211	0,205
56	0,280	0,289	0,252	0,274	0,333	0,310	0,342	0,328	0,228	0,206	0,217	0,217
63	0,289	0,298	0,256	0,281	0,346	0,304	0,339	0,330	0,224	0,175	0,249	0,216
70	0,289	0,292	0,249	0,277	0,344	0,314	0,346	0,335	0,228	0,170	0,254	0,217
77	0,277	0,294	0,258	0,276	0,358	0,317	0,337	0,337	0,227	0,170	0,250	0,216
84	0,267	0,288	0,252	0,269	0,363	0,332	0,347	0,347	0,208	0,172	0,246	0,208
91	0,269	0,302	0,271	0,281	0,368	0,338	0,355	0,354	0,236	0,172	0,211	0,206
98	0,278	0,302	0,275	0,285	0,348	0,337	0,355	0,347	0,230	0,172	0,216	0,206
105	0,291	0,300	0,276	0,289	0,359	0,351	0,358	0,356	0,248	0,178	0,260	0,229
112	0,280	0,302	0,271	0,284	0,369	0,352	0,363	0,361	0,237	0,187	0,262	0,229
119	0,284	0,293	0,264	0,280	0,349	0,344	0,352	0,348	0,207	0,185	0,260	0,217
126	0,272	0,291	0,263	0,275	0,355	0,336	0,370	0,354	0,205	0,184	0,228	0,206
133	0,281	0,316	0,273	0,290	0,377	0,343	0,369	0,363	0,201	0,183	0,227	0,204
140	0,289	0,299	0,271	0,286	0,369	0,337	0,359	0,355	0,200	0,180	0,227	0,202
147	0,282	0,302	0,276	0,287	0,358	0,338	0,363	0,353	0,201	0,160	0,233	0,198
154	0,281	0,307	0,286	0,291	0,375	0,350	0,368	0,364	0,196	0,160	0,226	0,194
161	0,288	0,309	0,278	0,292	0,364	0,333	0,352	0,350	0,190	0,160	0,220	0,190
168	0,281	0,300	0,269	0,283	0,364	0,367	0,351	0,361	0,183	0,198	0,245	0,209
175	0,288	0,299	0,271	0,286	0,367	0,337	0,351	0,352	0,175	0,179	0,227	0,194
182	0,273	0,291	0,264	0,276	0,366	0,347	0,361	0,358	0,187	0,186	0,233	0,202

Para poder analisar mais detalhadamente as expansões nas idades de ensaio indicadas pela ASTM C 1260 (16 e 28 dias), são apresentados inicialmente gráficos individuais para cada rocha e cada relação a/c, nos quais são exibidas apenas as leituras até 28 dias de idade. Na seqüência, tem-se um gráfico que delinea o comportamento da rocha, para todas as relações a/c estudadas, até a última leitura (182 dias).

Da Figura 60 até a Figura 63 são apresentados os resultados da rocha GN.

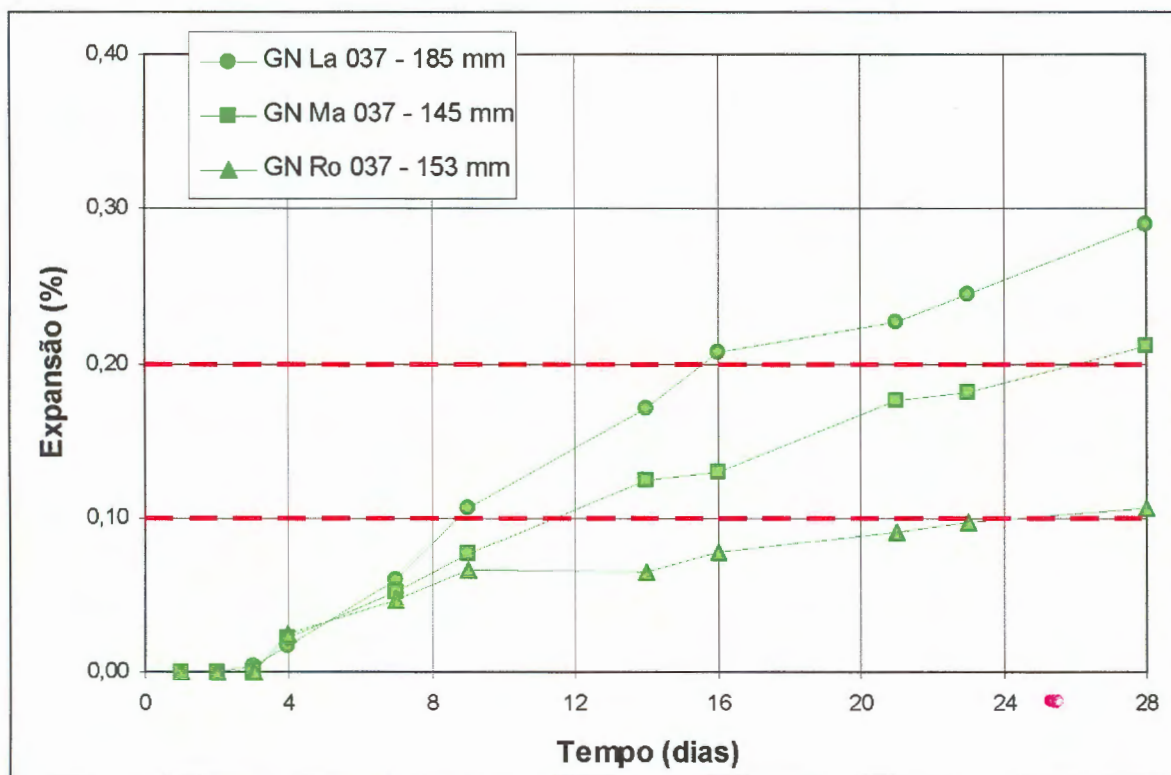


Figura 60: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,37, três moagens (S1).

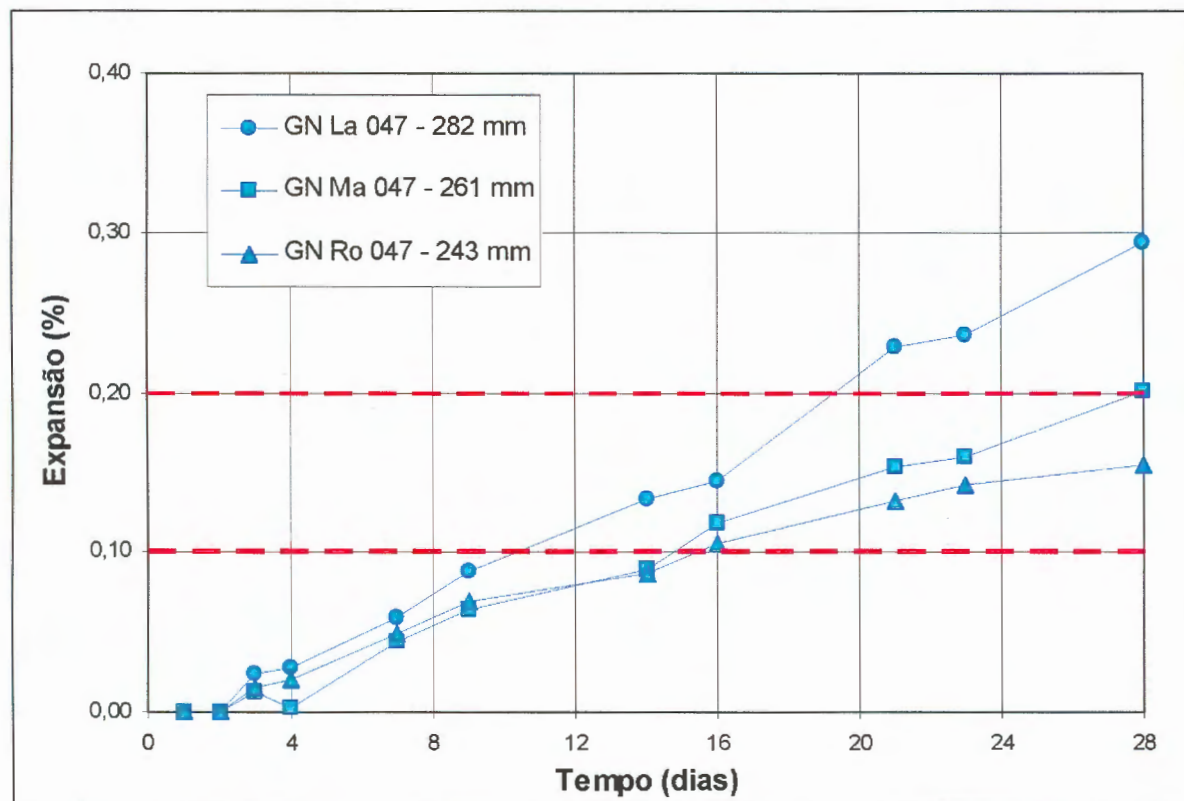


Figura 61: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,47, três moagens (S1).

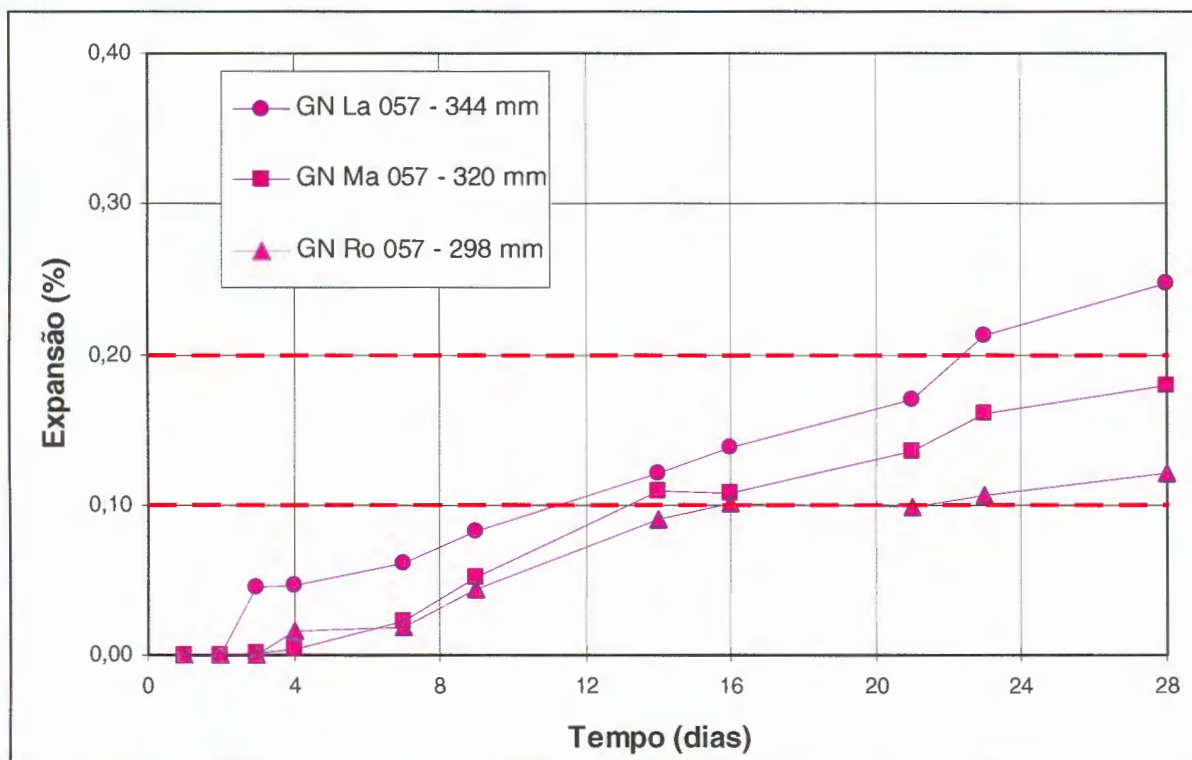


Figura 62: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,57, três moagens (S1).

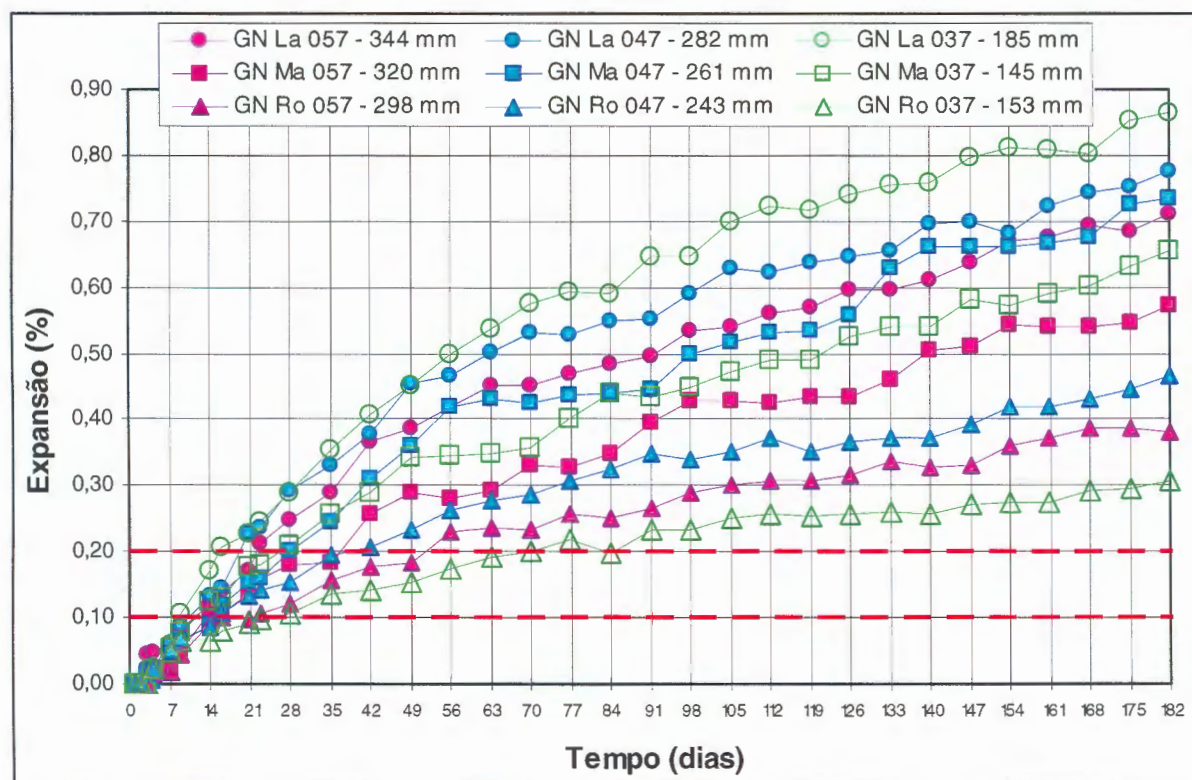


Figura 63: expansões até 182 dias, da rocha GN, três relações a/c e três moagens (S1).

Observa-se que, para a amostra GN e relação a/c 0,37, aos 16 dias a amostra poderia ser classificada como inócua, potencialmente reativa e reativa, de acordo com o tipo de moagem (Figura 60). Para as relações a/c 0,47 e 0,57, aos 16 dias, a amostra seria considerada potencialmente reativa. Aos 28 dias o comportamento foi bem semelhante para as três relações a/c.

Observando a Figura 63, nota-se o comportamento expansivo crescente da amostra, para todas as relações a/c e todas as moagens. Não há sinal de estabilização das expansões, ou seja, se as leituras prosseguissem além dos 182 dias, é provável que houvesse expansões ainda maiores. Aos 182 dias, a amostra moída no Los Angeles apresenta expansão de aproximadamente 0,9%, o que corresponde a uma expansão quase 300% maior do que a registrada aos 28 dias.

Tiecher (2005) analisou a amostra GN em seu trabalho, moída em britador de rolos, utilizando cimento CP V ARI, e seguindo a ASTM C 1260 (relação a/c 0,47). Os resultados encontrados neste trabalho são bastante semelhantes aos encontrados pela autora. Segundo os ensaios de Tiecher (2005), se analisado aos 16 dias, o agregado poderia ser considerado inócua, como o foi também no início desta pesquisa. Entretanto, em idades mais avançadas, não há dúvida quanto à reatividade potencial do agregado, nestas condições.

Analisando as expansões até os 28 dias, para todas as relações a/c, as maiores expansões foram sempre para a amostra moída no equipamento de Abrasão Los Angeles, seguida pela amostra moída no moinho de Mandíbulas e pelo moinho de Rolos. Em idades mais avançadas (Figura 63) esta tendência de comportamento se mantém. Uma provável explicação para o fato é que os grãos mais arredondados do agregado moído no Los Angeles fazem com que a matriz da argamassa fique mais compacta, com menos vazios, por causa da melhor arrumação dos grãos. Já o agregado moído no moinho de Rolos tem grãos mais angulosos, dá origem a argamassas mais secas, difíceis de moldar, com mais vazios. Nestes vazios se dá a acomodação do gel, gerando menos expansões nas dimensões das barras de argamassa.

Observa-se que com a menor relação a/c (0,37) a variação entre as expansões das argamassas com diferentes formas de grão é mais acentuada.

A todas as curvas de expansão da Figura 63 pode se ajustar linhas de tendência polinomiais com $R^2 > 0,98$, definindo o comportamento das expansões para a rocha analisada.

Na seqüência, da Figura 64 até a Figura 67, estão exibidos os resultados da amostra GP.

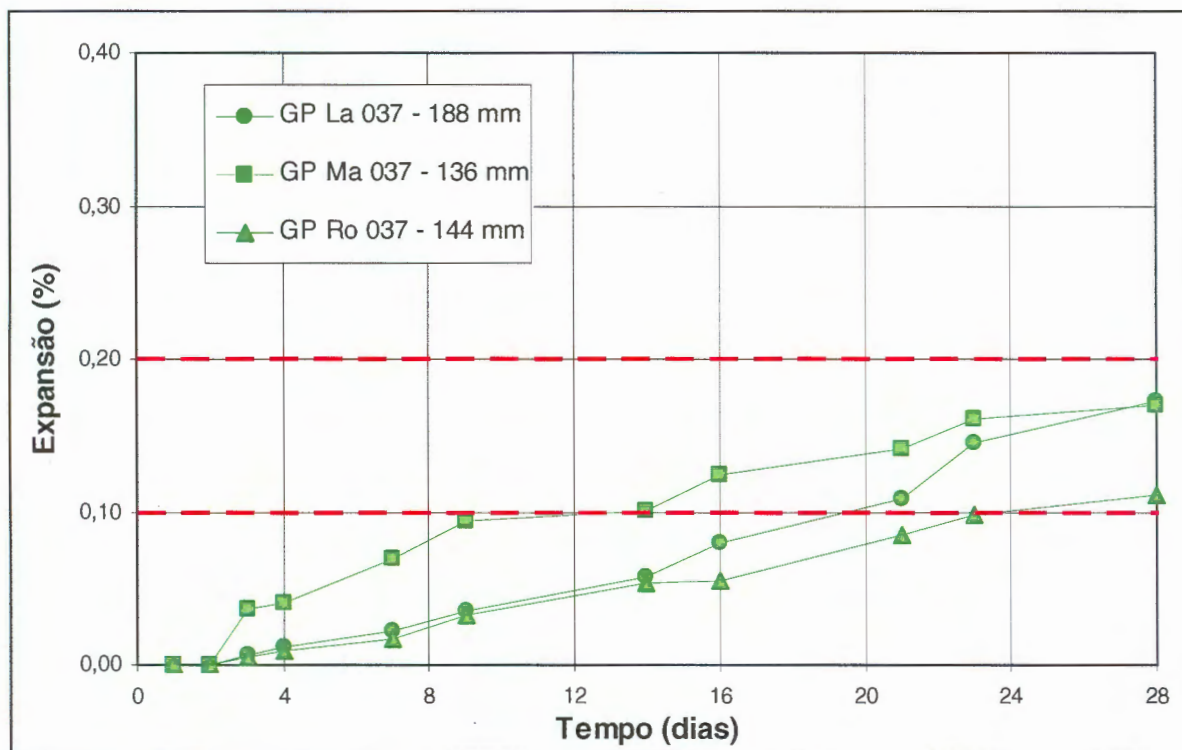


Figura 64: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,37, três moagens (S1).

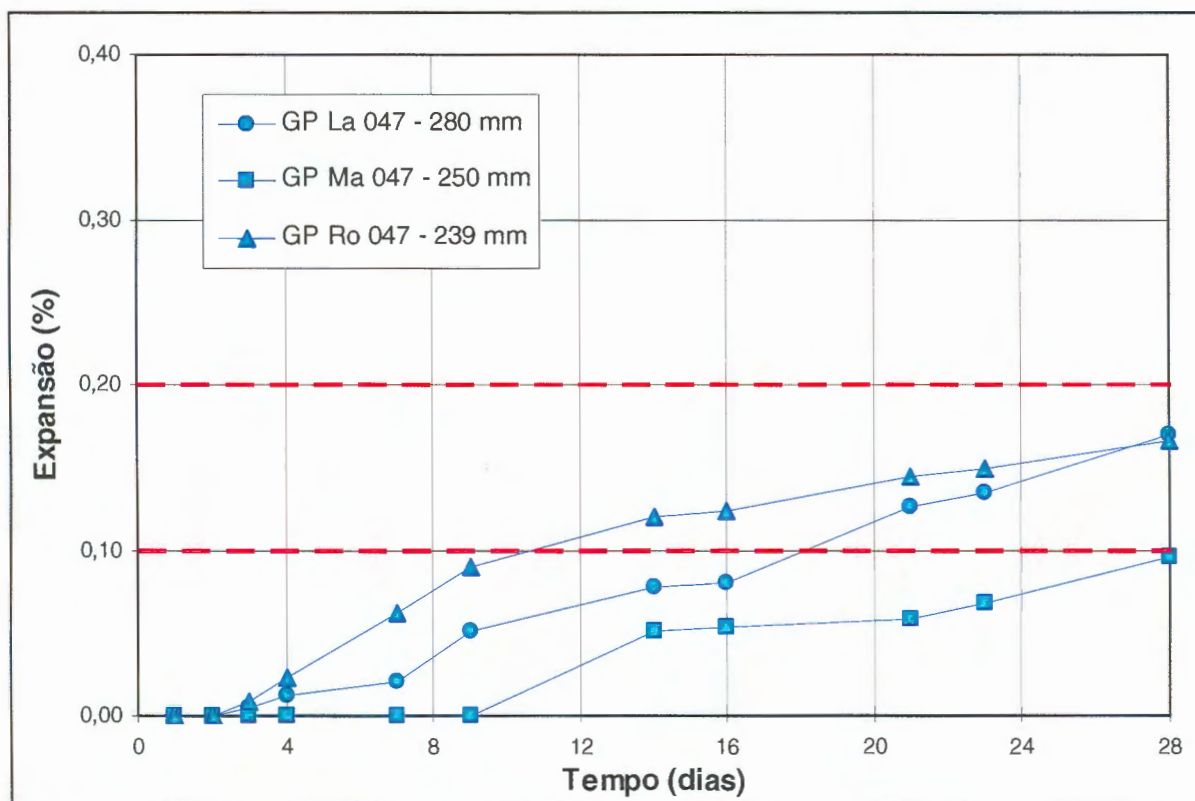


Figura 65: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,47, três moagens (S1).

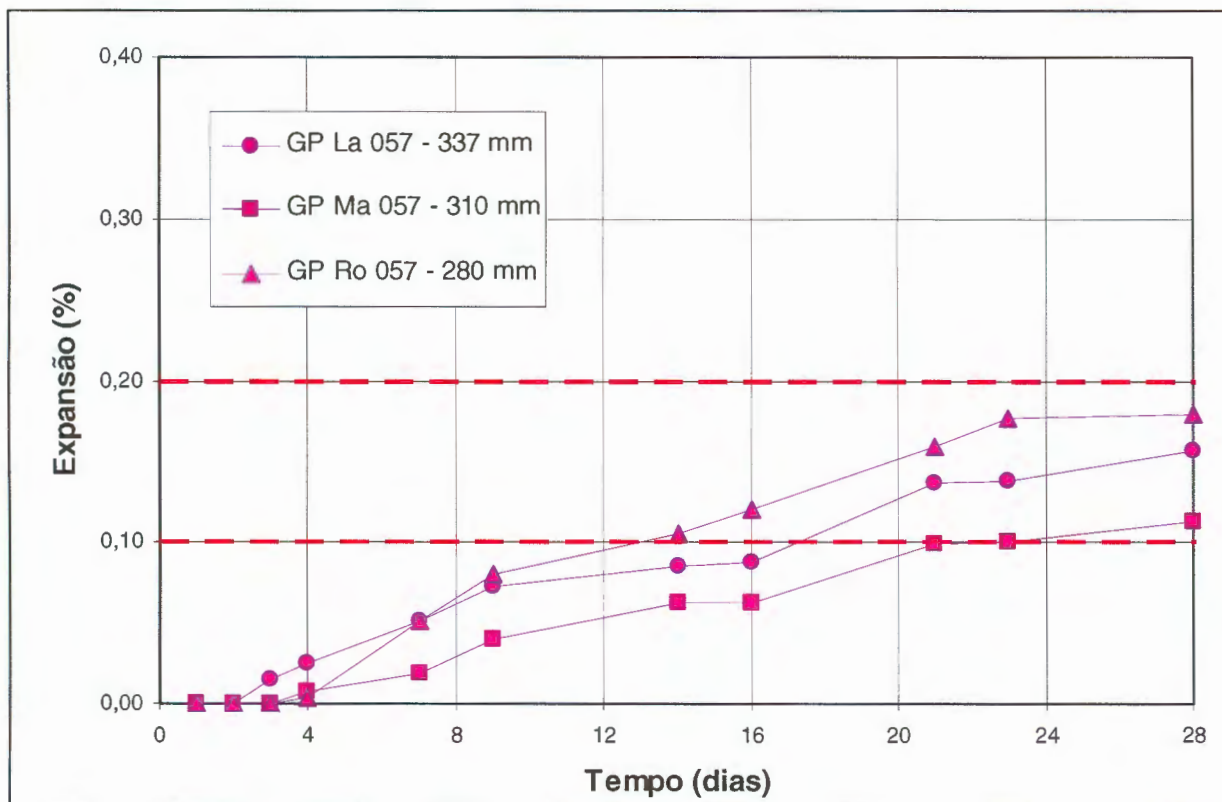


Figura 66: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,57, três moagens (S1).

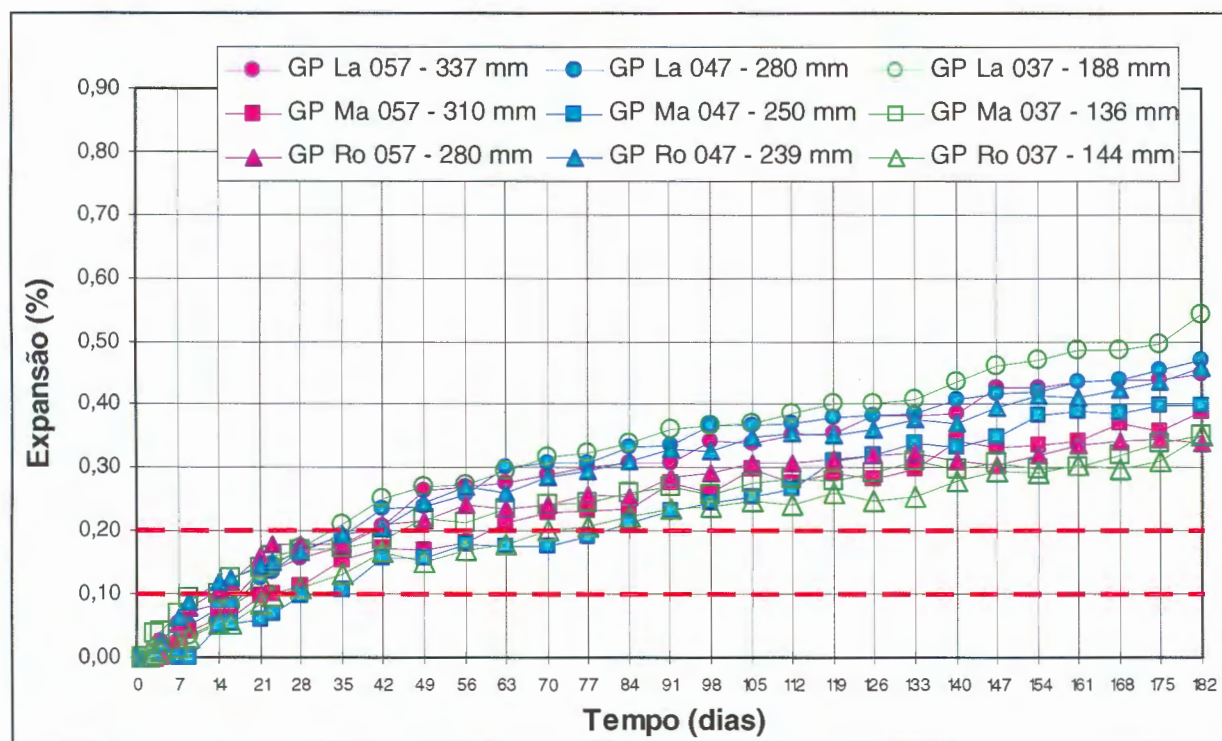


Figura 67: expansões até 182 dias, da rocha GP, três relações a/c e três moagens (S1).

Para a amostra GP, a análise aos 16 dias de idade pode indicar comportamento inócuo ou potencialmente reativo. Já aos 28 dias o comportamento já está mais definido, independentemente da relação a/c e tipo de moagem, a amostra pode ser considerada potencialmente reativa.

Em idades mais avançadas o comportamento é ainda crescente. Nota-se, nestas condições, também a tendência de maiores expansões para a amostra moída com o equipamento de Abrasão Los Angeles.

Linhas de tendência polinomiais também podem ser ajustadas, neste caso, com $R^2 > 0,94$.

Da Figura 68 até a Figura 71 estão apresentados os resultados da amostra BR.

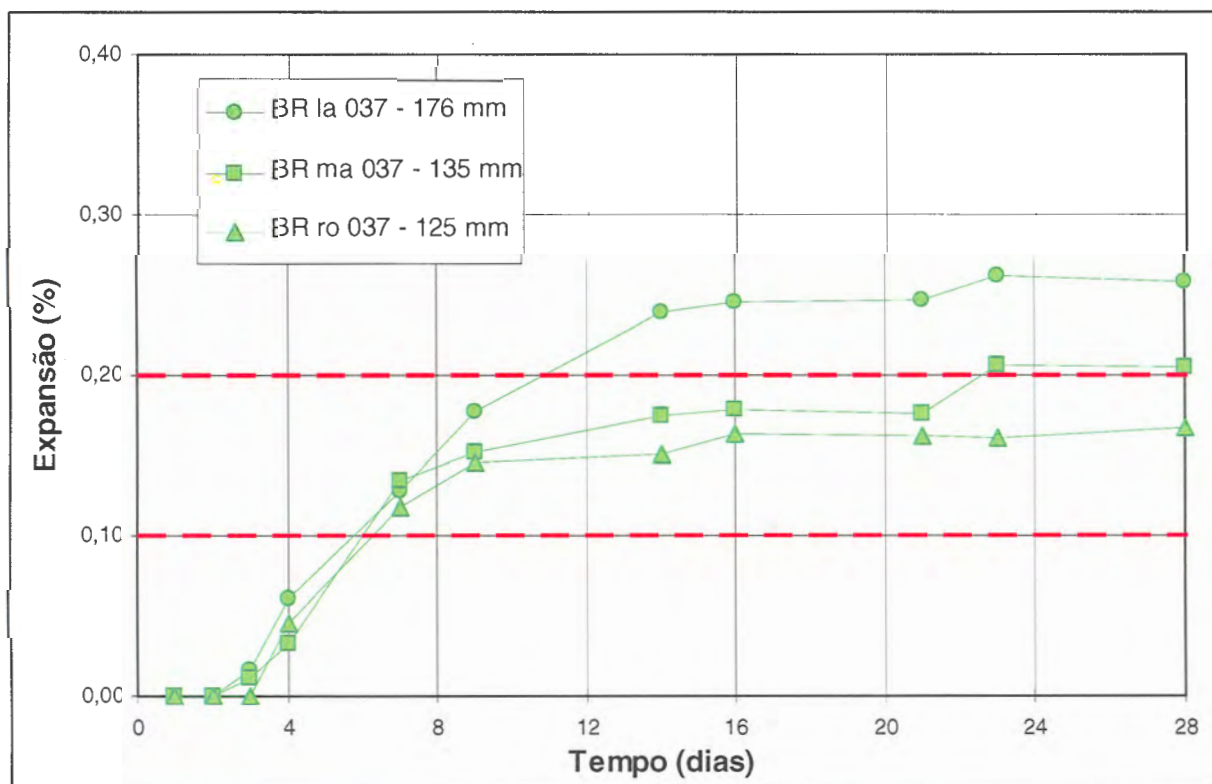


Figura 68: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,37, três moagens (S1).

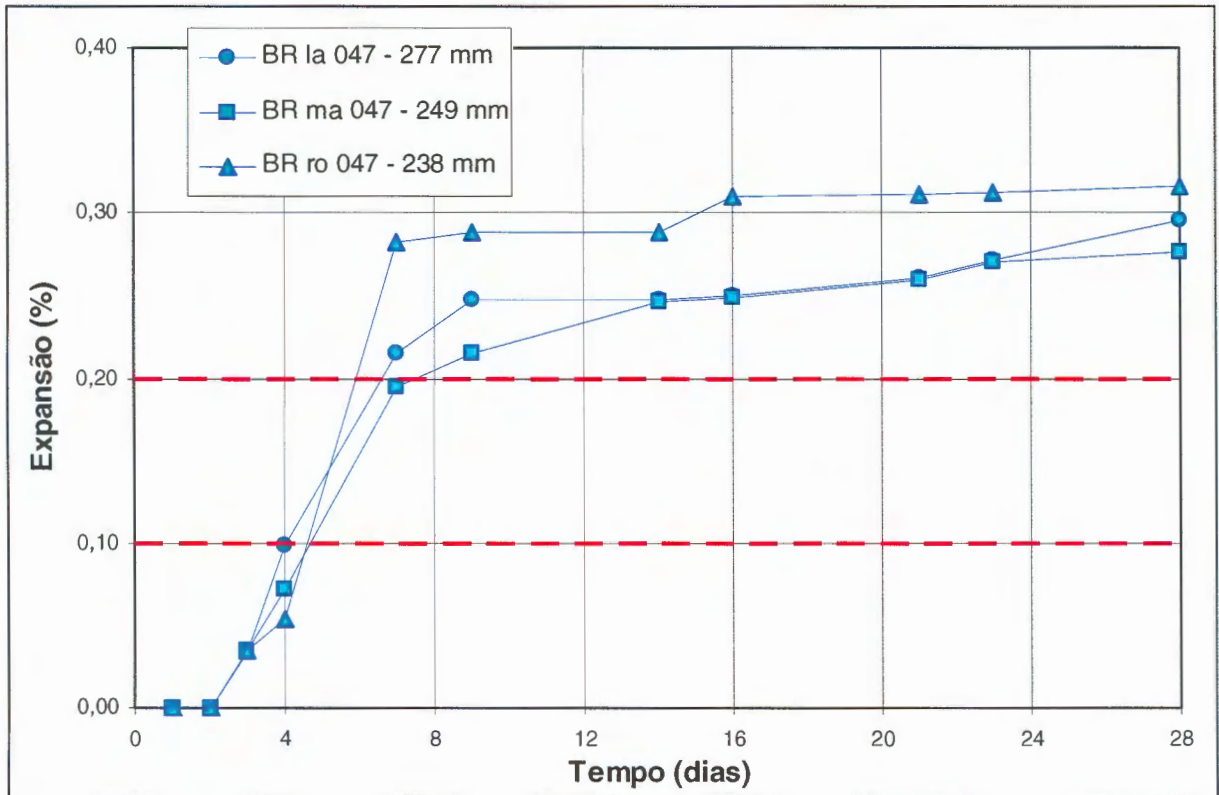


Figura 69: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,47, três moagens (S1).

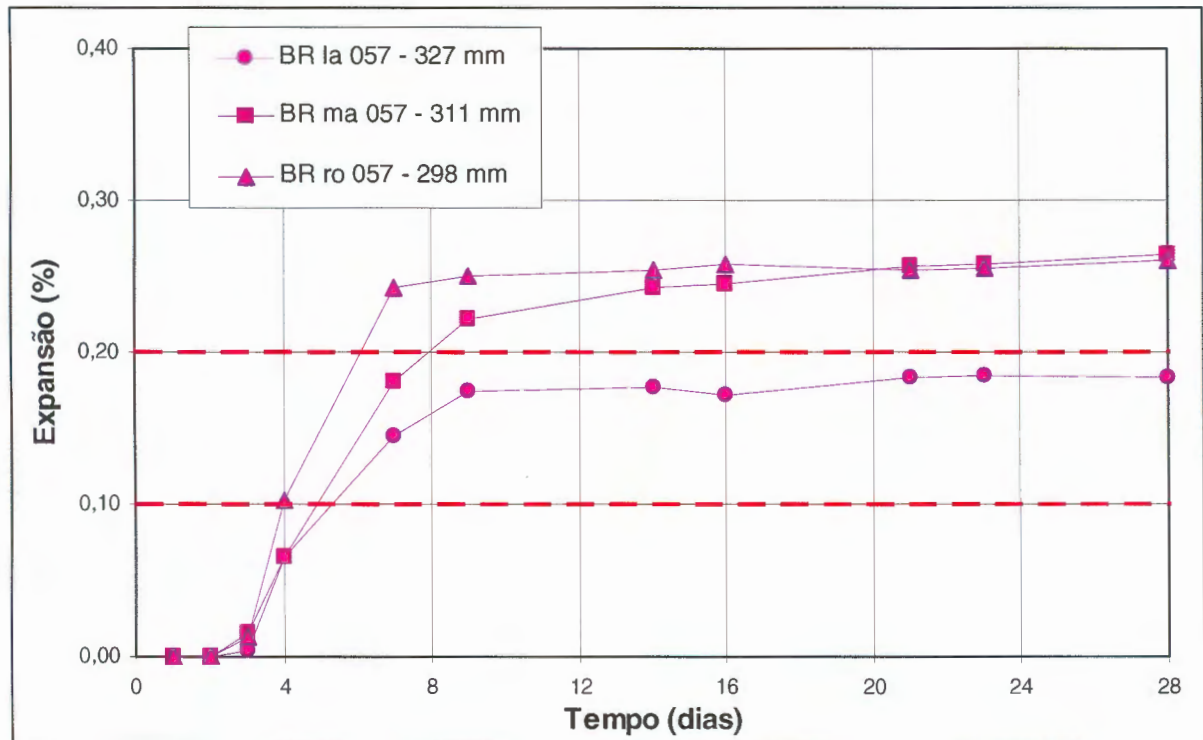


Figura 70: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,57, três moagens (S1).

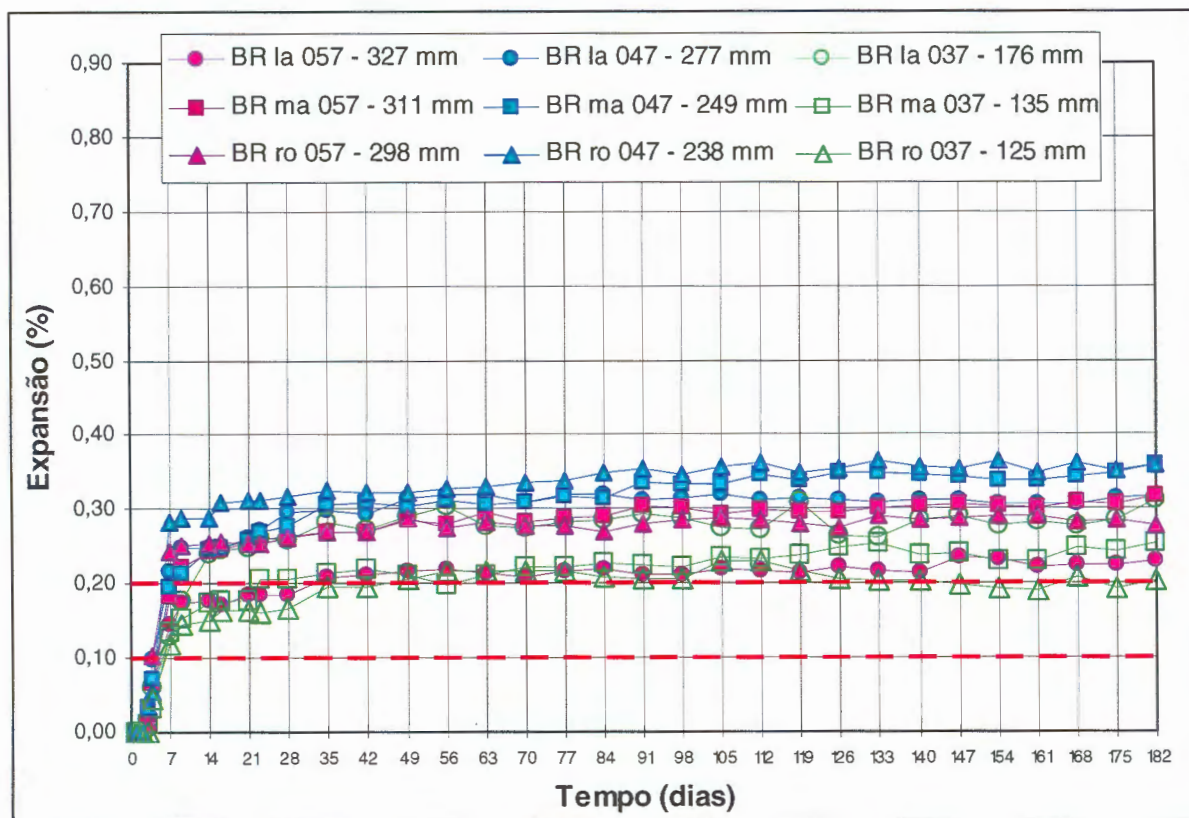


Figura 71: expansões até 182 dias, da rocha BR, três relações a/c e três moagens (S1).

Das figuras anteriores, verifica-se que em quase todos os ensaios, aos 16 dias a amostra já exibia comportamento reativo. A partir de aproximadamente 8 dias de idade, as expansões já não apresentaram aumento expressivo.

O comportamento estabilizado é notável, principalmente em idades superiores a 28 dias.

É possível o ajuste de linhas de tendência logarítmicas, com R^2 mínimo de 0,76.

4.4.2 Série 2

Na série 1 têm-se três rochas, cada uma foi britada de três formas diferentes, e para cada moagem foram utilizadas três relações a/c diferentes. Entretanto, a consistência foi fixada com utilização de aditivo. Deste modo, têm-se 27 ensaios de expansão para a S2.

Nas tabelas a seguir (Tabela 25 à Tabela 33) estão apresentados, para cada ensaio, os resultados individuais das três barras utilizadas no ensaio, e em seguida a média destes três resultados.

Tabela 25: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GN, moagem Ma.

Idade de ensaio	Série 2											
	GN Ma 057				GN Ma 047				GN Ma 037			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,005	0,010	0,002	0,006	0,006	0,005	0,004	0,005	0,057	0,027	0,007	0,030
4	0,010	0,020	0,006	0,012	0,006	0,008	0,005	0,006	0,077	0,041	0,010	0,042
7	0,008	0,039	0,019	0,022	0,036	0,079	0,033	0,049	0,143	0,089	0,052	0,095
9	0,027	0,059	0,039	0,042	0,058	0,046	0,035	0,046	0,187	0,156	0,085	0,143
14	0,061	0,101	0,075	0,079	0,093	0,108	0,092	0,098	0,253	0,211	0,166	0,210
16	0,067	0,101	0,080	0,083	0,128	0,125	0,114	0,122	0,288	0,253	0,199	0,247
21	0,116	0,151	0,134	0,134	0,184	0,173	0,160	0,172	0,322	0,318	0,325	0,322
23	0,120	0,155	0,140	0,138	0,196	0,207	0,170	0,191	0,376	0,342	0,356	0,358
28	0,167	0,201	0,183	0,184	0,230	0,225	0,201	0,219	0,418	0,399	0,358	0,392
35	0,197	0,226	0,218	0,214	0,264	0,260	0,241	0,255	0,491	0,449	0,396	0,445
42	0,243	0,242	0,232	0,239	0,313	0,299	0,276	0,296	0,508	0,455	0,413	0,459
49	0,258	0,280	0,262	0,267	0,344	0,322	0,306	0,324	0,543	0,502	0,452	0,499
56	0,309	0,296	0,292	0,299	0,357	0,356	0,331	0,348	0,583	0,551	0,503	0,545
63	0,312	0,324	0,326	0,321	0,380	0,359	0,339	0,359	0,620	0,592	0,540	0,584
70	0,325	0,321	0,318	0,321	0,414	0,387	0,369	0,390	0,637	0,608	0,550	0,599
77	0,349	0,345	0,343	0,346	0,437	0,374	0,433	0,415	0,670	0,647	0,587	0,635
84	0,368	0,366	0,363	0,366	0,446	0,420	0,403	0,423	0,717	0,685	0,627	0,676
91	0,377	0,367	0,366	0,370	0,474	0,444	0,428	0,449	0,734	0,708	0,648	0,697
98	0,406	0,386	0,385	0,392	0,510	0,479	0,456	0,482	0,752	0,723	0,657	0,711
105	0,416	0,405	0,410	0,410	0,518	0,490	0,467	0,492	0,790	0,765	0,700	0,752
112	0,413	0,413	0,411	0,412	0,523	0,508	0,478	0,503	0,808	0,788	0,726	0,774
119	0,424	0,423	0,421	0,422	0,557	0,540	0,513	0,537	0,830	0,807	0,737	0,791
126	0,452	0,448	0,444	0,448	0,595	0,551	0,538	0,561	0,847	0,826	0,756	0,810
133	0,462	0,476	0,476	0,471	0,590	0,556	0,562	0,569	0,849	0,843	0,763	0,818
140	0,474	0,478	0,479	0,477	0,607	0,566	0,571	0,582	0,886	0,868	0,795	0,850
147	0,478	0,485	0,485	0,483	0,617	0,579	0,576	0,591	0,915	0,901	0,828	0,882
154	0,487	0,493	0,492	0,491	0,636	0,599	0,588	0,608	0,957	0,912	0,844	0,905
161	0,500	0,512	0,512	0,508	0,670	0,634	0,615	0,640	0,942	0,936	0,864	0,914
168	0,533	0,544	0,546	0,541	0,682	0,647	0,633	0,654	0,956	0,945	0,872	0,924
175	0,546	0,557	0,556	0,553	0,707	0,669	0,653	0,676	0,982	0,973	0,897	0,951
182	0,565	0,578	0,579	0,574	0,710	0,668	0,657	0,679	0,989	0,979	0,903	0,957

Tabela 26: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GN, moagem La.

Idade de ensaio	Série 2											
	GN La 057				GN La 047				GN La 037			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,004	0,002	0,003	0,003	0,003	0,000	0,003	0,002	0,015	0,025	0,028	0,022
4	0,008	0,005	0,004	0,005	0,009	0,014	0,006	0,010	0,028	0,036	0,037	0,034
7	0,011	0,034	0,030	0,025	0,051	0,039	0,036	0,042	0,048	0,083	0,082	0,071
9	0,067	0,054	0,050	0,057	0,063	0,054	0,048	0,055	0,080	0,116	0,114	0,103
14	0,087	0,095	0,094	0,092	0,129	0,129	0,122	0,127	0,172	0,211	0,206	0,196
16	0,085	0,109	0,101	0,099	0,138	0,142	0,132	0,137	0,224	0,243	0,238	0,235
21	0,142	0,164	0,143	0,150	0,198	0,203	0,197	0,199	0,276	0,315	0,306	0,299
23	0,148	0,171	0,170	0,163	0,208	0,214	0,216	0,213	0,309	0,348	0,339	0,332
28	0,248	0,220	0,220	0,229	0,244	0,252	0,246	0,247	0,351	0,392	0,385	0,376
35	0,243	0,258	0,262	0,254	0,273	0,292	0,284	0,283	0,411	0,454	0,444	0,436
42	0,268	0,285	0,294	0,282	0,323	0,338	0,341	0,334	0,430	0,461	0,454	0,448
49	0,303	0,304	0,304	0,304	0,366	0,375	0,366	0,369	0,478	0,518	0,507	0,501
56	0,333	0,351	0,335	0,340	0,364	0,385	0,380	0,376	0,511	0,557	0,548	0,539
63	0,331	0,357	0,358	0,349	0,404	0,412	0,398	0,405	0,547	0,600	0,590	0,579
70	0,358	0,379	0,366	0,367	0,430	0,446	0,427	0,435	0,570	0,616	0,608	0,598
77	0,389	0,410	0,397	0,399	0,448	0,472	0,457	0,459	0,604	0,651	0,644	0,633
84	0,407	0,429	0,417	0,418	0,455	0,480	0,461	0,465	0,646	0,691	0,674	0,670
91	0,423	0,437	0,422	0,427	0,480	0,508	0,488	0,492	0,671	0,714	0,703	0,696
98	0,443	0,460	0,447	0,450	0,509	0,539	0,514	0,521	0,726	0,730	0,723	0,726
105	0,470	0,483	0,470	0,474	0,525	0,561	0,537	0,541	0,727	0,768	0,767	0,754
112	0,479	0,489	0,477	0,482	0,518	0,550	0,615	0,561	0,761	0,806	0,806	0,791
119	0,490	0,498	0,523	0,504	0,560	0,597	0,573	0,576	0,771	0,815	0,807	0,798
126	0,527	0,528	0,519	0,525	0,587	0,624	0,601	0,604	0,797	0,833	0,828	0,819
133	0,545	0,557	0,548	0,550	0,594	0,630	0,607	0,610	0,804	0,852	0,849	0,835
140	0,554	0,562	0,552	0,556	0,606	0,646	0,620	0,624	0,833	0,878	0,873	0,861
147	0,568	0,571	0,560	0,566	0,615	0,656	0,631	0,634	0,870	0,907	0,907	0,895
154	0,581	0,577	0,569	0,576	0,632	0,678	0,652	0,654	0,888	0,923	0,926	0,912
161	0,597	0,601	0,594	0,597	0,663	0,711	0,685	0,686	0,910	0,955	0,946	0,937
168	0,628	0,634	0,627	0,630	0,682	0,726	0,699	0,703	0,923	0,964	0,955	0,947
175	0,642	0,646	0,638	0,642	0,703	0,753	0,720	0,725	0,947	0,989	0,981	0,972
182	0,664	0,669	0,660	0,664	0,703	0,750	0,724	0,726	0,953	0,997	0,991	0,980

Tabela 27: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GN, moagem Ro.

Idade de ensaio	Série 2											
	GN Ro 057				GN Ro 047				GN Ro 037			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,011	0,022	0,014	0,016
4	0,006	0,012	0,007	0,008	0,012	0,009	0,024	0,015	0,054	0,058	0,043	0,052
7	0,026	0,058	0,027	0,037	0,034	0,032	0,032	0,033	0,076	0,094	0,079	0,083
9	0,045	0,060	0,043	0,049	0,042	0,044	0,038	0,041	0,115	0,128	0,109	0,117
14	0,072	0,110	0,071	0,084	0,091	0,092	0,098	0,093	0,142	0,198	0,162	0,167
16	0,077	0,122	0,076	0,092	0,097	0,097	0,096	0,096	0,201	0,239	0,181	0,207
21	0,122	0,145	0,123	0,130	0,141	0,142	0,147	0,144	0,269	0,281	0,215	0,255
23	0,124	0,153	0,123	0,133	0,152	0,168	0,157	0,159	0,252	0,295	0,236	0,261
28	0,162	0,186	0,160	0,169	0,179	0,186	0,179	0,181	0,265	0,288	0,269	0,274
35	0,189	0,213	0,186	0,196	0,208	0,217	0,208	0,211	0,306	0,310	0,300	0,305
42	0,206	0,237	0,206	0,216	0,246	0,259	0,247	0,250	0,365	0,381	0,308	0,351
49	0,240	0,261	0,236	0,246	0,274	0,280	0,274	0,276	0,387	0,355	0,341	0,361
56	0,260	0,270	0,260	0,263	0,293	0,307	0,313	0,304	0,398	0,382	0,368	0,383
63	0,255	0,291	0,267	0,271	0,310	0,307	0,307	0,308	0,422	0,413	0,400	0,412
70	0,288	0,316	0,288	0,297	0,336	0,331	0,330	0,332	0,449	0,421	0,403	0,424
77	0,305	0,319	0,308	0,310	0,354	0,357	0,353	0,355	0,460	0,451	0,430	0,447
84	0,326	0,334	0,322	0,327	0,355	0,355	0,356	0,355	0,469	0,487	0,465	0,474
91	0,326	0,351	0,324	0,334	0,381	0,379	0,379	0,379	0,501	0,502	0,480	0,494
98	0,344	0,368	0,342	0,351	0,407	0,405	0,402	0,405	0,527	0,514	0,492	0,511
105	0,364	0,368	0,366	0,366	0,412	0,414	0,412	0,412	0,530	0,552	0,526	0,536
112	0,372	0,400	0,369	0,380	0,423	0,423	0,420	0,422	0,546	0,580	0,552	0,559
119	0,376	0,423	0,374	0,391	0,454	0,454	0,450	0,453	0,556	0,592	0,566	0,571
126	0,404	0,425	0,402	0,411	0,478	0,481	0,475	0,478	0,569	0,612	0,586	0,589
133	0,432	0,433	0,427	0,430	0,482	0,482	0,479	0,481	0,599	0,624	0,595	0,606
140	0,431	0,439	0,429	0,433	0,494	0,491	0,494	0,493	0,610	0,647	0,619	0,625
147	0,436	0,452	0,439	0,442	0,500	0,504	0,499	0,501	0,622	0,683	0,653	0,653
154	0,445	0,486	0,444	0,458	0,519	0,523	0,517	0,520	0,621	0,697	0,668	0,662
161	0,459	0,490	0,461	0,470	0,547	0,552	0,545	0,548	0,645	0,717	0,687	0,683
168	0,493	0,498	0,495	0,496	0,562	0,569	0,558	0,563	0,650	0,723	0,691	0,688
175	0,501	0,509	0,503	0,505	0,582	0,587	0,579	0,582	0,666	0,754	0,720	0,713
182	0,524	0,529	0,525	0,526	0,581	0,587	0,577	0,582	0,686	0,758	0,727	0,724

Tabela 28: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GP, moagem Ma.

Idade de ensaio	Série 2											
	GP Ma 057				GP Ma 047				GP Ma 037			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,016	0,012	0,000	0,009	0,013	0,014	0,013	0,013	0,063	0,068	0,071	0,067
4	0,026	0,011	0,011	0,016	0,018	0,022	0,022	0,021	0,088	0,084	0,078	0,083
7	0,032	0,030	0,046	0,036	0,037	0,042	0,041	0,040	0,120	0,114	0,109	0,114
9	0,054	0,044	0,057	0,052	0,066	0,072	0,071	0,070	0,149	0,144	0,138	0,144
14	0,085	0,087	0,101	0,091	0,104	0,111	0,112	0,109	0,176	0,173	0,192	0,180
16	0,098	0,093	0,107	0,099	0,125	0,127	0,132	0,128	0,185	0,181	0,202	0,190
21	0,125	0,111	0,121	0,119	0,164	0,145	0,149	0,153	0,205	0,204	0,221	0,210
23	0,145	0,113	0,123	0,127	0,165	0,160	0,165	0,164	0,192	0,192	0,196	0,194
28	0,161	0,132	0,143	0,146	0,186	0,181	0,187	0,185	0,227	0,202	0,206	0,212
35	0,176	0,149	0,157	0,161	0,198	0,198	0,212	0,203	0,232	0,235	0,227	0,231
42	0,187	0,160	0,173	0,173	0,202	0,200	0,212	0,205	0,252	0,250	0,247	0,250
49	0,202	0,169	0,184	0,185	0,205	0,199	0,210	0,204	0,262	0,263	0,253	0,259
56	0,216	0,187	0,197	0,200	0,233	0,242	0,254	0,243	0,254	0,274	0,249	0,259
63	0,243	0,197	0,208	0,216	0,257	0,267	0,273	0,266	0,266	0,280	0,263	0,269
70	0,227	0,211	0,220	0,220	0,272	0,287	0,301	0,287	0,286	0,301	0,283	0,290
77	0,251	0,202	0,213	0,222	0,278	0,287	0,311	0,292	0,280	0,289	0,279	0,283
84	0,261	0,215	0,225	0,234	0,292	0,309	0,317	0,306	0,288	0,300	0,284	0,291
91	0,262	0,233	0,252	0,249	0,308	0,322	0,326	0,319	0,306	0,328	0,307	0,314
98	0,269	0,232	0,241	0,248	0,312	0,328	0,329	0,323	0,325	0,333	0,324	0,328
105	0,252	0,236	0,246	0,245	0,331	0,351	0,357	0,346	0,321	0,325	0,318	0,321
112	0,279	0,249	0,271	0,266	0,346	0,366	0,374	0,362	0,327	0,330	0,327	0,328
119	0,295	0,279	0,289	0,288	0,350	0,367	0,375	0,364	0,330	0,336	0,330	0,332
126	0,338	0,281	0,292	0,303	0,351	0,377	0,385	0,371	0,344	0,351	0,344	0,346
133	0,318	0,284	0,299	0,300	0,358	0,380	0,389	0,376	0,367	0,371	0,366	0,368
140	0,334	0,292	0,296	0,307	0,376	0,396	0,401	0,391	0,370	0,378	0,373	0,374
147	0,336	0,304	0,315	0,318	0,384	0,409	0,418	0,404	0,377	0,382	0,379	0,379
154	0,342	0,326	0,341	0,336	0,404	0,435	0,443	0,427	0,371	0,376	0,372	0,373
161	0,352	0,342	0,350	0,348	0,413	0,445	0,455	0,438	0,392	0,398	0,392	0,394
168	0,380	0,357	0,365	0,367	0,430	0,455	0,464	0,449	0,385	0,394	0,387	0,389
175	0,383	0,356	0,365	0,368	0,445	0,469	0,479	0,464	0,397	0,403	0,397	0,399
182	0,408	0,371	0,381	0,387	0,444	0,474	0,485	0,468	0,411	0,418	0,413	0,414

Tabela 29: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GP, moagem La.

Idade de ensaio	Série 2											
	GP La 057				GP La 047				GP La 037			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,005	0,005	0,042	0,017	0,014	0,011	0,011	0,012	0,015	0,018	0,028	0,020
4	0,008	0,007	0,047	0,020	0,026	0,047	0,027	0,033	0,088	0,089	0,099	0,092
7	0,037	0,033	0,074	0,048	0,053	0,063	0,056	0,057	0,128	0,132	0,152	0,137
9	0,051	0,049	0,090	0,063	0,084	0,093	0,088	0,088	0,181	0,175	0,196	0,184
14	0,089	0,088	0,130	0,103	0,134	0,146	0,145	0,141	0,217	0,203	0,231	0,217
16	0,091	0,085	0,143	0,106	0,141	0,161	0,145	0,149	0,268	0,275	0,286	0,276
21	0,124	0,121	0,171	0,138	0,179	0,192	0,183	0,185	0,286	0,296	0,303	0,295
23	0,139	0,130	0,184	0,151	0,193	0,204	0,196	0,197	0,297	0,314	0,331	0,314
28	0,159	0,147	0,202	0,169	0,213	0,238	0,217	0,223	0,308	0,327	0,345	0,327
35	0,174	0,163	0,215	0,184	0,226	0,245	0,239	0,236	0,316	0,342	0,355	0,338
42	0,190	0,177	0,236	0,201	0,253	0,275	0,269	0,266	0,321	0,359	0,369	0,350
49	0,208	0,231	0,250	0,230	0,272	0,281	0,269	0,274	0,332	0,351	0,359	0,347
56	0,229	0,245	0,270	0,248	0,282	0,307	0,298	0,296	0,361	0,349	0,356	0,355
63	0,240	0,251	0,275	0,255	0,305	0,329	0,322	0,319	0,398	0,370	0,378	0,382
70	0,247	0,236	0,284	0,256	0,322	0,350	0,348	0,340	0,401	0,371	0,379	0,384
77	0,272	0,257	0,316	0,282	0,326	0,354	0,360	0,347	0,417	0,397	0,413	0,409
84	0,284	0,265	0,333	0,294	0,338	0,376	0,353	0,356	0,435	0,420	0,430	0,428
91	0,284	0,264	0,328	0,292	0,362	0,390	0,384	0,379	0,441	0,421	0,452	0,438
98	0,292	0,263	0,327	0,294	0,351	0,455	0,375	0,394	0,465	0,449	0,461	0,458
105	0,320	0,294	0,370	0,328	0,374	0,435	0,398	0,402	0,486	0,470	0,481	0,479
112	0,304	0,277	0,344	0,308	0,396	0,428	0,423	0,416	0,489	0,471	0,488	0,483
119	0,320	0,296	0,358	0,325	0,397	0,429	0,422	0,416	0,503	0,486	0,500	0,497
126	0,350	0,320	0,397	0,356	0,411	0,445	0,438	0,431	0,509	0,492	0,504	0,502
133	0,349	0,319	0,383	0,350	0,420	0,449	0,442	0,437	0,528	0,510	0,524	0,521
140	0,361	0,330	0,391	0,361	0,422	0,446	0,449	0,439	0,541	0,523	0,538	0,534
147	0,361	0,330	0,400	0,364	0,422	0,468	0,455	0,448	0,572	0,552	0,567	0,564
154	0,372	0,339	0,408	0,373	0,455	0,498	0,493	0,482	0,584	0,565	0,581	0,576
161	0,380	0,346	0,417	0,381	0,458	0,509	0,500	0,489	0,591	0,573	0,588	0,584
168	0,409	0,378	0,444	0,410	0,475	0,520	0,517	0,504	0,610	0,589	0,607	0,602
175	0,406	0,380	0,446	0,411	0,489	0,537	0,531	0,519	0,618	0,599	0,616	0,611
182	0,435	0,403	0,473	0,437	0,494	0,548	0,537	0,526	0,623	0,608	0,627	0,619

Tabela 30: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado GP, moagem Ro.

Idade de ensaio	Série 2											
	GP Ro 057				GP Ro 047				GP Ro 037			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,012	0,005	0,006	0,008	0,010	0,003	0,012	0,008	0,074	0,087	0,077	0,079
4	0,016	0,012	0,014	0,014	0,035	0,021	0,044	0,033	0,095	0,113	0,095	0,101
7	0,043	0,018	0,017	0,026	0,049	0,036	0,051	0,045	0,131	0,128	0,110	0,123
9	0,058	0,029	0,024	0,037	0,075	0,066	0,077	0,073	0,173	0,158	0,140	0,157
14	0,087	0,030	0,026	0,048	0,099	0,106	0,120	0,108	0,197	0,193	0,179	0,190
16	0,084	0,036	0,029	0,050	0,116	0,112	0,125	0,117	0,198	0,208	0,191	0,199
21	0,116	0,045	0,033	0,065	0,143	0,139	0,155	0,146	0,228	0,238	0,262	0,243
23	0,161	0,056	0,045	0,087	0,167	0,155	0,174	0,165	0,237	0,225	0,237	0,233
28	0,158	0,070	0,059	0,096	0,184	0,173	0,194	0,184	0,243	0,232	0,243	0,239
35	0,183	0,087	0,076	0,116	0,209	0,194	0,215	0,206	0,255	0,274	0,249	0,259
42	0,188	0,099	0,089	0,126	0,234	0,218	0,246	0,233	0,288	0,297	0,277	0,287
49	0,202	0,113	0,103	0,140	0,212	0,243	0,253	0,236	0,290	0,315	0,290	0,298
56	0,225	0,135	0,127	0,163	0,256	0,247	0,276	0,260	0,298	0,314	0,285	0,299
63	0,229	0,156	0,130	0,172	0,293	0,269	0,298	0,287	0,318	0,379	0,303	0,333
70	0,238	0,146	0,141	0,175	0,306	0,288	0,320	0,305	0,336	0,354	0,325	0,339
77	0,279	0,169	0,162	0,203	0,300	0,283	0,311	0,298	0,324	0,354	0,355	0,344
84	0,273	0,180	0,173	0,208	0,315	0,296	0,332	0,314	0,328	0,360	0,360	0,349
91	0,271	0,178	0,171	0,207	0,345	0,305	0,335	0,328	0,347	0,387	0,382	0,372
98	0,276	0,185	0,178	0,213	0,337	0,315	0,354	0,335	0,361	0,403	0,393	0,386
105	0,304	0,212	0,204	0,240	0,353	0,334	0,378	0,355	0,378	0,403	0,395	0,392
112	0,287	0,193	0,182	0,220	0,367	0,357	0,396	0,373	0,390	0,410	0,404	0,401
119	0,304	0,210	0,208	0,240	0,380	0,357	0,402	0,380	0,389	0,420	0,410	0,406
126	0,328	0,252	0,227	0,269	0,394	0,370	0,415	0,393	0,392	0,432	0,422	0,415
133	0,328	0,233	0,226	0,262	0,404	0,379	0,419	0,400	0,414	0,459	0,442	0,438
140	0,337	0,243	0,237	0,272	0,411	0,383	0,428	0,407	0,420	0,467	0,450	0,446
147	0,336	0,238	0,239	0,271	0,423	0,393	0,445	0,420	0,427	0,476	0,455	0,453
154	0,347	0,252	0,247	0,282	0,453	0,426	0,474	0,451	0,431	0,482	0,458	0,457
161	0,360	0,258	0,256	0,291	0,464	0,434	0,485	0,461	0,444	0,491	0,471	0,469
168	0,388	0,287	0,283	0,319	0,475	0,446	0,496	0,472	0,439	0,486	0,466	0,464
175	0,393	0,291	0,288	0,324	0,489	0,461	0,513	0,488	0,450	0,499	0,478	0,476
182	0,414	0,311	0,306	0,344	0,498	0,469	0,519	0,495	0,466	0,518	0,495	0,493

Tabela 31: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado BR, moagem Ma.

Idade de ensaio	Série 2											
	BR Ma 057				BR Ma 047				BR Ma 037			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,021	0,027	0,020	0,023	0,025	0,021	0,023	0,023	0,077	0,073	0,076	0,075
4	0,167	0,100	0,076	0,114	0,088	0,073	0,077	0,079	0,101	0,100	0,100	0,100
7	0,175	0,202	0,179	0,185	0,219	0,229	0,212	0,220	0,182	0,185	0,181	0,183
9	0,178	0,223	0,179	0,193	0,242	0,253	0,232	0,242	0,188	0,193	0,190	0,190
14	0,194	0,233	0,239	0,222	0,257	0,269	0,246	0,258	0,212	0,224	0,223	0,220
16	0,204	0,238	0,247	0,230	0,272	0,283	0,260	0,271	0,215	0,220	0,217	0,217
21	0,204	0,228	0,249	0,227	0,272	0,283	0,261	0,272	0,218	0,228	0,221	0,222
23	0,195	0,234	0,237	0,222	0,278	0,289	0,272	0,280	0,229	0,234	0,230	0,231
28	0,205	0,237	0,246	0,229	0,270	0,287	0,267	0,275	0,222	0,228	0,223	0,224
35	0,204	0,243	0,247	0,231	0,276	0,288	0,266	0,277	0,234	0,240	0,257	0,244
42	0,207	0,222	0,249	0,226	0,272	0,280	0,266	0,273	0,242	0,242	0,246	0,243
49	0,221	0,221	0,265	0,236	0,287	0,276	0,257	0,273	0,239	0,245	0,242	0,242
56	0,234	0,248	0,263	0,248	0,289	0,285	0,261	0,279	0,245	0,253	0,248	0,249
63	0,223	0,262	0,263	0,250	0,290	0,299	0,281	0,290	0,249	0,259	0,252	0,253
70	0,233	0,265	0,238	0,245	0,302	0,322	0,281	0,302	0,241	0,250	0,248	0,246
77	0,233	0,237	0,238	0,236	0,305	0,315	0,294	0,304	0,240	0,250	0,251	0,247
84	0,217	0,257	0,222	0,232	0,304	0,310	0,288	0,301	0,245	0,254	0,249	0,249
91	0,218	0,256	0,222	0,232	0,299	0,309	0,289	0,299	0,241	0,248	0,245	0,245
98	0,233	0,237	0,234	0,235	0,300	0,309	0,290	0,300	0,238	0,245	0,240	0,241
105	0,209	0,257	0,214	0,227	0,301	0,309	0,291	0,300	0,248	0,253	0,247	0,249
112	0,219	0,261	0,225	0,235	0,301	0,310	0,293	0,301	0,237	0,245	0,241	0,241
119	0,229	0,234	0,236	0,233	0,281	0,313	0,293	0,296	0,236	0,248	0,242	0,242
126	0,220	0,252	0,225	0,232	0,283	0,311	0,284	0,293	0,239	0,249	0,245	0,244
133	0,223	0,247	0,226	0,232	0,293	0,301	0,283	0,292	0,239	0,245	0,243	0,242
140	0,222	0,254	0,226	0,234	0,287	0,296	0,280	0,288	0,242	0,252	0,242	0,245
147	0,218	0,257	0,224	0,233	0,296	0,306	0,289	0,297	0,254	0,266	0,259	0,260
154	0,224	0,270	0,228	0,241	0,299	0,308	0,291	0,299	0,259	0,270	0,263	0,264
161	0,238	0,275	0,242	0,252	0,311	0,322	0,304	0,313	0,262	0,273	0,267	0,267
168	0,240	0,275	0,247	0,254	0,314	0,327	0,310	0,317	0,270	0,282	0,274	0,276
175	0,249	0,286	0,251	0,262	0,315	0,325	0,309	0,316	0,270	0,281	0,275	0,275
182	0,252	0,284	0,257	0,264	0,325	0,337	0,320	0,328	0,271	0,282	0,275	0,276

Tabela 32: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado BR, moagem La.

Idade de ensaio	Série 2											
	BR La 057				BR La 047				BR La 037			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,025	0,025	0,021	0,023	0,024	0,020	0,024	0,023	0,023	0,027	0,023	0,024
4	0,086	0,086	0,161	0,111	0,074	0,073	0,083	0,077	0,081	0,083	0,080	0,081
7	0,204	0,204	0,200	0,203	0,230	0,226	0,239	0,231	0,213	0,200	0,210	0,208
9	0,206	0,206	0,223	0,212	0,254	0,248	0,263	0,255	0,263	0,271	0,265	0,266
14	0,227	0,227	0,243	0,232	0,271	0,263	0,277	0,270	0,272	0,281	0,278	0,277
16	0,238	0,238	0,252	0,242	0,284	0,277	0,293	0,284	0,281	0,286	0,284	0,284
21	0,238	0,238	0,254	0,243	0,287	0,278	0,292	0,286	0,288	0,299	0,296	0,294
23	0,231	0,231	0,256	0,239	0,291	0,282	0,296	0,290	0,291	0,300	0,298	0,296
28	0,239	0,302	0,255	0,265	0,284	0,275	0,302	0,287	0,302	0,309	0,301	0,304
35	0,237	0,302	0,255	0,265	0,284	0,286	0,302	0,291	0,311	0,323	0,319	0,318
42	0,237	0,305	0,257	0,266	0,286	0,289	0,304	0,293	0,315	0,341	0,333	0,330
49	0,250	0,315	0,270	0,278	0,294	0,271	0,297	0,287	0,322	0,330	0,327	0,326
56	0,280	0,322	0,279	0,294	0,295	0,278	0,302	0,292	0,323	0,331	0,332	0,329
63	0,254	0,320	0,274	0,283	0,304	0,293	0,311	0,303	0,322	0,335	0,333	0,330
70	0,266	0,332	0,285	0,294	0,320	0,304	0,322	0,315	0,317	0,379	0,316	0,337
77	0,268	0,332	0,285	0,295	0,320	0,308	0,323	0,317	0,319	0,378	0,315	0,337
84	0,252	0,318	0,274	0,281	0,316	0,301	0,320	0,312	0,331	0,339	0,331	0,334
91	0,251	0,314	0,270	0,278	0,312	0,303	0,319	0,311	0,330	0,324	0,330	0,328
98	0,265	0,330	0,288	0,294	0,311	0,300	0,319	0,310	0,323	0,324	0,324	0,324
105	0,240	0,305	0,262	0,269	0,313	0,299	0,318	0,310	0,324	0,325	0,320	0,323
112	0,252	0,311	0,273	0,278	0,315	0,302	0,320	0,312	0,328	0,328	0,319	0,325
119	0,265	0,329	0,283	0,292	0,316	0,301	0,321	0,312	0,324	0,328	0,323	0,325
126	0,249	0,315	0,279	0,281	0,310	0,298	0,322	0,310	0,330	0,331	0,326	0,329
133	0,251	0,319	0,278	0,283	0,310	0,315	0,319	0,315	0,321	0,326	0,324	0,324
140	0,255	0,315	0,279	0,283	0,309	0,328	0,312	0,316	0,329	0,332	0,327	0,329
147	0,253	0,318	0,279	0,283	0,310	0,333	0,315	0,320	0,344	0,346	0,341	0,344
154	0,258	0,323	0,279	0,287	0,311	0,325	0,313	0,316	0,348	0,351	0,345	0,348
161	0,279	0,343	0,300	0,307	0,329	0,315	0,330	0,325	0,350	0,352	0,346	0,349
168	0,281	0,347	0,304	0,311	0,332	0,320	0,334	0,329	0,360	0,374	0,354	0,362
175	0,290	0,358	0,314	0,321	0,329	0,318	0,335	0,327	0,359	0,360	0,356	0,358
182	0,292	0,364	0,322	0,326	0,337	0,327	0,343	0,336	0,357	0,360	0,355	0,357

Tabela 33: resumo dos resultados de expansão da Série 2, agregado BR, moagem Ro.

Idade de ensaio	Série 2											
	BR Ro 057				BR Ro 047				BR Ro 037			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,027	0,033	0,050	0,036	0,013	0,020	0,027	0,020	0,077	0,067	0,069	0,071
4	0,098	0,104	0,104	0,102	0,064	0,071	0,082	0,072	0,109	0,101	0,107	0,106
7	0,214	0,226	0,224	0,221	0,228	0,243	0,243	0,238	0,246	0,201	0,206	0,218
9	0,214	0,226	0,224	0,221	0,253	0,268	0,271	0,264	0,346	0,230	0,234	0,270
14	0,233	0,249	0,261	0,248	0,313	0,292	0,286	0,297	0,346	0,240	0,245	0,277
16	0,243	0,256	0,267	0,255	0,283	0,300	0,301	0,295	0,352	0,251	0,252	0,285
21	0,246	0,261	0,271	0,259	0,282	0,309	0,302	0,298	0,350	0,257	0,257	0,288
23	0,236	0,258	0,262	0,252	0,288	0,311	0,308	0,302	0,351	0,255	0,254	0,287
28	0,244	0,261	0,253	0,253	0,280	0,300	0,297	0,292	0,353	0,248	0,253	0,285
35	0,244	0,261	0,254	0,253	0,293	0,305	0,309	0,302	0,354	0,248	0,252	0,285
42	0,246	0,260	0,254	0,253	0,298	0,304	0,313	0,305	0,355	0,241	0,254	0,283
49	0,257	0,259	0,265	0,260	0,296	0,299	0,311	0,302	0,353	0,269	0,272	0,298
56	0,270	0,292	0,269	0,277	0,297	0,298	0,312	0,302	0,352	0,280	0,278	0,304
63	0,256	0,268	0,274	0,266	0,301	0,322	0,320	0,315	0,351	0,281	0,277	0,303
70	0,271	0,279	0,278	0,276	0,311	0,320	0,326	0,319	0,351	0,282	0,276	0,303
77	0,271	0,280	0,283	0,278	0,311	0,315	0,332	0,319	0,354	0,280	0,278	0,304
84	0,253	0,263	0,263	0,260	0,306	0,314	0,329	0,316	0,353	0,282	0,283	0,306
91	0,256	0,264	0,262	0,261	0,304	0,319	0,327	0,317	0,354	0,280	0,281	0,305
98	0,272	0,277	0,279	0,276	0,306	0,324	0,329	0,320	0,365	0,280	0,280	0,308
105	0,247	0,256	0,257	0,253	0,305	0,328	0,329	0,321	0,358	0,282	0,280	0,307
112	0,259	0,267	0,262	0,263	0,308	0,331	0,329	0,322	0,345	0,272	0,270	0,296
119	0,270	0,280	0,278	0,276	0,308	0,328	0,333	0,323	0,346	0,273	0,271	0,297
126	0,259	0,270	0,271	0,267	0,300	0,326	0,322	0,316	0,349	0,275	0,272	0,299
133	0,262	0,271	0,273	0,269	0,298	0,321	0,321	0,313	0,349	0,270	0,271	0,297
140	0,261	0,348	0,275	0,295	0,302	0,321	0,323	0,315	0,353	0,276	0,274	0,301
147	0,258	0,263	0,271	0,264	0,304	0,327	0,328	0,319	0,371	0,289	0,292	0,318
154	0,262	0,271	0,274	0,269	0,304	0,328	0,329	0,320	0,371	0,292	0,296	0,320
161	0,279	0,289	0,292	0,287	0,315	0,339	0,337	0,331	0,373	0,297	0,298	0,323
168	0,285	0,298	0,300	0,294	0,324	0,348	0,344	0,338	0,372	0,305	0,307	0,328
175	0,290	0,302	0,305	0,299	0,323	0,349	0,346	0,339	0,374	0,306	0,308	0,329
182	0,298	0,309	0,311	0,306	0,334	0,359	0,357	0,350	0,374	0,305	0,308	0,329

São apresentados, inicialmente, gráficos individuais para cada rocha e cada relação a/c, nos quais são exibidas apenas as leituras até 28 dias de idade. Na seqüência, tem-se um gráfico que delinea o comportamento da rocha, para todas as relações a/c estudadas, até a última leitura (182 dias).

Da Figura 72 até a Figura 75 são apresentados os resultados da rocha GN.

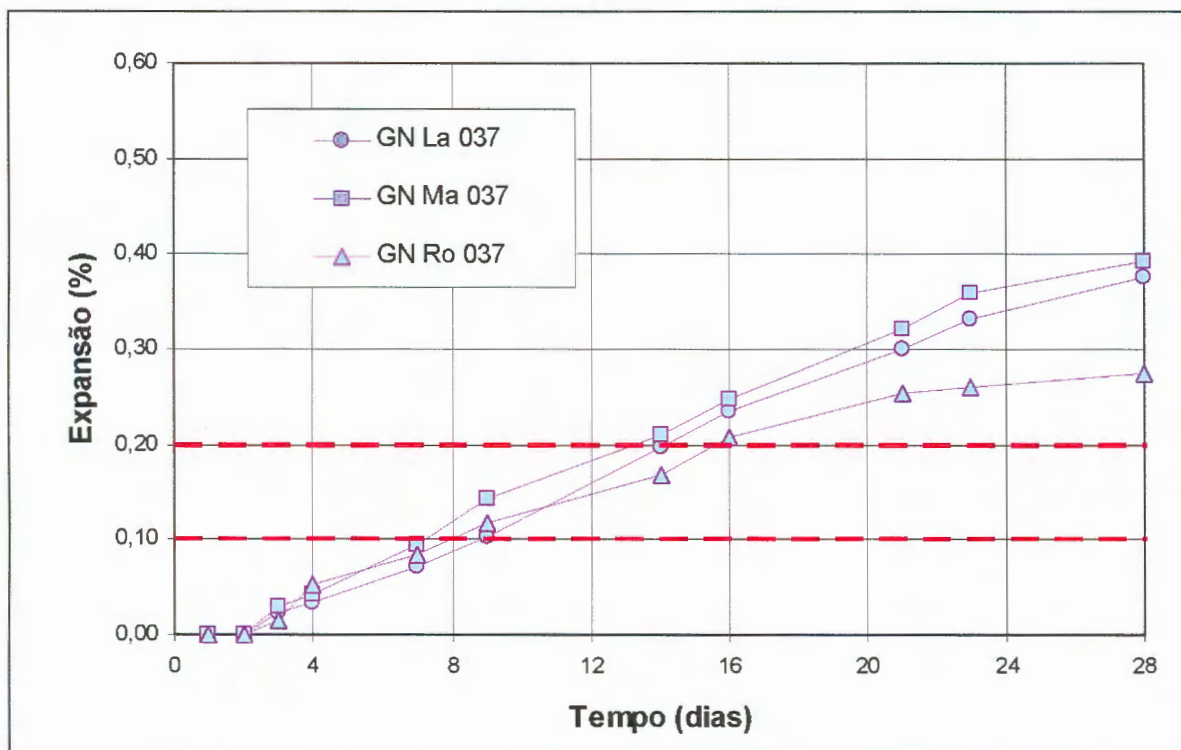


Figura 72: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,37, três moagens (S2).

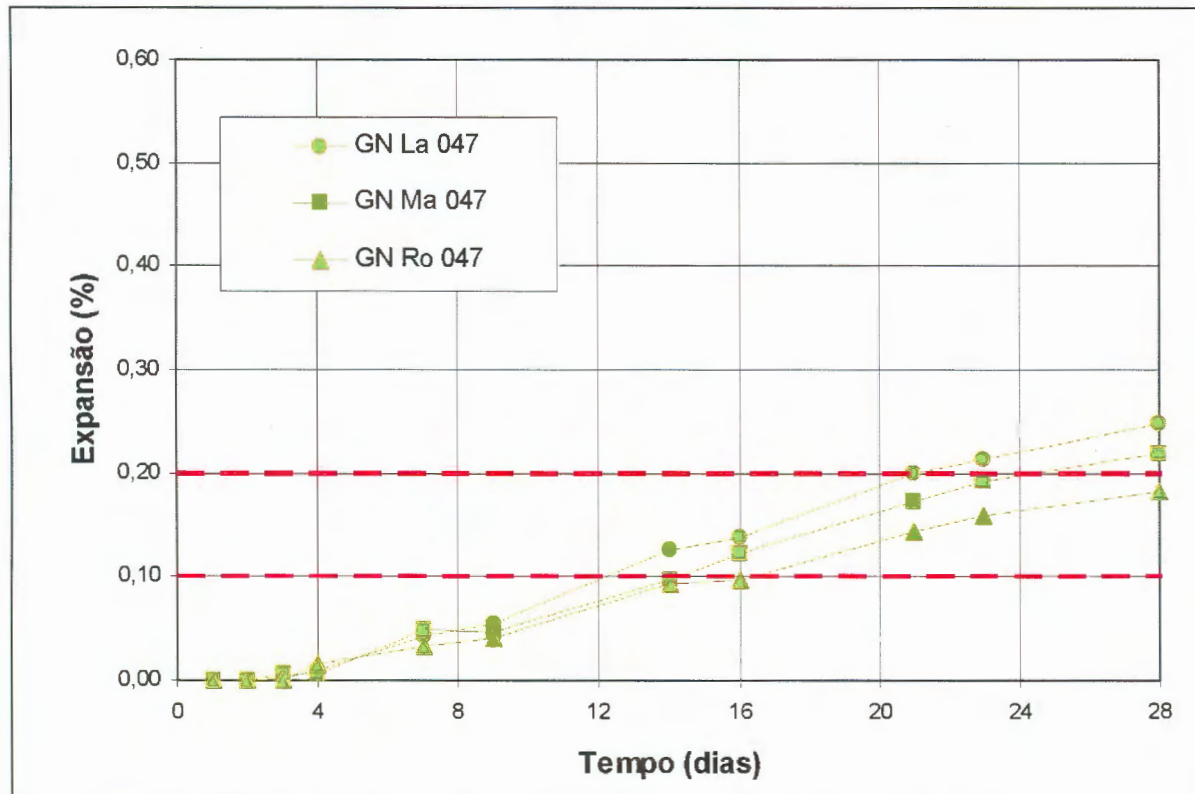


Figura 73: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,47, três moagens (S2).

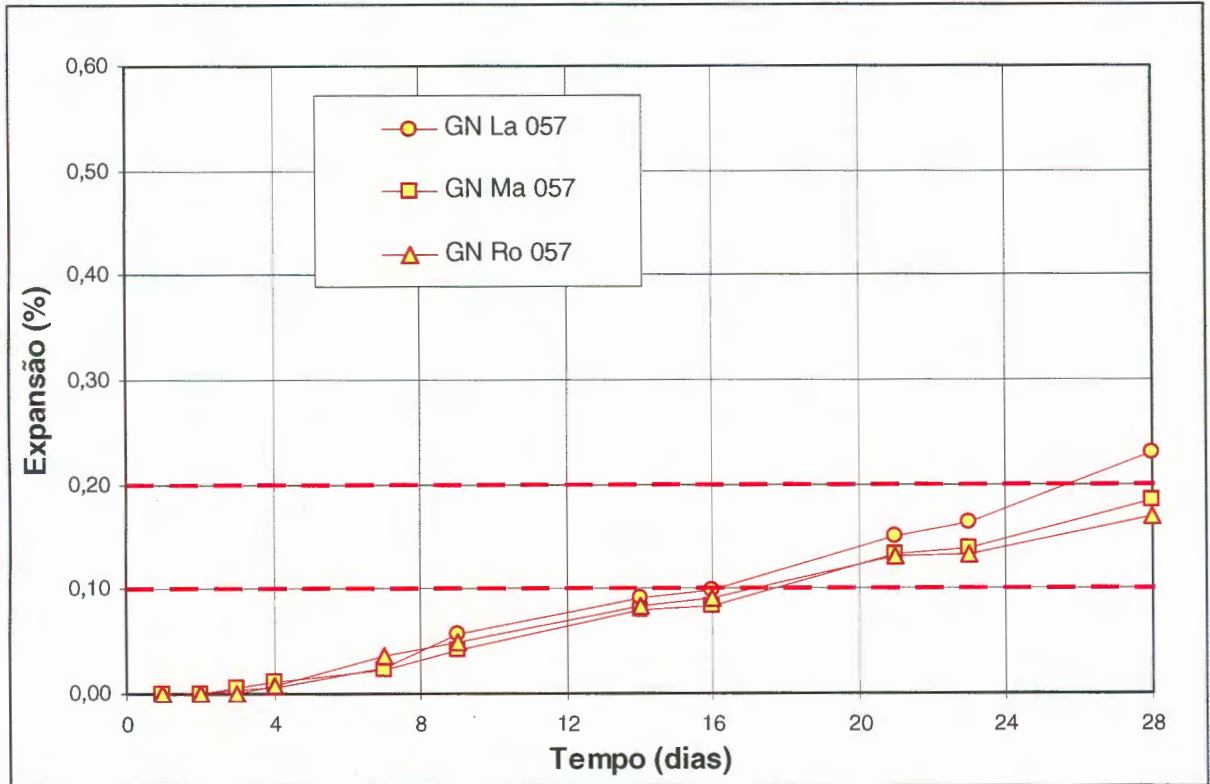


Figura 74: expansões até 28 dias da rocha GN, relação a/c 0,57, três moagens (S2).

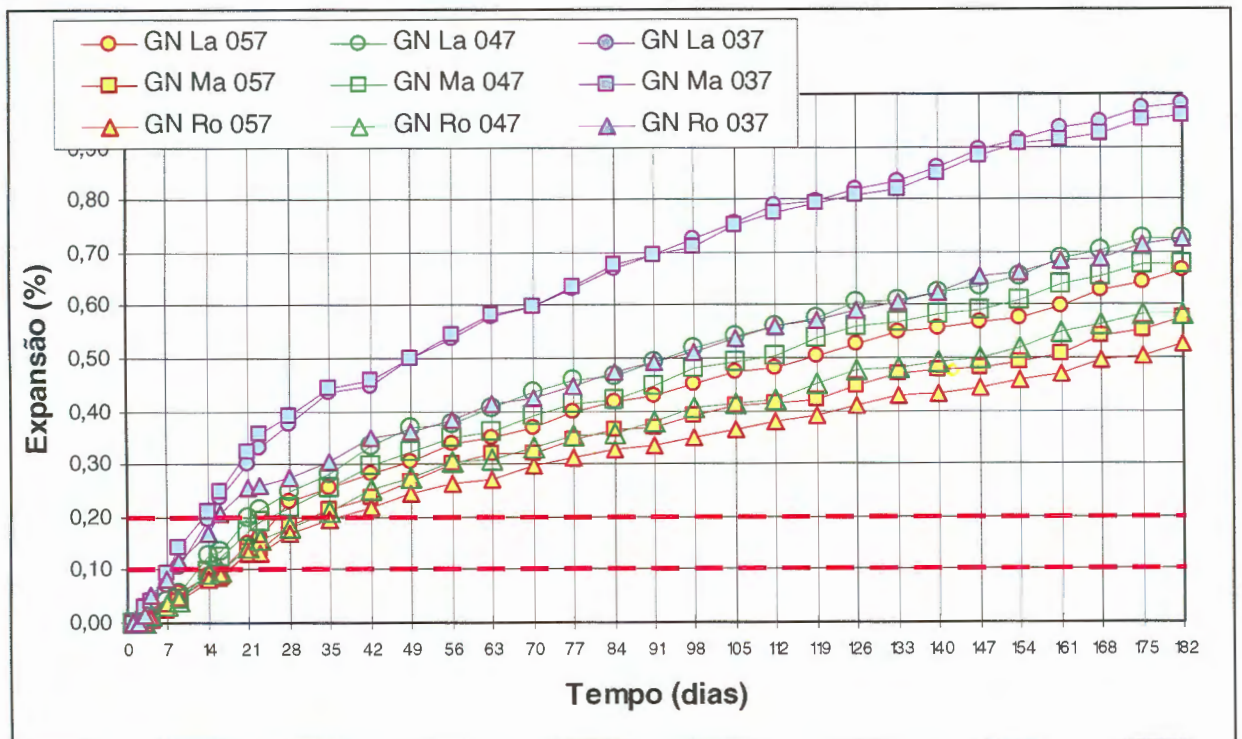


Figura 75: expansões até 182 dias, da rocha GN, três relações a/c e três moagens (S2).

Dos gráficos que apresentam comportamento até 28 dias, observa-se que as curvas de expansão estão mais próximas uma da outra, no caso das três relações a/c. Ou seja, a influência da moagem é menos significativa nesta Série 2, onde a consistência foi fixada por meio de aditivo. Provavelmente isto se deu porque a dificuldade de moldagem em função da forma dos grãos foi compensada pela fluidez conferida pelo aditivo.

Outro fator a ser observado é o comportamento aos 16 dias com a variação na relação a/c: com relação a/c 0,37 o agregado é considerado reativo (Figura 72), com relação a/c 0,47 é potencialmente reativo (Figura 73), e com a/c 0,57 é inócuo (Figura 74).

Ao longo dos 182 dias, o mesmo comportamento é notado: maiores expansões para a relação a/c 0,37, seguida pela a/c 0,47 e então a a/c 0,57.

Quanto à forma do grão, o comportamento da rocha GN é o mesmo da Série 1: maiores expansões para o agregado moído em equipamento de Abrasão Los Angeles, depois moído em moinho de Mandíbulas e por fim os britados com o moinho de Rolos.

Linhas de tendência polinomiais podem ser ajustadas com $R^2 > 0,99$. Da Figura 76 até a Figura 79 estão os resultados da amostra GP.

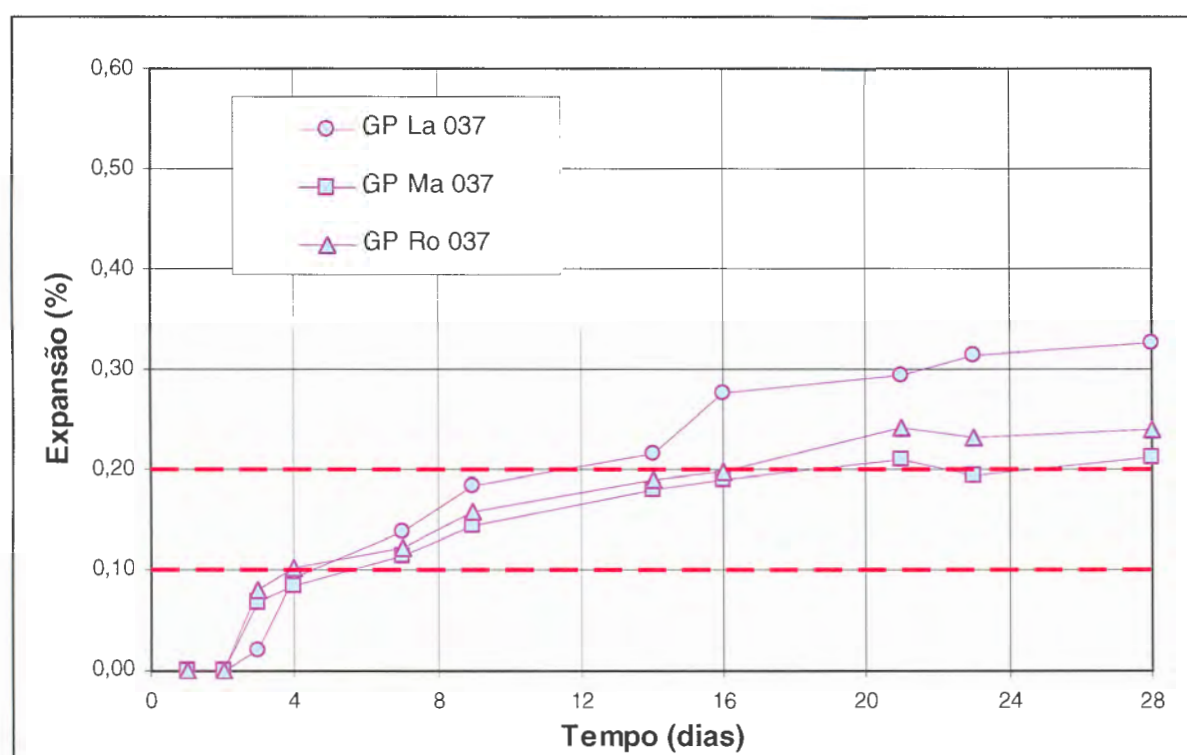


Figura 76: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,37, três moagens (S2).

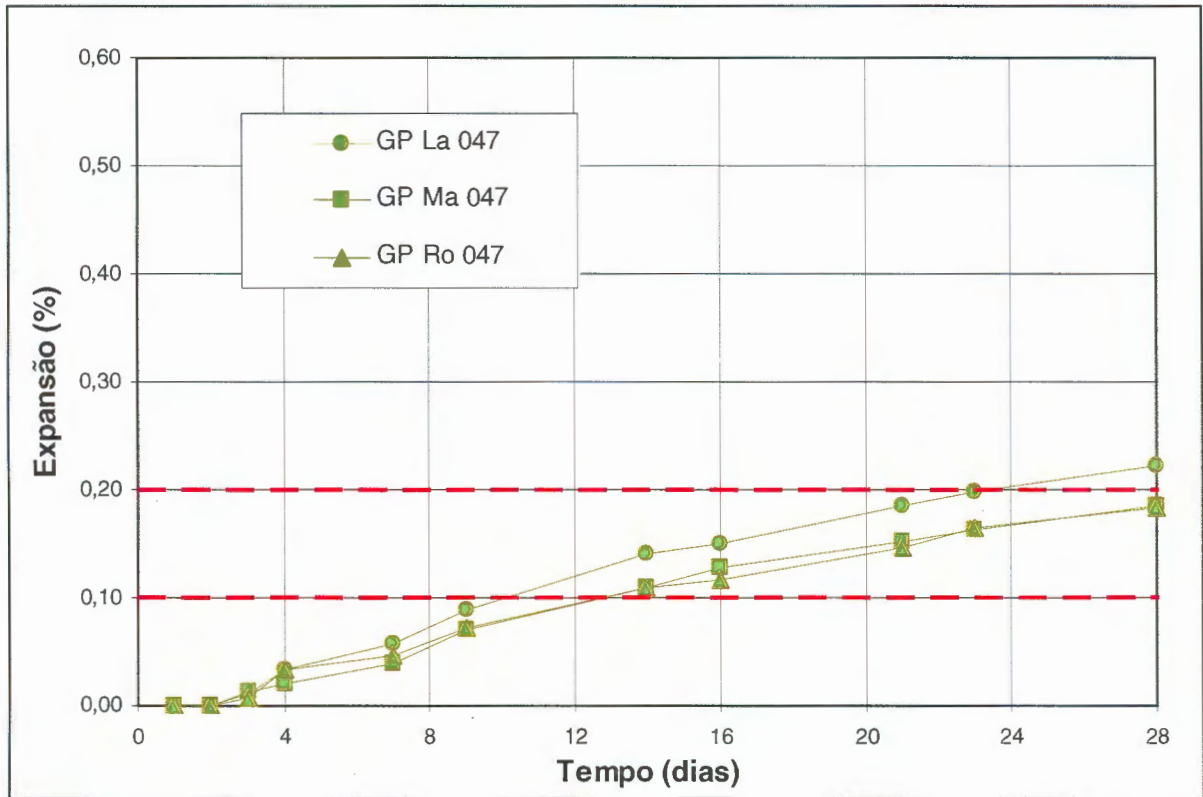


Figura 77: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,47, três moagens (S2).

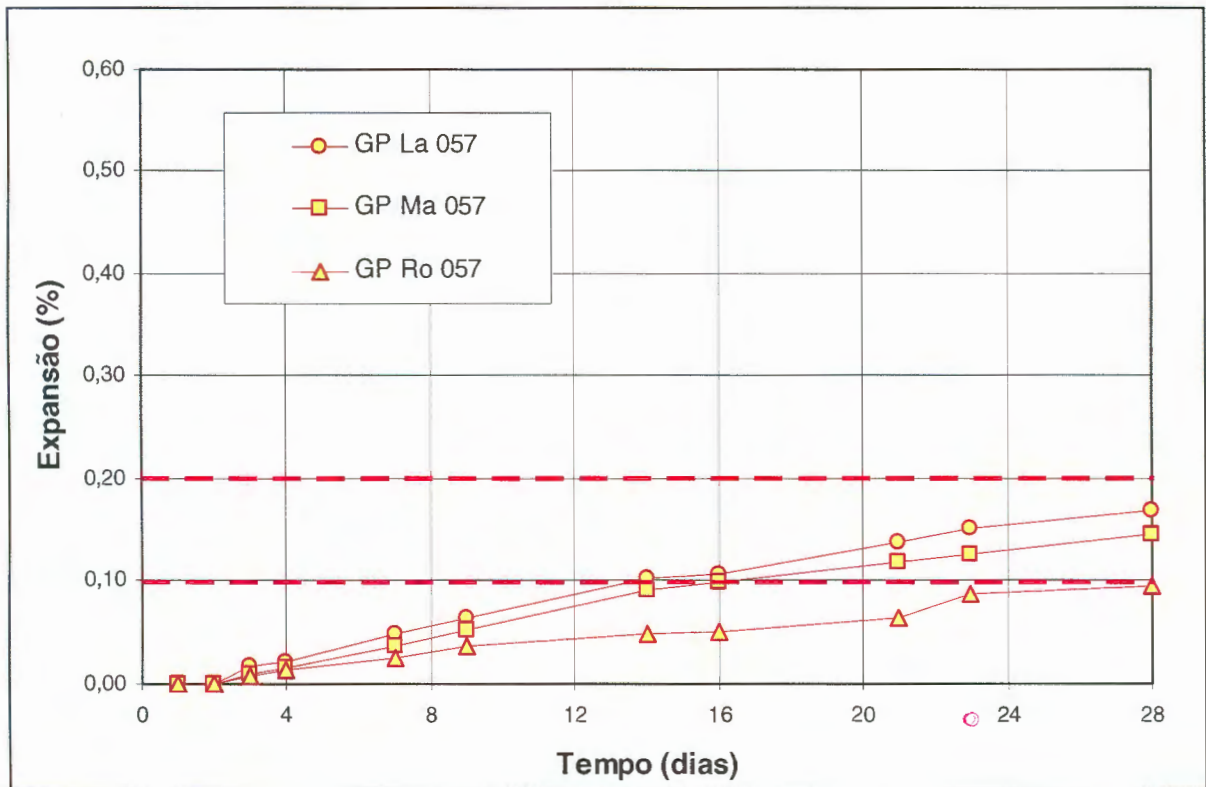


Figura 78: expansões até 28 dias da rocha GP, relação a/c 0,57, três moagens (S2).

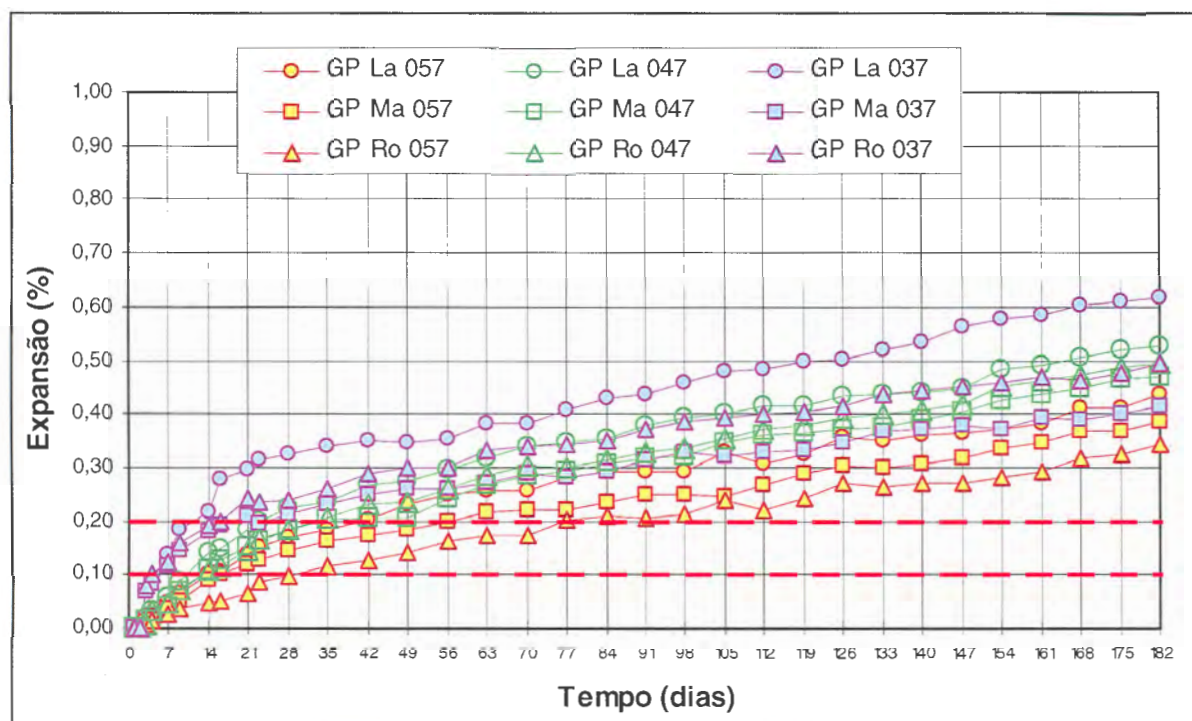


Figura 79: expansões até 182 dias, da rocha GP, três relações a/c e três moagens (S2).

Para a rocha GP, resultam as mesmas tendências que para a rocha GN: maiores expansões para a amostra moída em Los Angeles e também para a relação a/c 0,37. Também podem ser observadas diferentes classificações da rocha se analisadas aos 16 dias.

Linhas de tendência polinomiais podem ser ajustadas com $R^2 > 0,97$.

Da Figura 80 até a Figura 83 encontram-se os resultados da amostra BR.

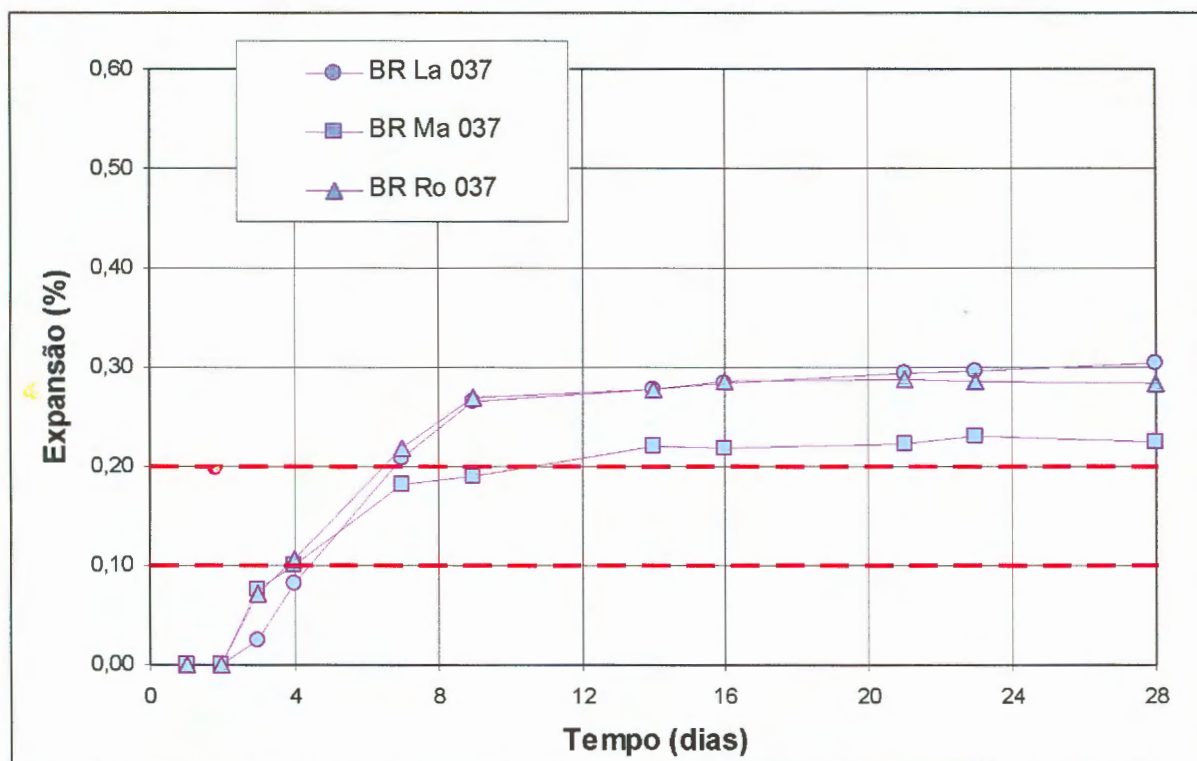


Figura 80: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,37, três moagens (S2).

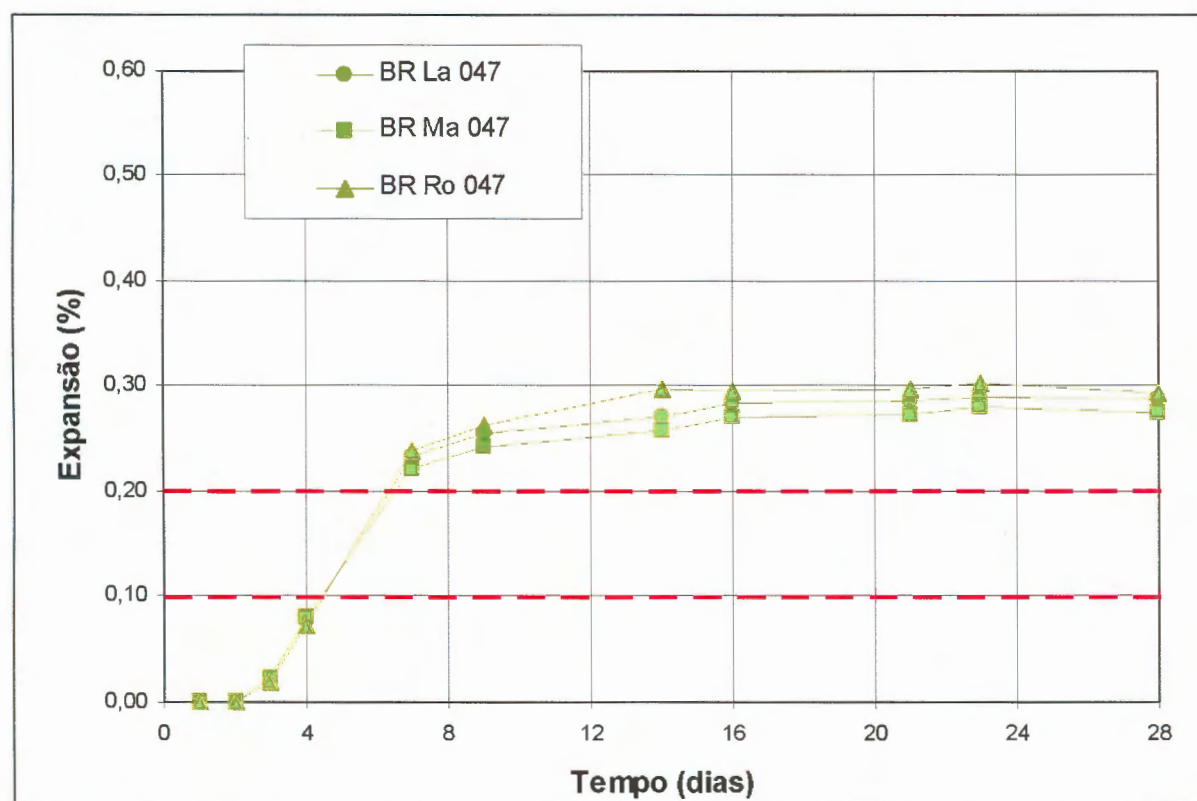


Figura 81: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,47, três moagens (S2).

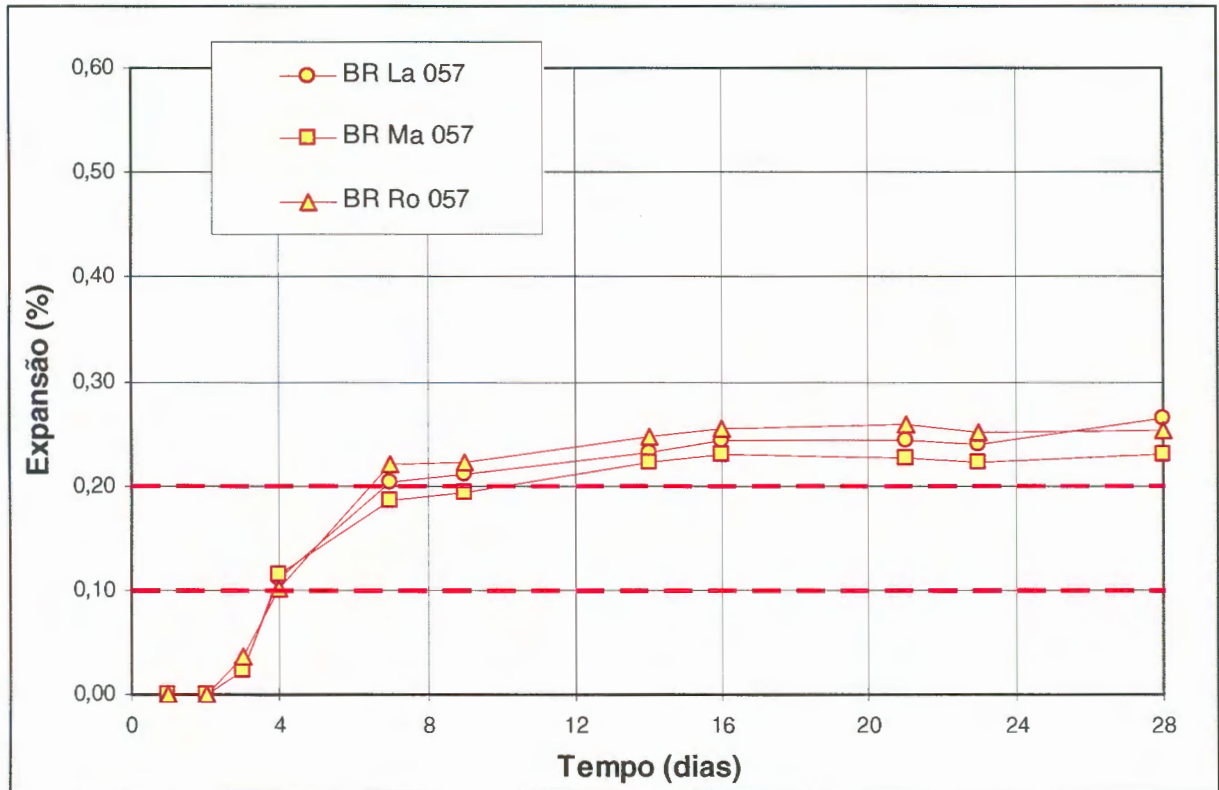


Figura 82: expansões até 28 dias da rocha BR, relação a/c 0,57, três moagens (S2).

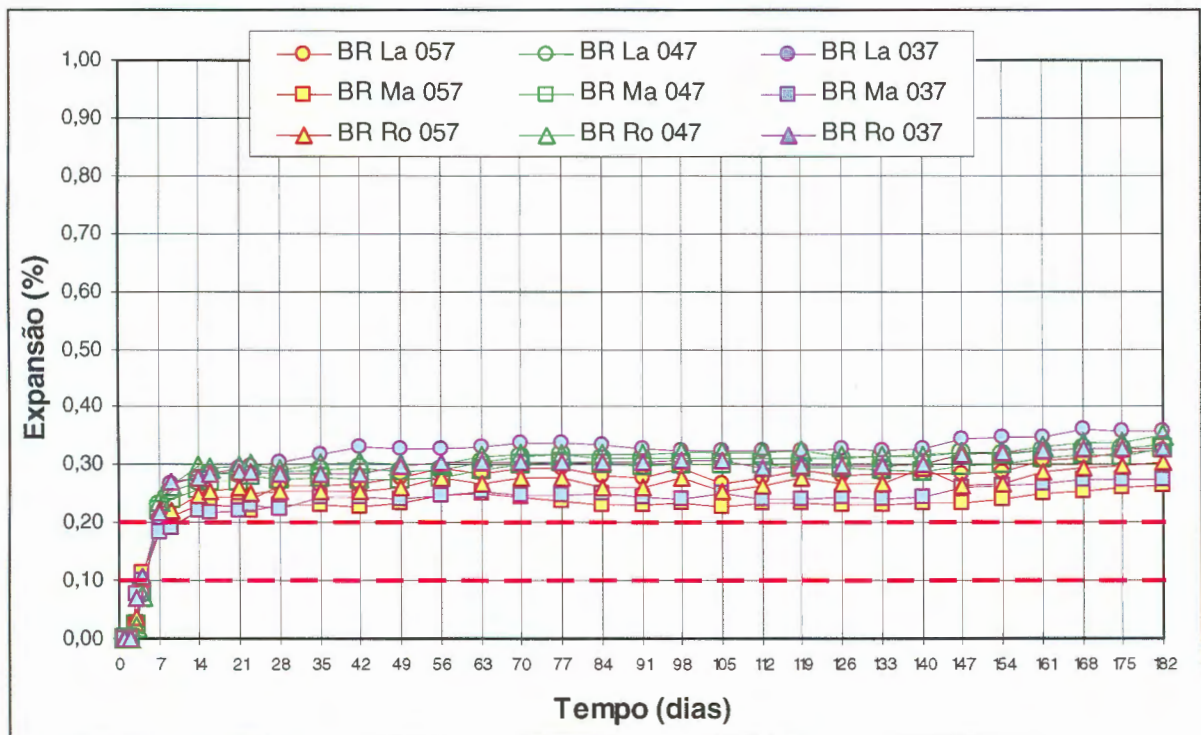


Figura 83: expansões até 182 dias, da rocha BR, três relações a/c e três moagens (S2).

Para a amostra BR, observa-se que as curvas e expansão são bastante próximas, e que a classificação da rocha como reativa se daria já aos 16 dias, independentemente da relação a/c.

Embora as expansões sejam altas nos primeiros dias (até 8 dias de idade), elas praticamente se estabilizam a partir dos 16 dias, sendo observado pouco crescimento até os 182 dias. Retas polinomiais podem ser ajustadas com $R^2 > 0,92$ para estas curvas de expansão.

4.4.3 Série 3

Na série 3 têm-se três rochas, cada uma foi britada de três formas diferentes, e para todas as moldagens utilizou-se a mesma consistência. Deste modo, têm-se 9 ensaios de expansão para a S3. Nas tabelas a seguir (Tabela 34 à Tabela 36) estão apresentados, para cada ensaio, os resultados individuais das três barras utilizadas no ensaio, e em seguida a média destes três resultados.

Tabela 34: resumo dos resultados de expansão da Série 3, agregado GN, três moagens.

Idade de ensaio	Série 3											
	GN Ma				GN La				GN Ro			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,004	0,008	0,004	0,005	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003	0,001	0,000	0,001
4	0,026	0,026	0,027	0,026	0,024	0,022	0,032	0,026	0,025	0,023	0,018	0,022
7	0,059	0,053	0,056	0,056	0,058	0,056	0,054	0,056	0,047	0,047	0,045	0,046
9	0,069	0,071	0,072	0,071	0,081	0,075	0,074	0,076	0,063	0,060	0,064	0,062
14	0,120	0,121	0,123	0,121	0,146	0,152	0,135	0,145	0,107	0,107	0,103	0,106
16	0,150	0,150	0,155	0,152	0,183	0,187	0,170	0,180	0,135	0,135	0,136	0,136
21	0,185	0,188	0,193	0,189	0,233	0,234	0,295	0,254	0,168	0,168	0,162	0,166
23	0,203	0,204	0,211	0,206	0,276	0,252	0,281	0,270	0,180	0,179	0,183	0,181
28	0,237	0,237	0,264	0,246	0,293	0,294	0,306	0,298	0,211	0,211	0,205	0,209
35	0,238	0,241	0,273	0,251	0,300	0,299	0,311	0,303	0,211	0,231	0,205	0,216
42	0,290	0,283	0,297	0,290	0,357	0,357	0,341	0,352	0,260	0,257	0,253	0,257
49	0,324	0,321	0,333	0,326	0,397	0,399	0,377	0,391	0,286	0,290	0,283	0,286
56	0,357	0,359	0,371	0,362	0,438	0,435	0,415	0,429	0,321	0,322	0,321	0,321
63	0,367	0,366	0,378	0,370	0,449	0,452	0,430	0,444	0,324	0,324	0,324	0,324
70	0,400	0,398	0,411	0,403	0,493	0,497	0,462	0,484	0,350	0,354	0,347	0,350
77	0,434	0,431	0,446	0,437	0,530	0,529	0,515	0,524	0,380	0,380	0,384	0,381
84	0,449	0,446	0,458	0,451	0,558	0,551	0,536	0,548	0,391	0,394	0,390	0,391
91	0,465	0,460	0,473	0,466	0,567	0,567	0,542	0,559	0,402	0,409	0,401	0,404
98	0,503	0,500	0,518	0,507	0,624	0,608	0,580	0,604	0,438	0,447	0,443	0,443
105	0,531	0,527	0,544	0,534	0,633	0,643	0,608	0,628	0,466	0,480	0,465	0,470
112	0,542	0,537	0,552	0,543	0,655	0,656	0,618	0,643	0,470	0,480	0,473	0,474
119	0,550	0,554	0,572	0,559	0,677	0,675	0,636	0,663	0,484	0,498	0,483	0,488
126	0,567	0,565	0,586	0,573	0,689	0,697	0,654	0,680	0,489	0,507	0,498	0,498
133	0,591	0,586	0,609	0,595	0,713	0,715	0,680	0,703	0,515	0,531	0,516	0,521
140	0,613	0,618	0,621	0,617	0,748	0,757	0,715	0,740	0,548	0,561	0,547	0,552
147	0,637	0,628	0,645	0,637	0,764	0,766	0,729	0,753	0,550	0,574	0,562	0,562
154	0,652	0,646	0,672	0,657	0,779	0,790	0,749	0,773	0,573	0,587	0,575	0,579
161	0,654	0,647	0,675	0,659	0,788	0,795	0,752	0,778	0,576	0,589	0,580	0,582
168	0,685	0,676	0,704	0,688	0,817	0,822	0,782	0,807	0,600	0,615	0,604	0,606
175	0,691	0,680	0,708	0,693	0,824	0,829	0,792	0,815	0,598	0,618	0,604	0,606
182	0,710	0,701	0,724	0,712	0,838	0,853	0,816	0,836	0,621	0,639	0,626	0,628

Tabela 35: resumo dos resultados de expansão da Série 3, agregado GP, três moagens.

Idade de ensaio	Série 3											
	GP Ma				GP La				GP Ro			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,011	0,013	0,008	0,011	0,015	0,025	0,017	0,019	0,014	0,011	0,013	0,013
4	0,022	0,022	0,017	0,020	0,024	0,022	0,028	0,025	0,023	0,020	0,030	0,024
7	0,041	0,037	0,033	0,037	0,043	0,057	0,048	0,049	0,043	0,021	0,046	0,037
9	0,057	0,057	0,049	0,054	0,063	0,091	0,070	0,075	0,062	0,091	0,058	0,070
14	0,098	0,090	0,085	0,091	0,122	0,154	0,124	0,133	0,107	0,131	0,100	0,113
16	0,109	0,113	0,104	0,109	0,150	0,148	0,148	0,148	0,128	0,138	0,118	0,128
21	0,126	0,124	0,116	0,122	0,170	0,158	0,172	0,167	0,145	0,152	0,136	0,144
23	0,132	0,126	0,118	0,125	0,181	0,163	0,179	0,174	0,147	0,166	0,138	0,150
28	0,158	0,153	0,145	0,152	0,219	0,195	0,214	0,209	0,180	0,169	0,169	0,173
35	0,163	0,160	0,148	0,157	0,222	0,200	0,216	0,213	0,192	0,167	0,170	0,177
42	0,188	0,180	0,176	0,181	0,253	0,224	0,254	0,244	0,214	0,177	0,202	0,198
49	0,206	0,202	0,191	0,200	0,279	0,230	0,278	0,262	0,237	0,199	0,225	0,220
56	0,230	0,221	0,212	0,221	0,311	0,240	0,307	0,286	0,259	0,226	0,242	0,243
63	0,221	0,211	0,205	0,212	0,310	0,242	0,306	0,286	0,258	0,227	0,245	0,243
70	0,238	0,227	0,220	0,229	0,330	0,257	0,330	0,306	0,274	0,240	0,262	0,259
77	0,265	0,254	0,243	0,254	0,360	0,290	0,358	0,336	0,307	0,263	0,288	0,286
84	0,256	0,243	0,237	0,245	0,360	0,291	0,362	0,338	0,303	0,313	0,285	0,301
91	0,281	0,266	0,256	0,268	0,387	0,311	0,380	0,359	0,326	0,290	0,309	0,308
98	0,299	0,290	0,279	0,289	0,412	0,334	0,403	0,383	0,350	0,313	0,332	0,332
105	0,299	0,284	0,275	0,286	0,419	0,334	0,404	0,386	0,349	0,312	0,330	0,330
112	0,320	0,301	0,291	0,304	0,437	0,358	0,429	0,408	0,371	0,323	0,350	0,348
119	0,325	0,306	0,299	0,310	0,447	0,363	0,435	0,415	0,376	0,338	0,363	0,359
126	0,321	0,304	0,302	0,309	0,453	0,371	0,441	0,422	0,376	0,344	0,363	0,361
133	0,342	0,326	0,317	0,328	0,474	0,386	0,459	0,440	0,398	0,363	0,380	0,380
140	0,370	0,353	0,344	0,356	0,507	0,420	0,493	0,473	0,408	0,394	0,411	0,405
147	0,378	0,362	0,354	0,364	0,512	0,429	0,502	0,481	0,431	0,402	0,417	0,417
154	0,387	0,370	0,362	0,373	0,529	0,443	0,514	0,495	0,448	0,417	0,431	0,432
161	0,401	0,381	0,373	0,385	0,542	0,455	0,529	0,509	0,465	0,430	0,448	0,447
168	0,406	0,388	0,382	0,392	0,552	0,466	0,536	0,518	0,469	0,437	0,452	0,453
175	0,417	0,394	0,386	0,399	0,560	0,471	0,543	0,525	0,477	0,444	0,458	0,460
182	0,430	0,411	0,403	0,415	0,574	0,489	0,565	0,543	0,496	0,463	0,478	0,479

Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado.

Tabela 36: resumo dos resultados de expansão da Série 3, agregado BR, três moagens.

Idade de ensaio	Série 3											
	BR Ma				BR La				BR Ro			
	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)	cp 1	cp 2	cp 3	Expansão média (%)
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,022	0,018	0,022	0,021	0,020	0,022	0,026	0,023	0,022	0,078	0,011	0,037
4	0,062	0,057	0,063	0,060	0,049	0,057	0,060	0,055	0,071	0,076	0,065	0,071
7	0,173	0,165	0,177	0,171	0,175	0,188	0,185	0,183	0,197	0,245	0,196	0,213
9	0,199	0,201	0,200	0,200	0,212	0,223	0,219	0,218	0,222	0,299	0,213	0,245
14	0,217	0,212	0,213	0,214	0,234	0,244	0,243	0,240	0,236	0,299	0,231	0,255
16	0,215	0,213	0,216	0,215	0,236	0,244	0,241	0,240	0,235	0,299	0,230	0,255
21	0,215	0,214	0,217	0,215	0,242	0,242	0,241	0,242	0,235	0,309	0,226	0,257
23	0,236	0,228	0,234	0,233	0,261	0,265	0,262	0,263	0,251	0,309	0,251	0,270
28	0,232	0,227	0,236	0,232	0,260	0,265	0,257	0,261	0,250	0,309	0,251	0,270
35	0,240	0,225	0,233	0,233	0,257	0,261	0,254	0,257	0,251	0,302	0,227	0,260
42	0,240	0,225	0,233	0,233	0,255	0,261	0,247	0,254	0,252	0,313	0,246	0,270
49	0,244	0,237	0,254	0,245	0,264	0,270	0,264	0,266	0,264	0,275	0,260	0,266
56	0,249	0,240	0,253	0,247	0,261	0,275	0,268	0,268	0,274	0,276	0,263	0,271
63	0,236	0,240	0,253	0,243	0,263	0,270	0,263	0,265	0,264	0,272	0,262	0,266
70	0,243	0,239	0,245	0,242	0,267	0,271	0,264	0,267	0,266	0,276	0,258	0,267
77	0,244	0,240	0,246	0,243	0,268	0,271	0,264	0,268	0,266	0,278	0,259	0,268
84	0,214	0,292	0,224	0,243	0,269	0,272	0,264	0,268	0,268	0,279	0,259	0,269
91	0,239	0,240	0,247	0,242	0,270	0,275	0,272	0,272	0,265	0,275	0,260	0,267
98	0,235	0,243	0,252	0,243	0,270	0,278	0,272	0,273	0,277	0,270	0,267	0,271
105	0,233	0,244	0,248	0,242	0,270	0,272	0,268	0,270	0,267	0,276	0,259	0,267
112	0,223	0,240	0,240	0,234	0,260	0,267	0,261	0,263	0,262	0,277	0,253	0,264
119	0,225	0,240	0,238	0,234	0,257	0,262	0,259	0,259	0,257	0,270	0,251	0,259
126	0,233	0,237	0,242	0,237	0,265	0,272	0,272	0,270	0,265	0,278	0,259	0,267
133	0,233	0,238	0,245	0,239	0,267	0,270	0,265	0,267	0,268	0,281	0,259	0,269
140	0,245	0,249	0,258	0,251	0,282	0,283	0,278	0,281	0,275	0,283	0,266	0,275
147	0,247	0,254	0,261	0,254	0,285	0,287	0,290	0,287	0,281	0,294	0,274	0,283
154	0,245	0,253	0,259	0,253	0,283	0,288	0,284	0,285	0,283	0,293	0,275	0,284
161	0,258	0,265	0,272	0,265	0,297	0,300	0,295	0,297	0,291	0,308	0,289	0,296
168	0,258	0,262	0,271	0,264	0,291	0,299	0,294	0,294	0,290	0,294	0,283	0,289
175	0,264	0,266	0,273	0,268	0,296	0,297	0,297	0,297	0,297	0,297	0,286	0,293
182	0,267	0,260	0,274	0,267	0,300	0,303	0,298	0,300	0,297	0,309	0,287	0,298

Na seqüência, são apresentados, inicialmente, gráficos individuais para cada rocha e cada relação a/c, nos quais são exibidas apenas as leituras até 28 dias de idade. Em seguida, tem-se um gráfico que delinea o comportamento da rocha, para todas as relações a/c estudadas, até a última leitura (182 dias).

Primeiramente são apresentados os resultados da rocha GN, após os resultados da amostra GP, e em seguida a amostra BR.

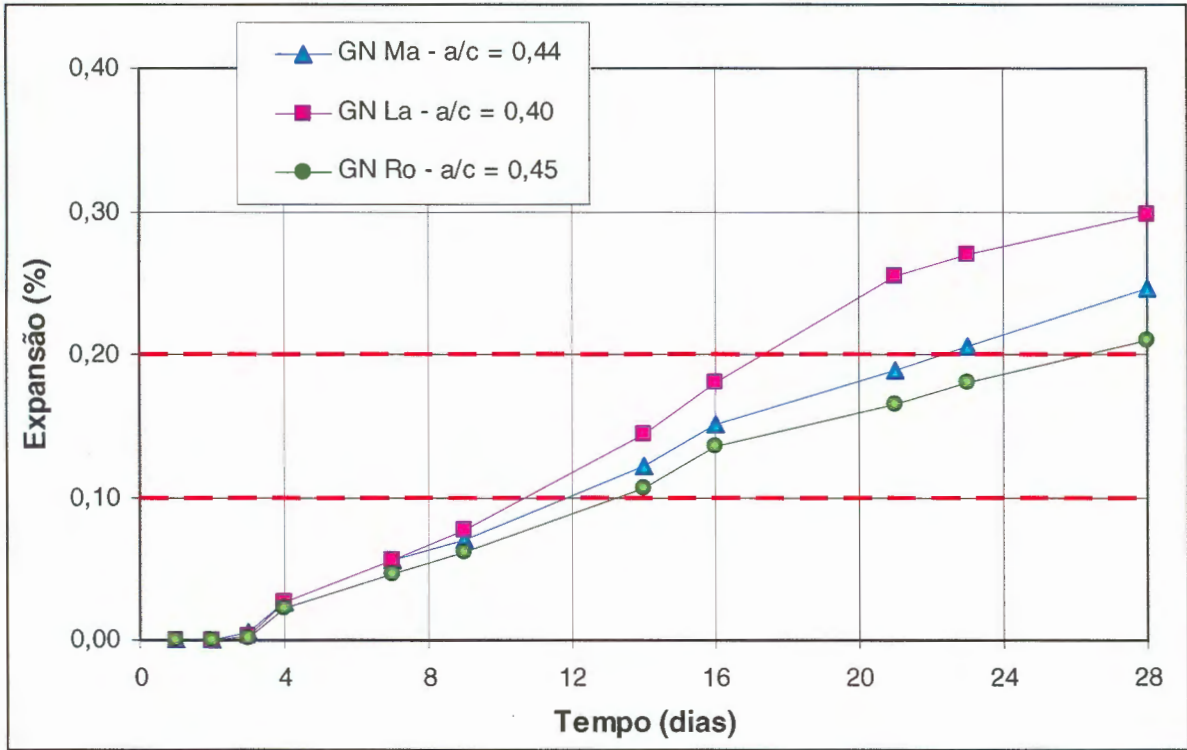


Figura 84: expansões até 28 dias da rocha GN, três moagens (S3).

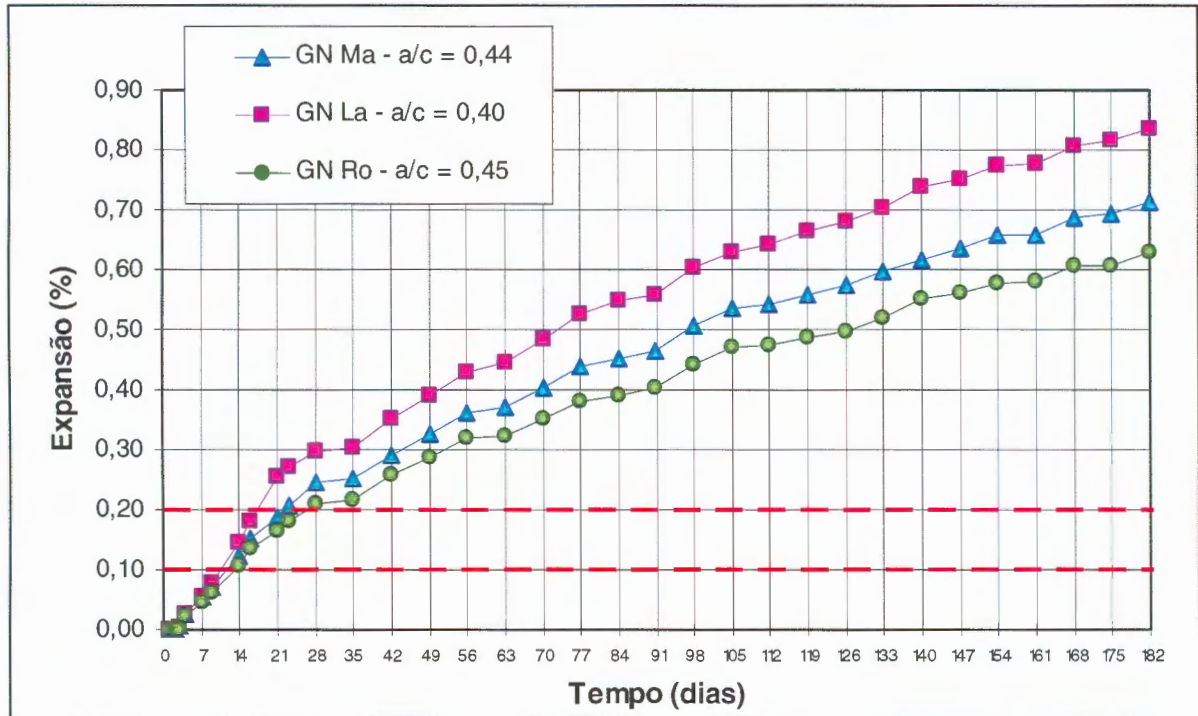


Figura 85: expansões até 182 dias, da rocha GN, três moagens (S3).

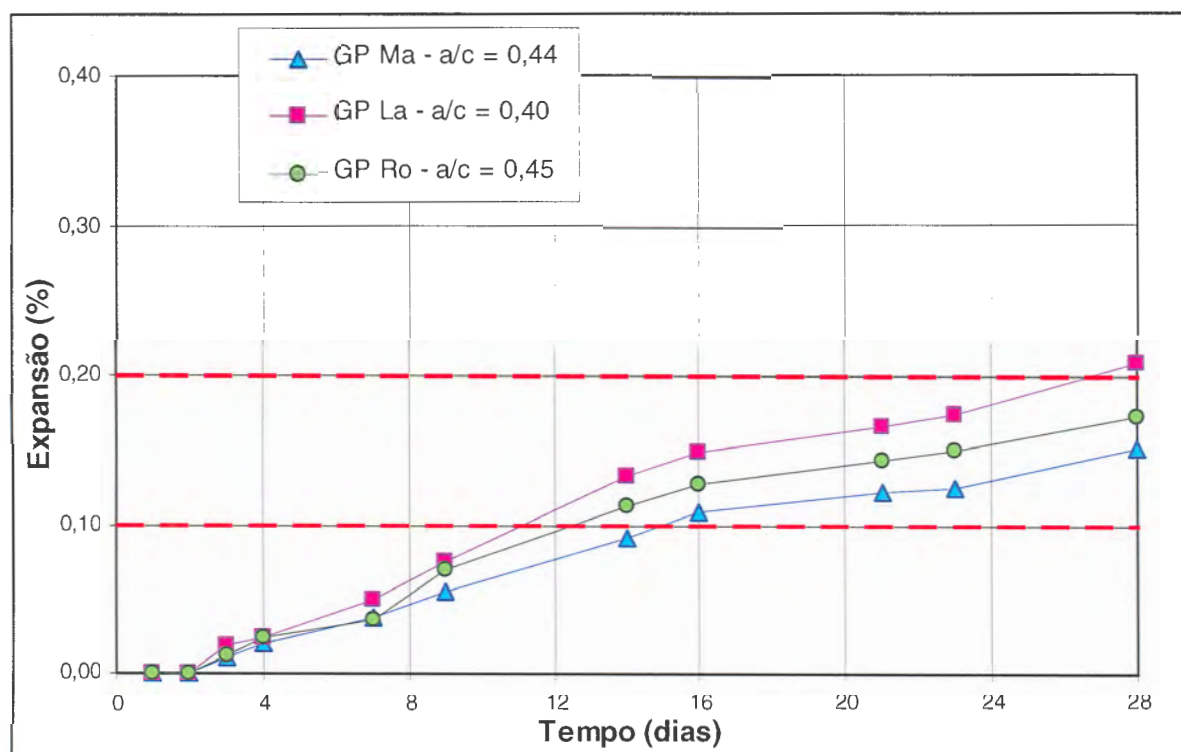


Figura 86: expansões até 28 dias da rocha GP, três moagens (S3).

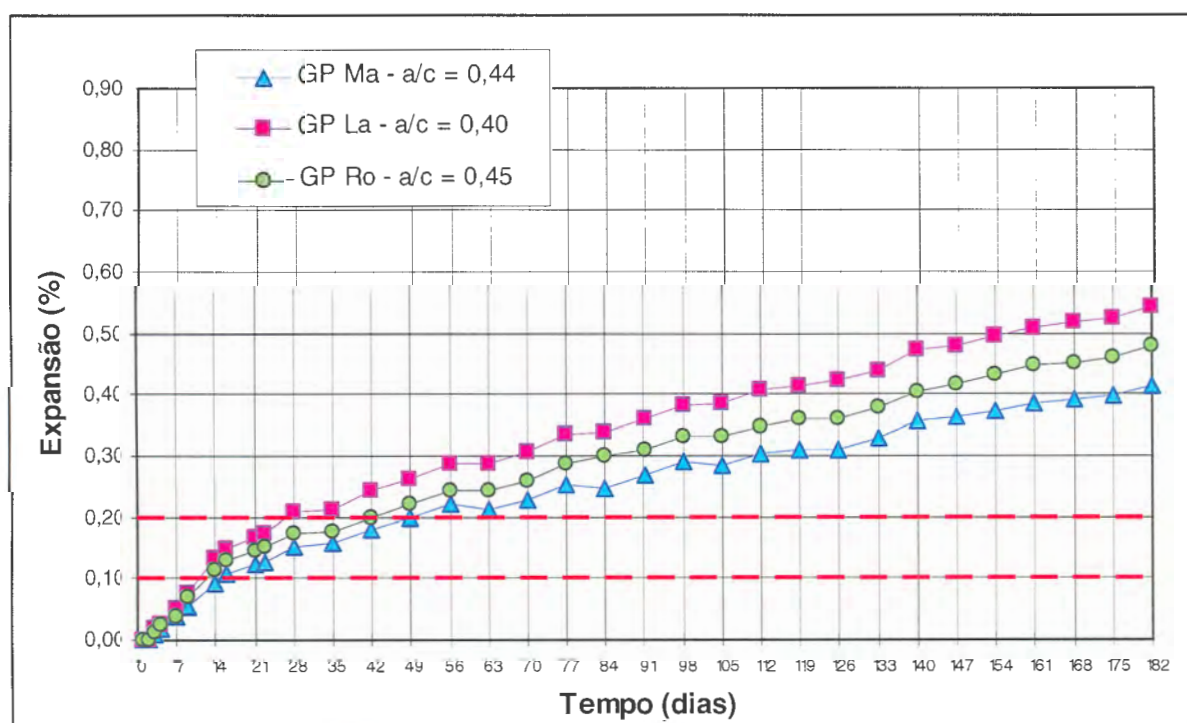


Figura 87: expansões até 182 dias, da rocha GP, três moagens (S3).

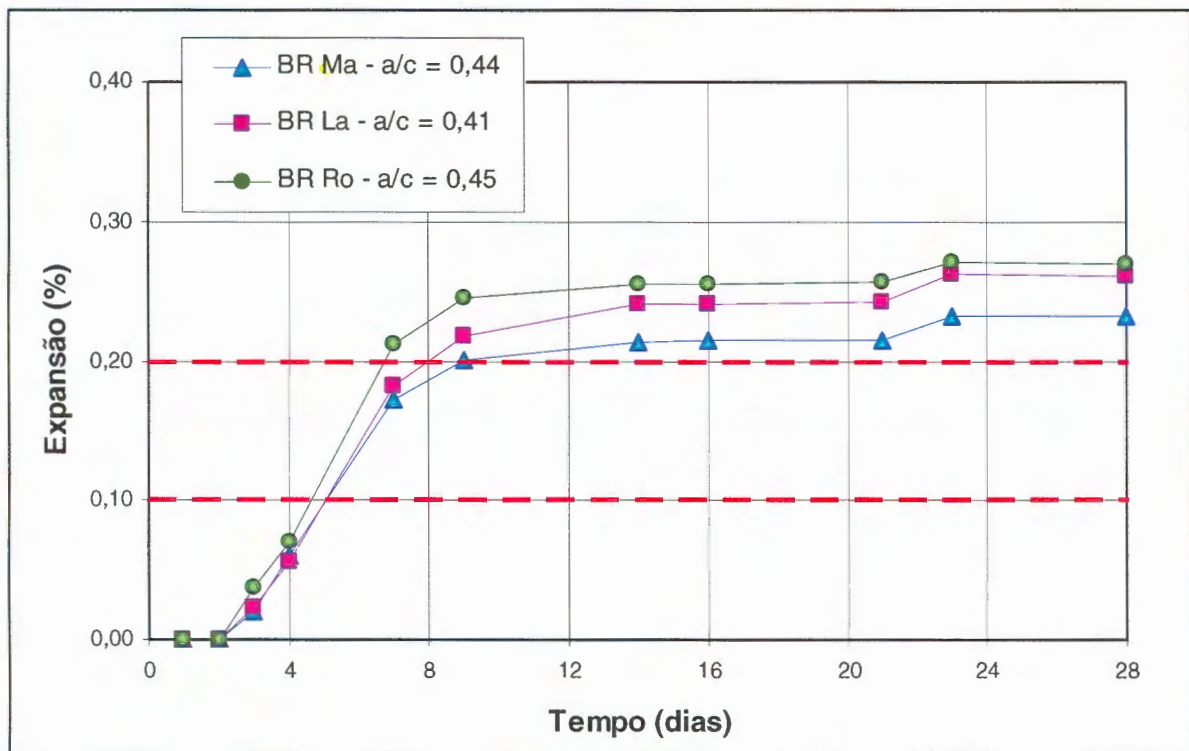


Figura 88: expansões até 28 dias da rocha BR, três moagens (S3).

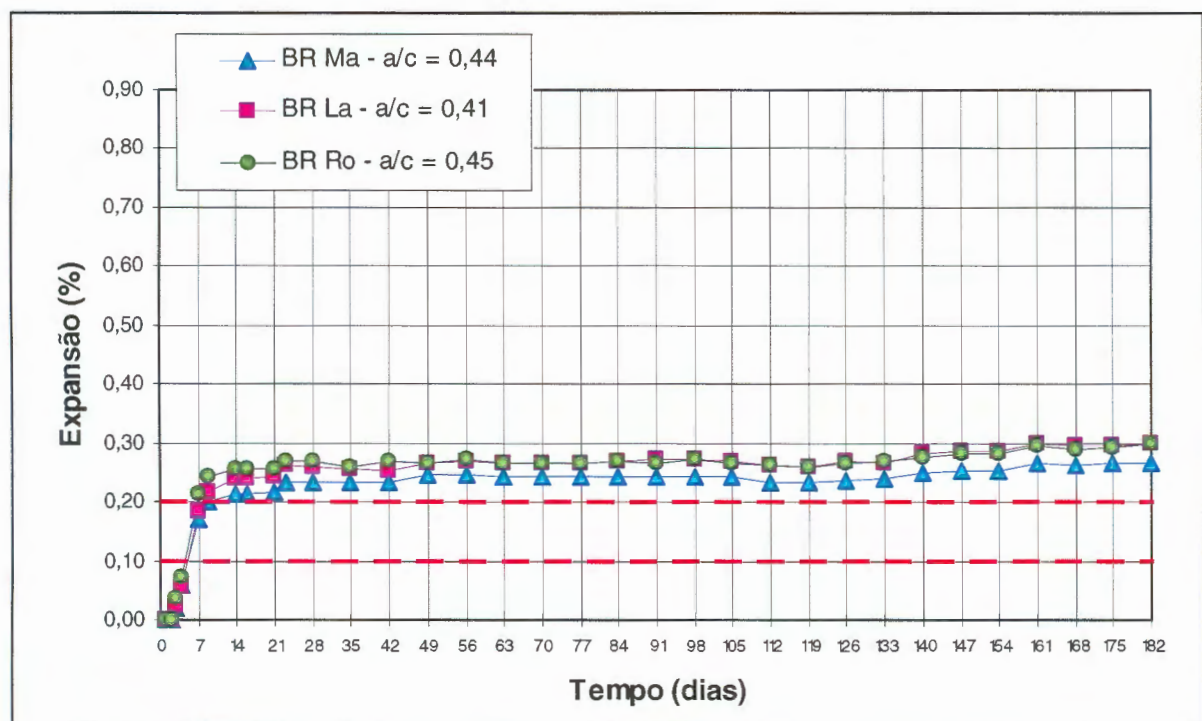


Figura 89: expansões até 182 dias, da rocha BR, três moagens (S3).

Analisando os gráficos anteriores referentes à Série 3, observa-se que, apesar das curvas de expansão não serem coincidentes, para nenhuma das rochas a classificação em função da reatividade potencial foi diferenciada por causa da moagem do agregado.

Quanto à forma do grão que gera maiores expansões, para a amostra GN e para a amostra GP foi a moagem em Abrasão Los Angeles (forma mais arredondada). Para a amostra BR, até os 28 dias a amostra BR Ro tem comportamento mais expansivo, porém em idades mais avançadas (Figura 89) as expansões da amostra moída em Abrasão Los Angeles e da amostra moída em moinho de Rolos são coincidentes.

4.4.4 Análise estatística

Com a finalidade de validar os resultados obtidos foi feito um tratamento estatístico dos dados de expansão, utilizando-se as repetições empregadas para o ensaio (três barras: cp 1, cp 2 e cp 3).

A análise de variâncias (ANOVA) foi usada para comprovar a influência de cada um dos fatores e mostrar a possível interação entre eles, utilizando-se um nível de confiança de 95%. Foram analisados os fatores moagem e idade, e a interação entre os dois fatores também foi considerada.

Os resultados encontrados estão na Tabela 37 e na Tabela 38. Os dados cuja diferença não é significativa estão identificados com a sigla “NS”. Todos os demais, cuja diferença encontrada é significativa, foram identificados com a sigla “S”.

A verificação da influência da moagem do agregado nas expansões é o foco central desta tese, e busca encontrar números que comprovem que, em se tratando do mesmo agregado, mas britado de formas diferentes, isto significará expansões de maior ou menor valor.

A influência da idade, embora à primeira vista pareça óbvia (maiores idades, maiores expansões), se faz importante para se observar em que idades realmente é necessário que sejam feitas as leituras das barras. Também indica se o comportamento das expansões se estabiliza ao longo do tempo e que tempo é este.

A interação moagem x idade se refere ao crescimento das expansões através do tempo, ao modo como a curva de expansões obtida no ensaio se comporta (inclinação, função, etc.) Se a

diferença não é considerada significativa, isto quer dizer que a taxa de crescimento das expansões ao longo do tempo é a mesma, embora os valores absolutos não o sejam.

Observa-se, nesta primeira análise, que para a moagem e a idade existe diferença significativa (S) entre todas as amostras. Já para a interação, alguns valores apresentaram diferença não significativa (NS).

Tabela 37: análise de variância dos resultados de expansão da série S1 (moagem e idade).

Série	Amostra	Moagem	Idade	Moagem x idade	
S1	GN	0,57	La	S	S
			Ma		
			Ro		
		0,47	La	S	S
			Ma		
			Ro		
		0,37	La	S	S
			Ma		
			Ro		
S1	GP	0,57	La	S	NS
			Ma		
			Ro		
		0,47	La	S	S
			Ma		
			Ro		
		0,37	La	S	S
			Ma		
			Ro		
S1	BR	0,57	La	S	NS
			Ma		
			Ro		
		0,47	La	S	S
			Ma		
			Ro		
		0,37	La	S	S
			Ma		
			Ro		

Tabela 38: análise de variância dos resultados de expansão das séries S2 e S3 (moagem e idade).

Série	Amostra	Moagem	Idade	Moagem x idade		
S2	GN	0,57	La	S	S	
		Ma				
		Ro				
	GN	0,47	La	S	S	
		Ma				
		Ro				
	GN	0,37	La	S	S	
		Ma				
		Ro				
	S2	GP	0,57	La	S	S
			Ma			
			Ro			
GP		0,47	La	S	S	
		Ma				
		Ro				
GP		0,37	La	S	S	
		Ma				
		Ro				
S2		BR	0,57	La	S	S
			Ma			
			Ro			
	BR	0,47	La	S	S	
		Ma				
		Ro				
	BR	0,37	La	S	S	
		Ma				
		Ro				
	S3	GN	La	S	S	
			Ma			
			Ro			
S3	GP	La	S	S		
		Ma				
		Ro				
S3	BR	La	S	S		
		Ma				
		Ro				

Também foi executado o teste de homogeneidade de grupos (Teste de Duncan), para mostrar se existe agrupamento entre os dados ou não. A partir da análise de variância, cujos dados foram apresentados anteriormente, foram observados os gráficos gerados por esta análise, e então confirmados os resultados através do Teste de Duncan (pelo p-valor < 0,05).

A seguir estão apresentados os dados encontrados com a análise estatística das amostras GN S1 057, moagens La, Ma e Ro, por exemplo. Na Tabela 39 estão os dados obtidos com a análise de variância (pode se observar a diferença significativa para todos os fatores). Nas figuras a seguir (Figura 90, Figura 91 e Figura 92) estão os gráficos com a interpretação destes resultados.

Tabela 39: análise de variância para as amostras GN S1 057 (La, Ma e Ro).

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p-valor
Moagem	1,65672	2	0,82836	1567,36	0,00
Idade	9,81590	32	0,30675	580,40	0,00
Moagem x idade	0,57920	64	0,00905	17,12	0,00
Erro	0,10464	198	0,00053	-	-

Obs.: SQ = soma dos quadrados; GDL = graus de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fischer calculado para o teste de significância dos efeitos; p-valor = nível de significância associado ao valor calculado de F.

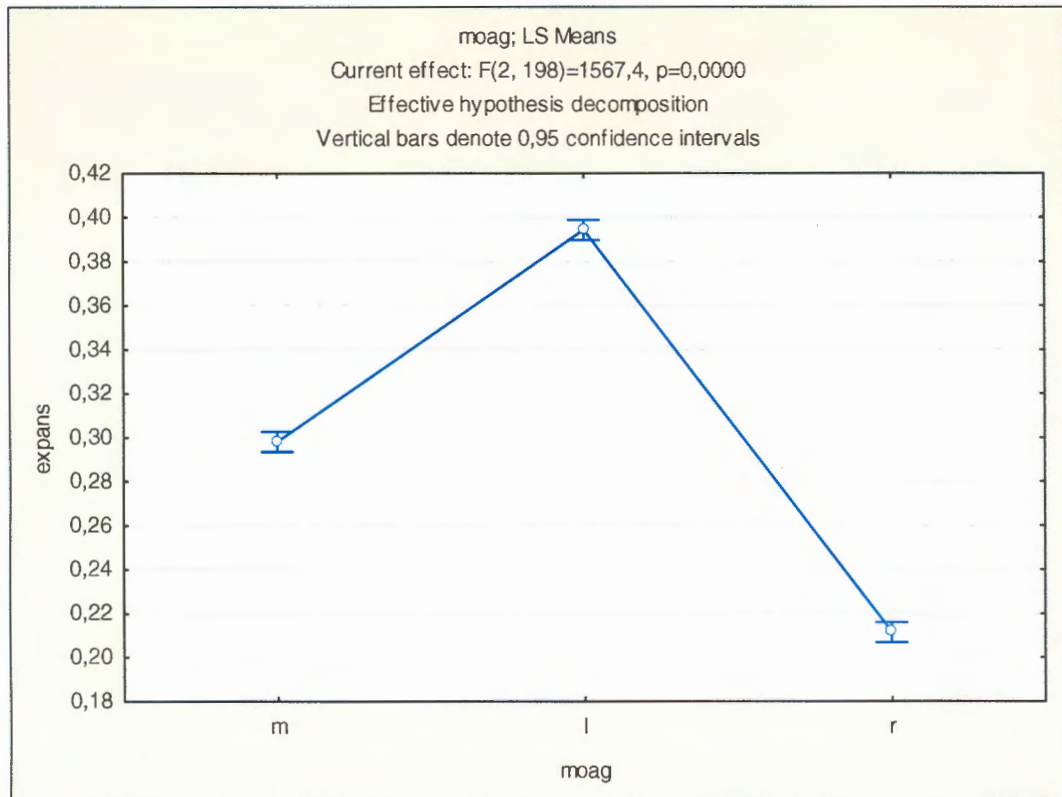


Figura 90: análise da influência da moagem (amostras GN S1 057).

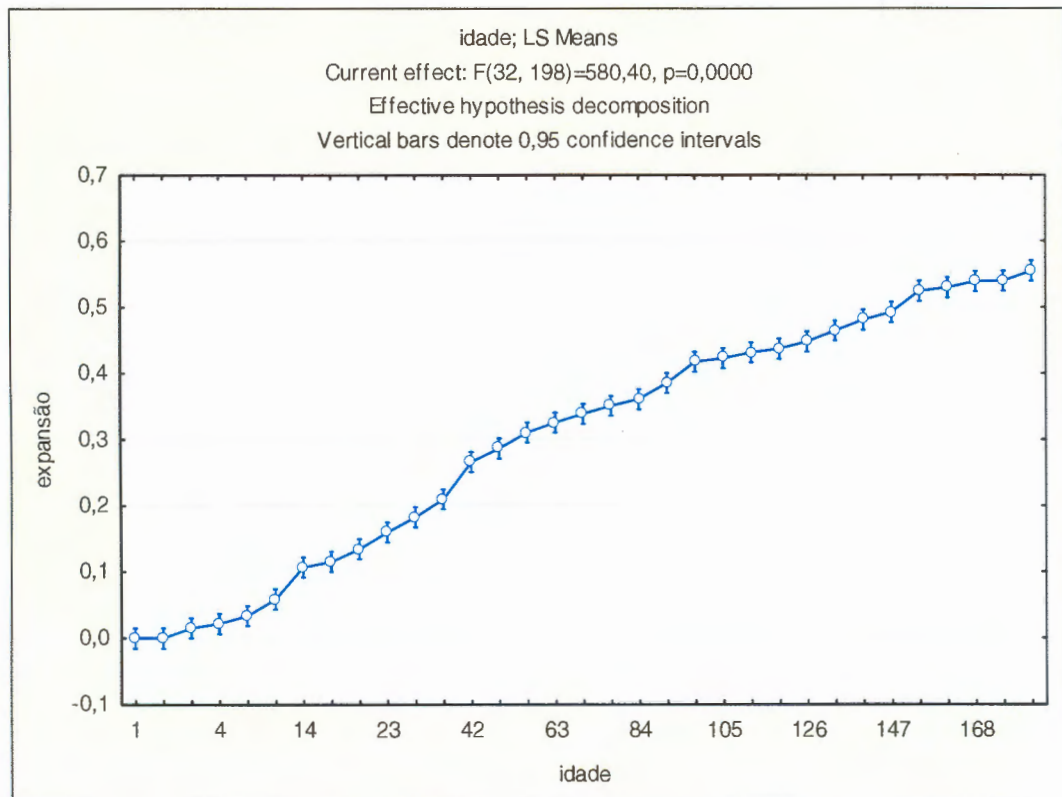


Figura 91: análise da influência da idade (amostras GN S1 057).

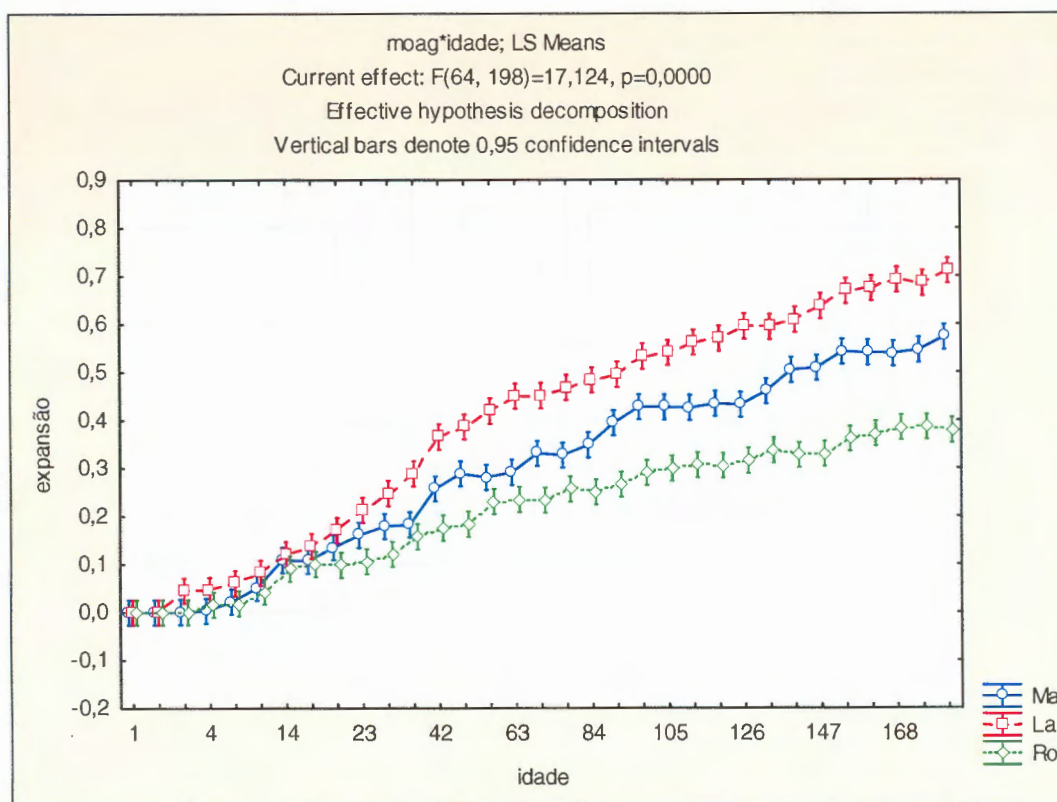


Figura 92: análise da influência da interação moagem x idade (amostras GN S1 057).

Observando os gráficos anteriores (Figura 90, Figura 91 e Figura 92) pode se notar que não há agrupamento entre a influência da moagem, ou seja, efetivamente o efeito da moagem é significativo sobre as expansões do ensaio acelerado. A influência da idade passa a ser significativa a partir do 9º dia de idade, e desta idade em diante são sempre significativamente diferentes. Já a influência da interação moagem x idade passa a ser significativa a partir do 14º dia, e assim se mantém até o final. Todas estas análises foram checadas através de teste Duncan, com a confirmação de p-valor < 0,05 (para a análise da influência da moagem destas amostras, entre La e Ma foi de 0,000009, entre La e Ro de 0,000011 e entre Ma e Ro também de 0,000009).

Do mesmo modo se procedeu para as demais amostras, para obtenção dos resultados a seguir.

Quanto à influência da moagem na expansão, apenas entre 3 amostras foi encontrado agrupamento:

- a) GP S1 047: entre as moagens La e Ro (p-valor = 0,054);
- b) BR S1 057: entre as moagens Ma e Ro (p-valor = 0,228);
- c) GN S2 037: entre as moagens Ma e La (p-valor = 0,902).

Levando em conta que foram realizados 63 ensaios no total, e que os agrupamentos foram encontrados entre rochas diferentes, séries diferentes, relações a/c diferentes e moagens diferentes, não foi reconhecido nenhum padrão para considerar válidos estes três resultados. Considerou-se que as moagens influenciam nos resultados de expansão significativamente.

Para a influência da idade e da interação moagem x idade, a Tabela 40 possui um resumo referente ao agrupamento dos dados.

Analisando a influência da idade sobre a expansão, pode ser observado que, em geral, nas primeiras idades não foi encontrada diferença entre as leituras de expansão. As expansões começam a ser diferenciadas em idades que variam do 3º ao 9º dia de idade. Com exceção da amostra BR, as demais (dois granitos) não apresentam estabilização das leituras até a idade final que este ensaio foi mantido, 182 dias. Para a interação moagem x idade foram obtidos mesmos comportamentos.

Tabela 40: teste de Duncan entre amostras da série S1 e S2 - efeitos: idade e interação idade x moagem.

Amostra	a/c	Idade		Moagem x idade	
		Significância começa no (dia):	Termina no (dia):	Significância começa no (dia):	Termina no (dia):
GN S1	0,57	9	-	14	-
	0,47	7	-	14	-
	0,37	7	-	14	-
GP S1	0,57	9	-	21	-
	0,47	7	-	14	-
	0,37	7	-	7	-
BR S1	0,57	4	35	7	9
	0,47	7	56	7	23
	0,37	4	35	7	23
GN S2	0,57	7	-	9	-
	0,47	7	-	7	-
	0,37	7	-	9	-
GP S2	0,57	9	-	14	-
	0,47	4	-	9	-
	0,37	3	-	3	-
BR S2	0,57	3	56	4	14
	0,47	3	63	3	16
	0,37	3	56	3	14
GN S3		3	-	7	-
GP S3		4	-	14	-
BR S3		4	23	4	21

4.4.5 Correlação expansão, consistência e relação a/c

Uma correlação entre expansão, consistência e relação a/c foi feita, com a finalidade de observar o comportamento expansivo das rochas perante uma argamassa de menor ou maior consistência e diferentes relações a/c.

Foram escolhidas, para fins comparativos, as expansões nas idades de 16 dias (idade referência da ASTM C 1260), 28 dias (idade de comportamento mais estabilizado) e 182 dias (idade final de ensaio).

Inicialmente foram comparados os dados da série 1, onde consistência e relação a/c foram variadas. A seguir (Figura 93, Figura 94 e Figura 95) os comparativos para a rocha GN.

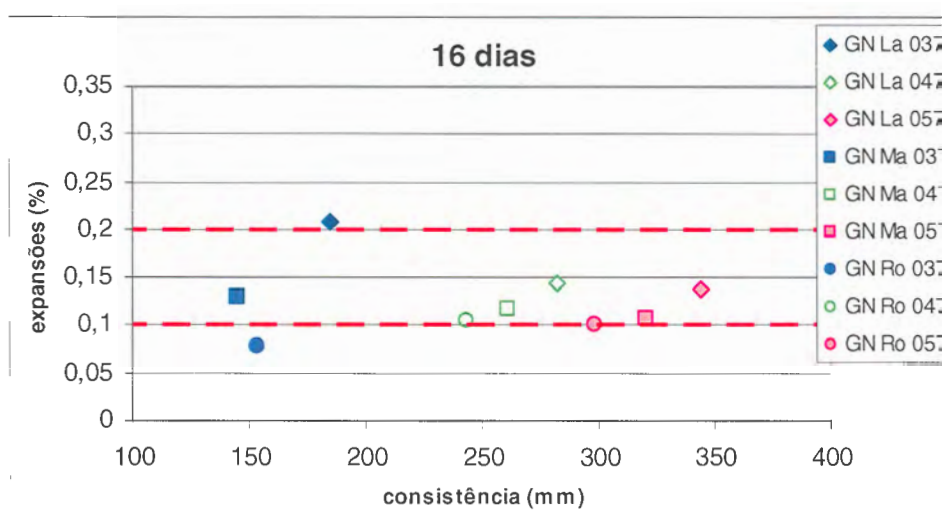


Figura 93: comparativo entre os dados da série 1, rocha GN, 16 dias.

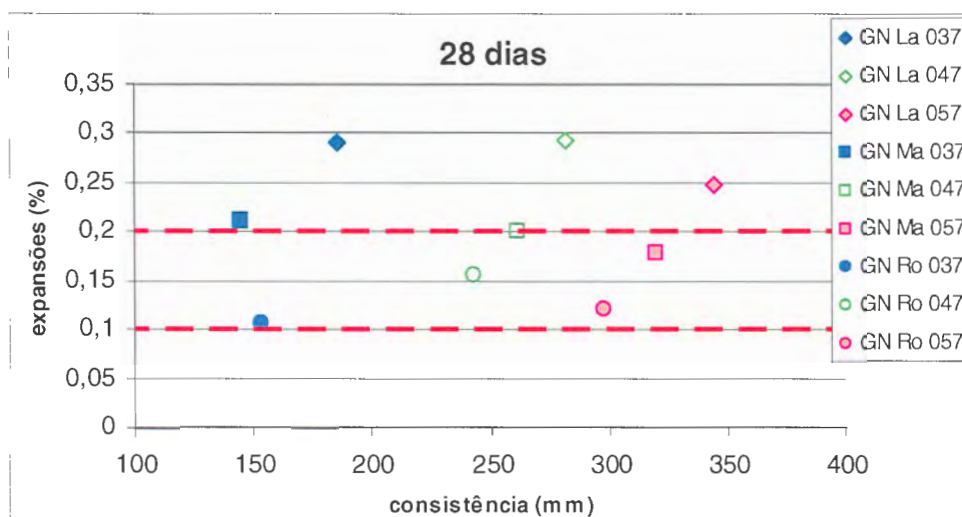


Figura 94: comparativo entre os dados da série 1, rocha GN, 28 dias.

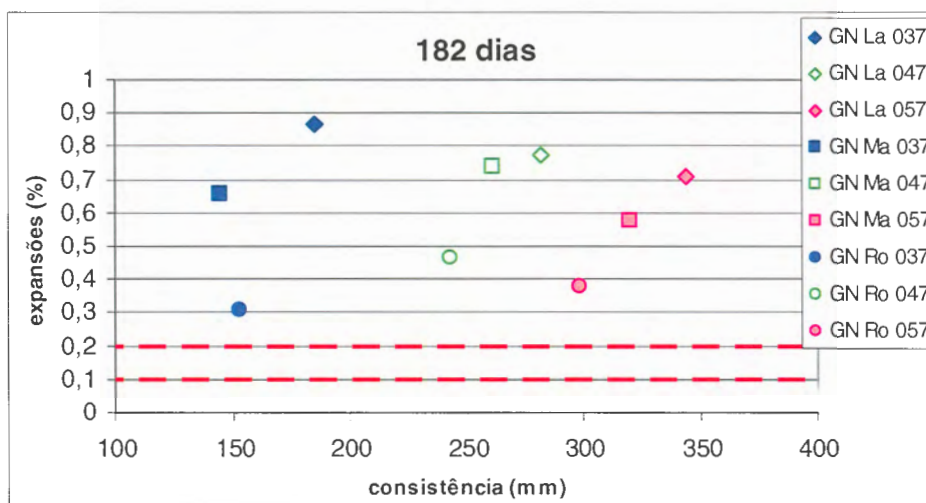


Figura 95: comparativo entre os dados da série 1, rocha GN, 182 dias.

Observa-se, nas três figuras anteriores, que as amostras moídas em Los Angeles apresentam sempre a maior consistência e também as maiores expansões, nas 3 idades analisadas. Para a relação a/c 0,37, quanto maior a idade, maiores as diferenças entre as expansões das amostras de mesma rocha mas moagens diferenciadas.

Para uma mesma relação a/c (amostras identificadas com a mesma cor de marcador), as expansões aumentam conforme aumentam as consistências, provavelmente por causa da melhor moldagem e, conseqüentemente, menor número de vazios.

Ainda, embora aos 182 dias o comportamento quanto à expansão esteja bem definido, aos 16 e aos 28 dias restam dúvidas, pois de acordo com a consistência a expansão pode ser maior ou menor.

Na seqüência, (Figura 96, Figura 97 e Figura 98) os comparativos para a rocha GP.

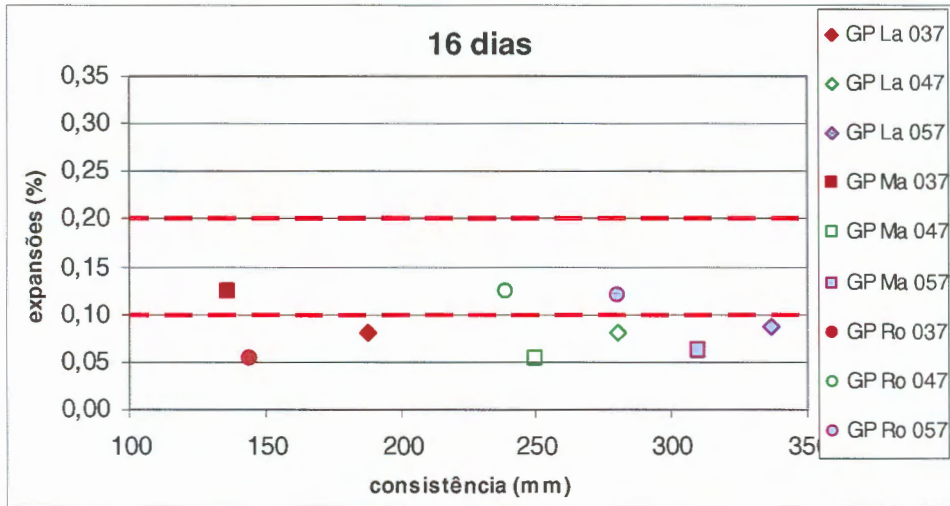


Figura 96: comparativo entre os dados da série 1, rocha GP, 16 dias.

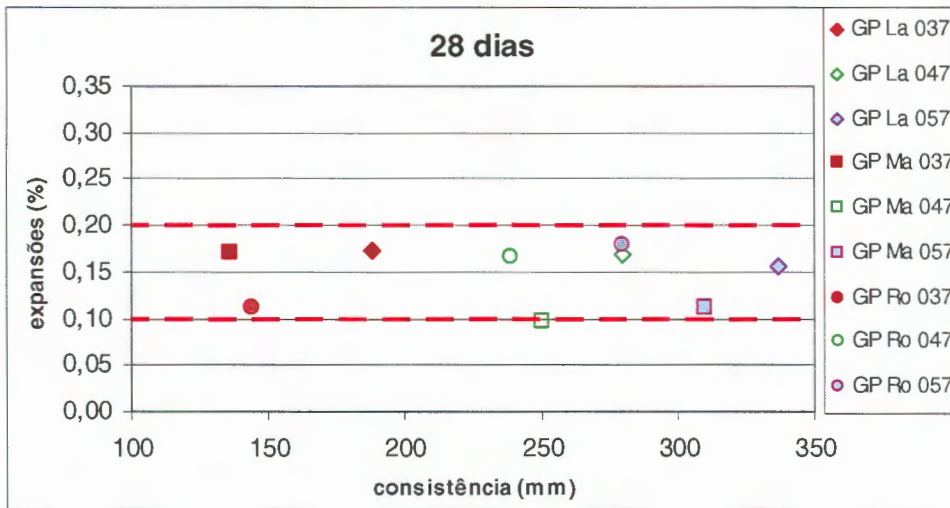


Figura 97: comparativo entre os dados da série 1, rocha GP, 28 dias.

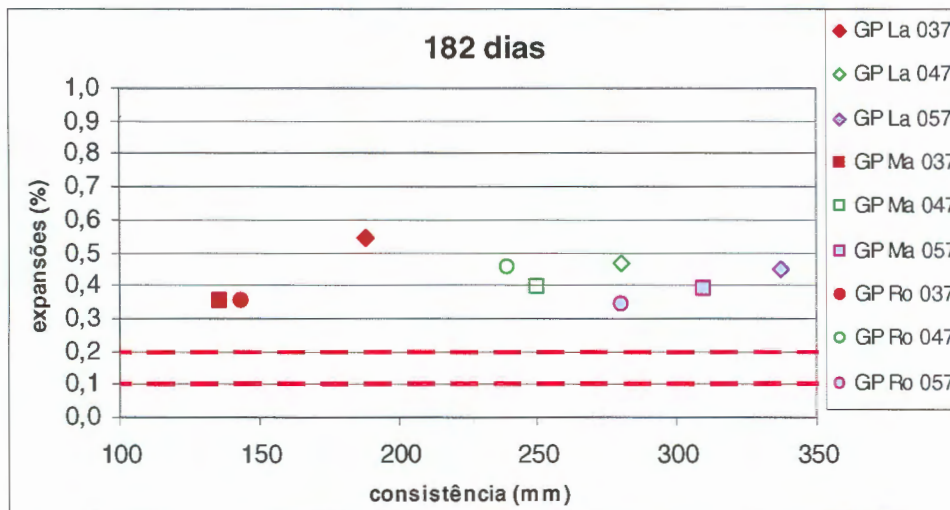


Figura 98: comparativo entre os dados da série 1, rocha GP, 182 dias.

Para a amostra GP este comportamento (aumento das expansões com o aumento da consistência) não pode ser observado, ao menos nas idades de 16 e 28 dias. Aos 182 dias esta tendência é exibida para a relação a/c 0,37 e 0,57.

Observa-se que, dos 16 para os 182 dias, a classificação quanto à expansão muda completamente (de inócuo para deletério).

A seguir (Figura 99, Figura 100 e Figura 101) estão os gráficos para a amostra BR.

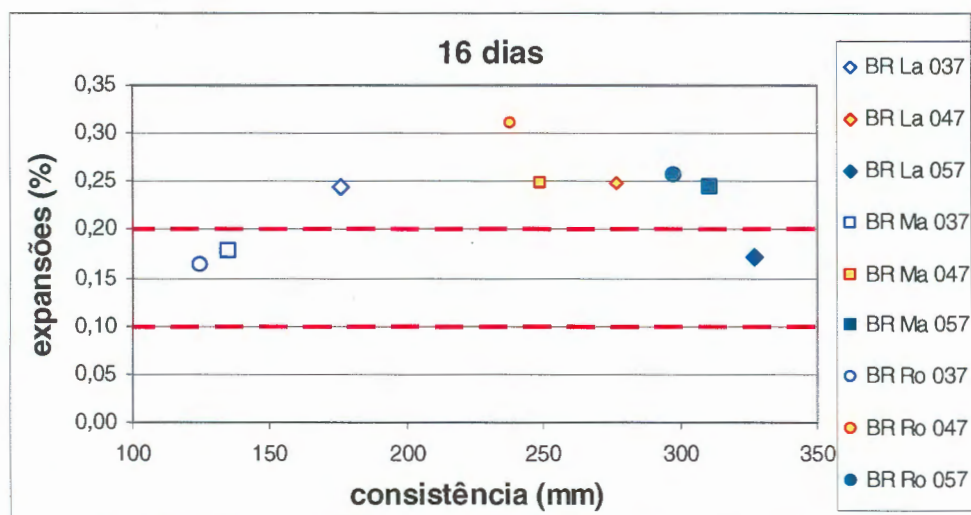


Figura 99: comparativo entre os dados da série 1, rocha BR, 16 dias.

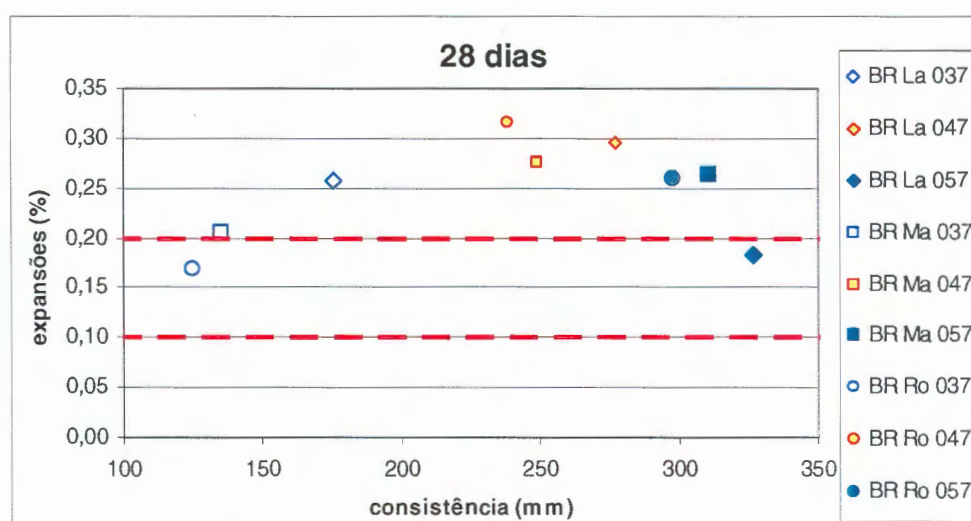


Figura 100: comparativo entre os dados da série 1, rocha BR, 28 dias.

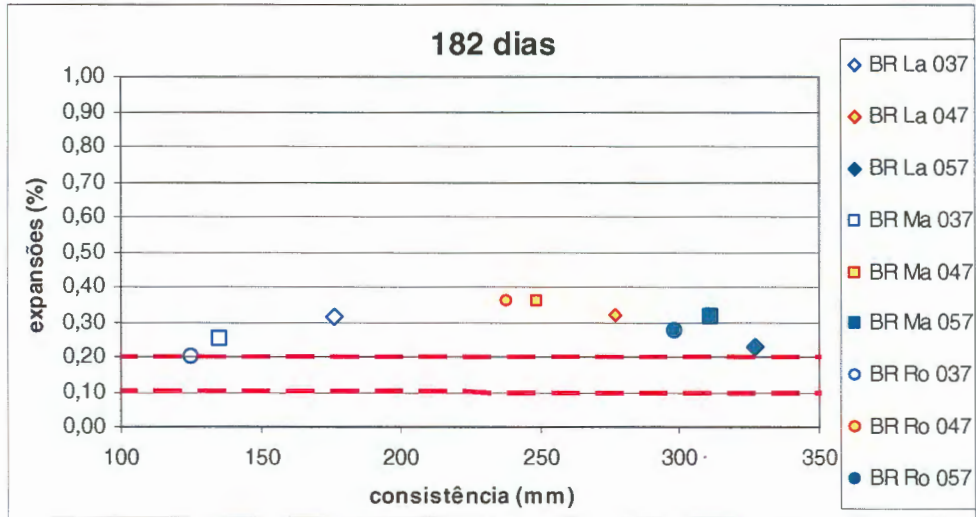


Figura 101: comparativo entre os dados da série 1, rocha BR, 182 dias.

Para a amostra BR o comportamento crescente das expansões com a consistência somente se observa para a relação a/c 0,37, em todas as idades. Para as demais relações a/c não se tem um padrão definido, mas há tendência de estabilização aos 182 dias, e notam-se expansões significativamente menores que as expansões das outras duas amostras (dois granitos).

A seguir, analisou-se a série 2, onde foram fixadas três relações a/c e a mesma consistência para todas as amostras. Ou seja, sem a influência da consistência, pode-se analisar o efeito da variação da a/c sobre as expansões, e também o efeito apenas da moagem, quando comparadas amostras de mesma relação a/c. Nas figuras a seguir (Figura 102, Figura 103 e Figura 104) estão os comparativos das amostras GN, GP e BR, respectivamente.

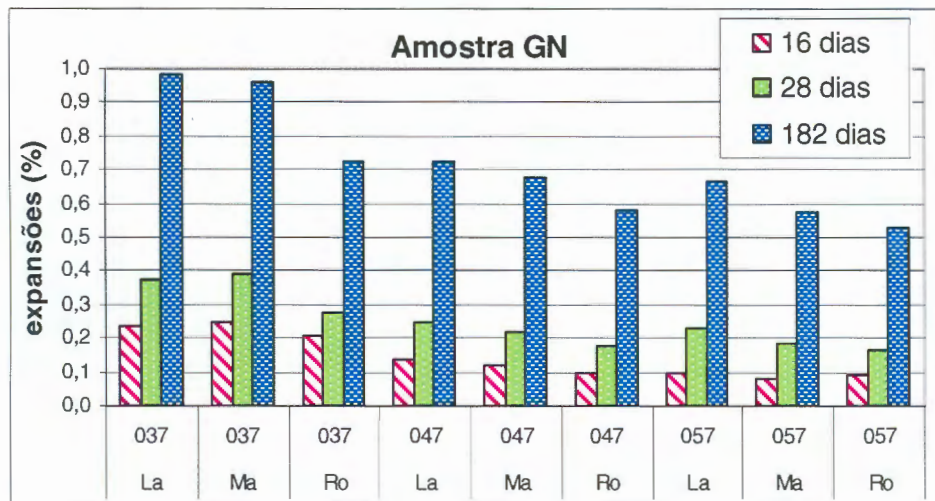


Figura 102: comparativo entre os dados da série 2, rocha GN.

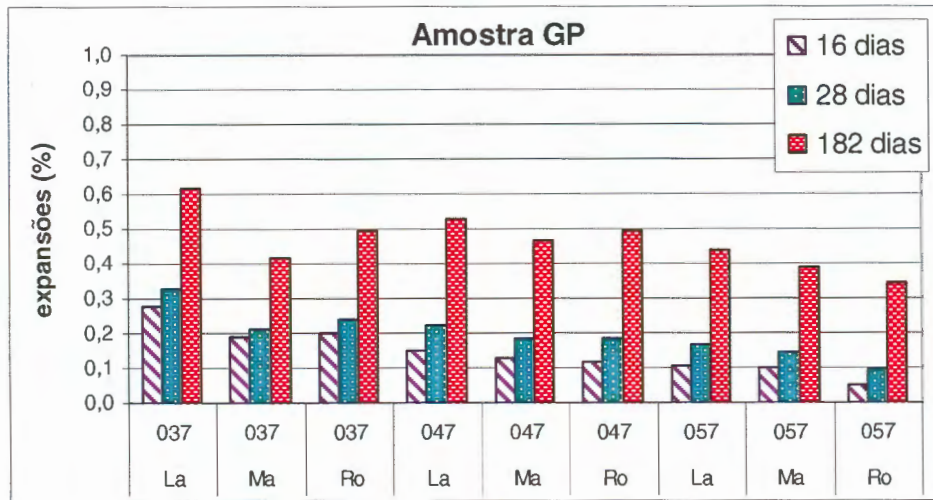


Figura 103: comparativo entre os dados da série 2, rocha GP.

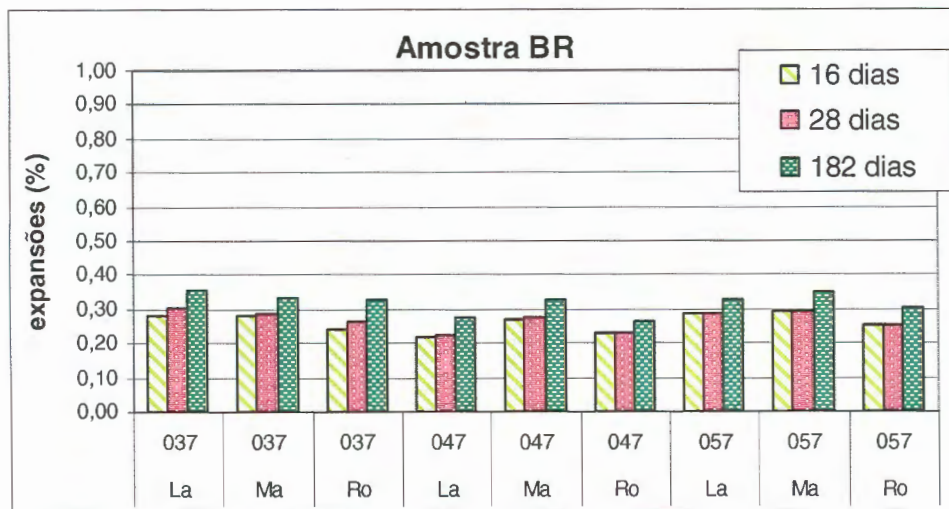


Figura 104: comparativo entre os dados da série 2, rocha BR.

Para quase todas as amostras observa-se diminuição das expansões de acordo com o aumento da relação a/c , quando comparadas amostras de mesma moagem, exceção feita para a amostra GP Ma 047 e as amostras BR de relação 0,57.

Para a amostra GN, as maiores expansões são sempre para a moagem La. O mesmo se observa para a amostra GP e também para a BR de relação a/c 0,37. Com exceção das amostras GP com relação a/c 0,37 e 0,47, as menores expansões são das amostras moídas em moinho de rolos.

A seguir (Figura 105, Figura 106 e Figura 107), os comparativos da série 3, onde a consistência foi fixada e foram observadas variações de a/c , em função da forma do grão.

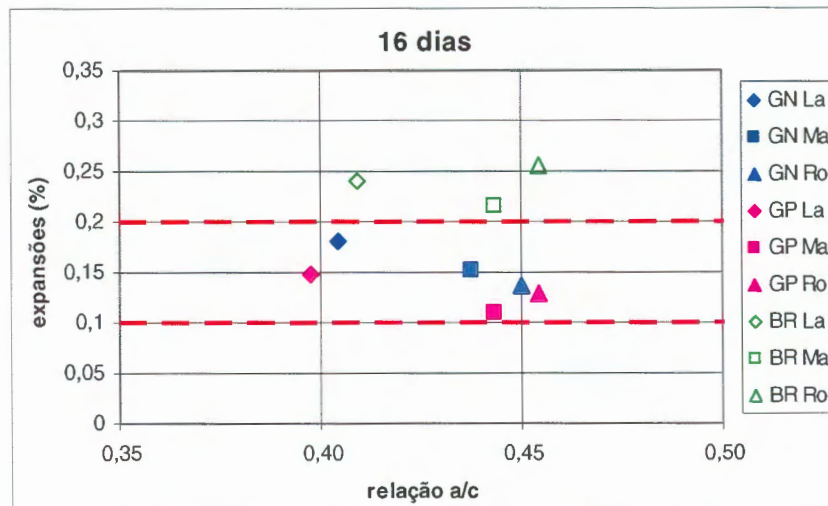


Figura 105: comparativo entre os dados da série 3, 16 dias.

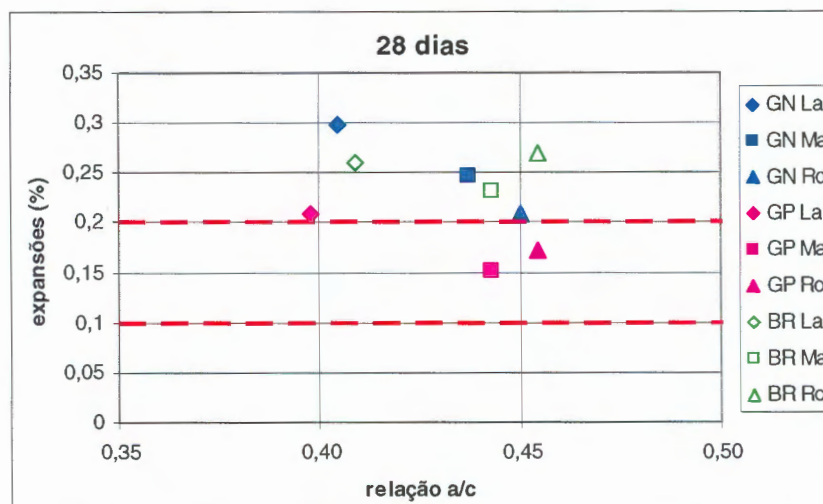


Figura 106: comparativo entre os dados da série 3, 28 dias.

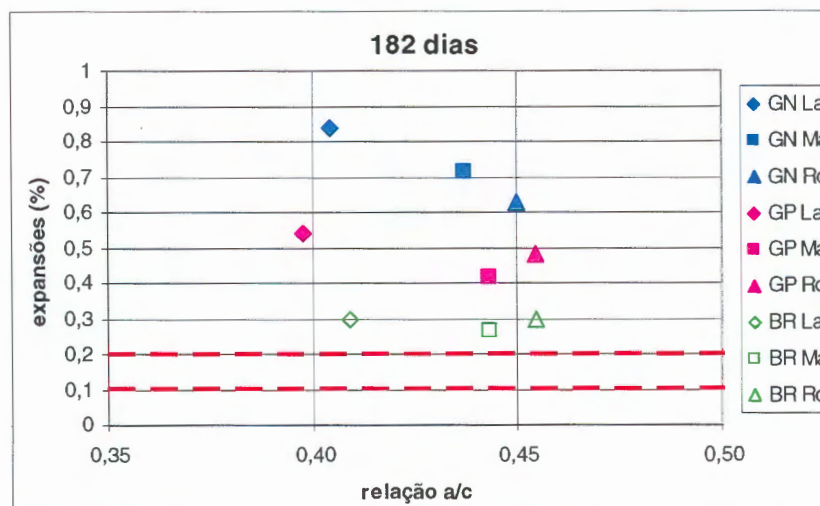


Figura 107: comparativo entre os dados da série 3, 182 dias.

Para a amostra GN, nota-se que as expansões diminuem com o aumento da a/c, em todas as idades. Para a amostra GP também há esta tendência, quando se compara as moagens La e Ma. Já para a amostra BR não há variação muito grande nos valores de expansão, principalmente aos 182 dias.

4.5 PRESENÇA DE PRODUTOS DE REAÇÃO

De todas as amostras de argamassa avaliadas pelo ensaio acelerado, foram selecionadas 4 para análise por microscopia eletrônica.

O objetivo inicial foi verificar a presença de produtos de reação álcali-agregado (gel), a fim de confirmar que houve reação efetivamente, além das expansões medidas nas barras durante o ensaio.

As 4 amostras selecionadas foram:

- a) GN Ro 037 S1;
- b) GN Ro 037 S2;
- c) GN La 037 S1;
- d) GN La 037 S2.

O critério de escolha foi analisar duas argamassas confeccionadas com os dois extremos de forma de grão (mais angulosa – Ro, e mais arredondada – La). Também foram escolhidas amostras similares de duas séries diferentes: S1 e S2, sem e com aditivo plastificante. E a relação a/c 0,37 foi escolhida por exibir resultados mais diferenciados no ensaio acelerado e também de absorção de água.

Nas imagens realizadas, os produtos de reação foram encontrados na maioria das vezes preenchendo os poros da argamassa. As amostras não continham agregados graúdos, logo a visualização do gel na interface pasta/agregado foi dificultada.

Através da técnica de EDS (espectrometria de energia dispersiva) foi possível identificar a composição química dos materiais analisados. A composição química mais comumente encontrada nos géis analisados foi cálcio-sílico-alcálica, sendo que o principal álcali detectado foi o sódio.

Nas figuras a seguir (Figura 108 e Figura 109) tem-se as imagens realizadas na amostra GN Ro 037 S1. Pode se observar um poro preenchido com produtos de RAA cristalizados. Nota-se o descolamento do produto de reação e também as fissuras originadas na pasta a partir dele. Na seqüência (Figura 110) tem-se o espectro deste material.

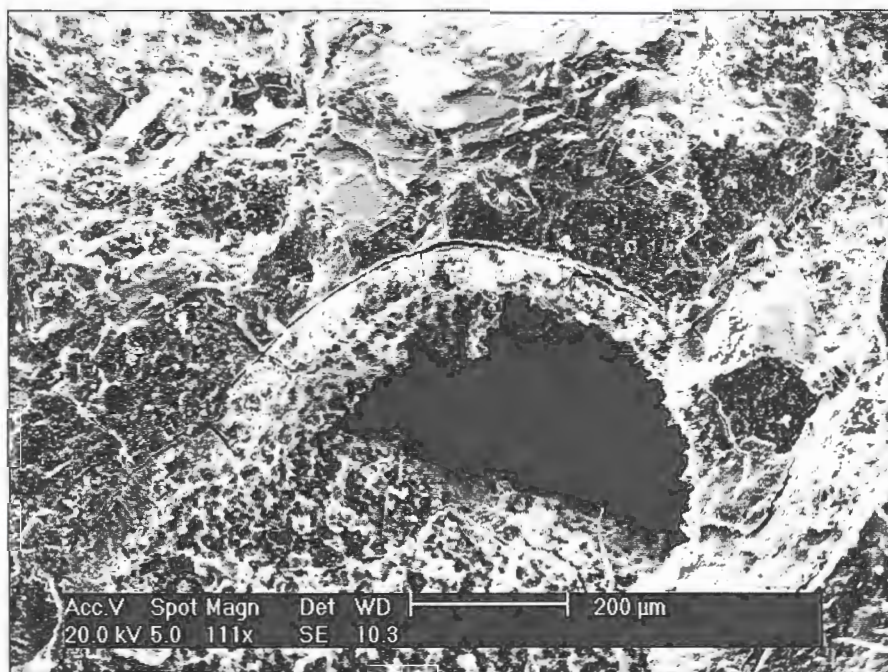


Figura 108: amostra GN Ro 037 S1, aumento de 111 x.

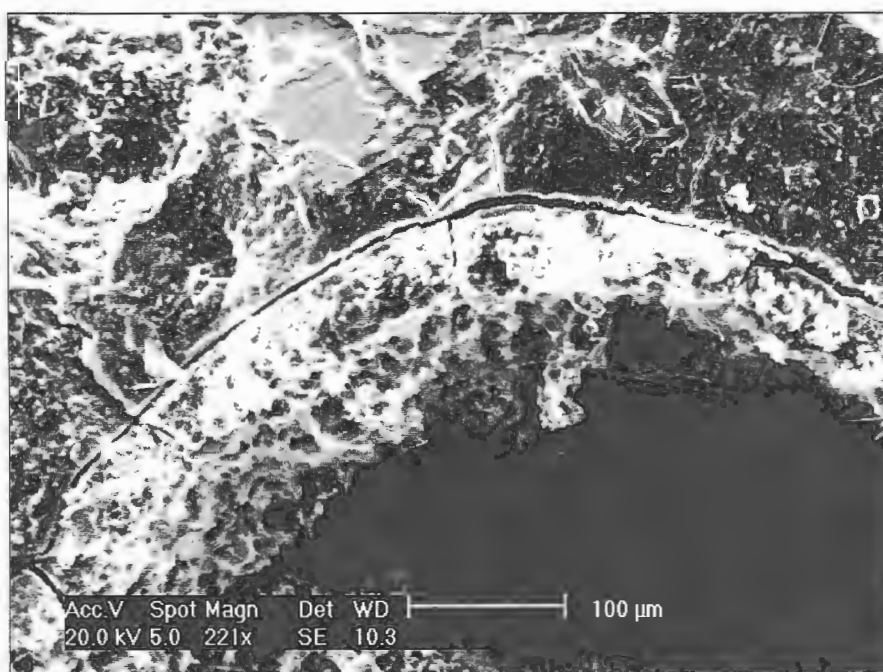


Figura 109: amostra GN Ro 037 S1, aumento de 221 x.

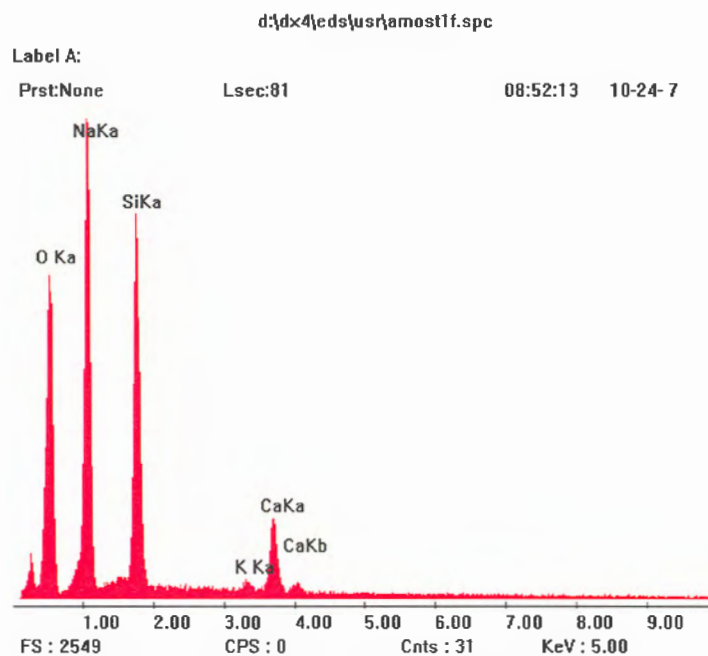


Figura 110: amostra GN Ro 037 S1, espectro.

Para a amostra GN Ro 037 S2 foi encontrada maior dificuldade para a realização de imagens. A amostra apresentava-se muito compacta (em função da baixa relação a/c e também do uso de aditivo plastificante), com poucos poros visíveis. Observa-se na Figura 111 os produtos de reação na forma cristalizada e ao fundo algumas fissuras, e na Figura 112 o espectro do material.

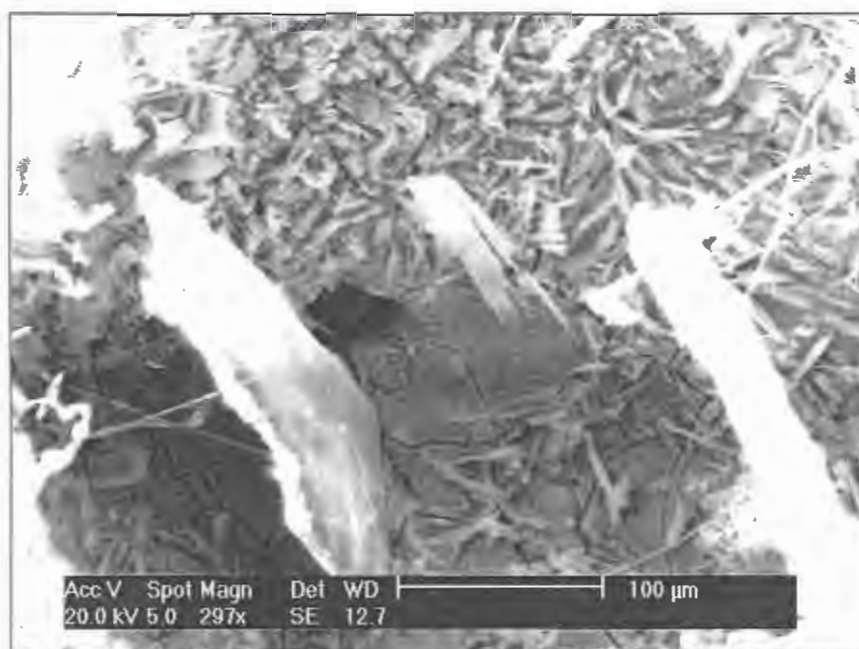


Figura 111: amostra GN Ro 037 S2, aumento de 297 x.

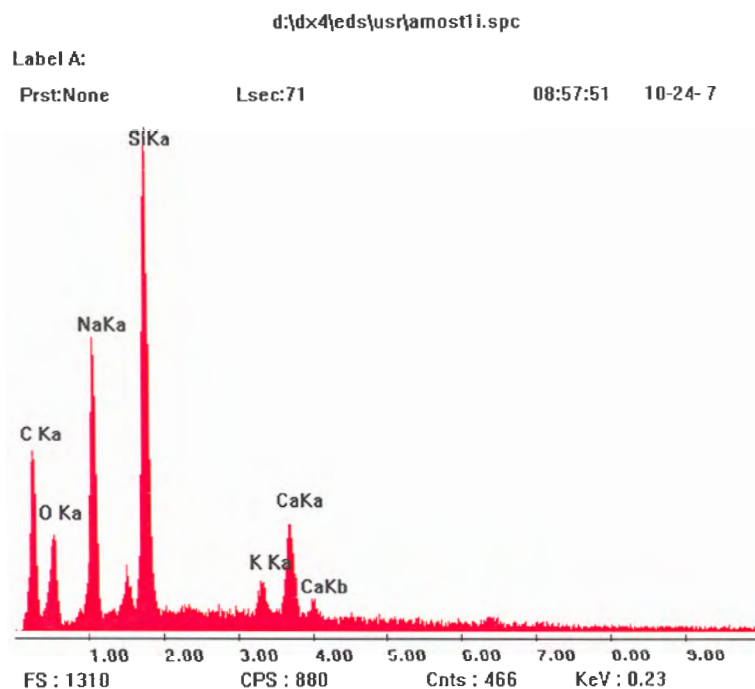


Figura 112: amostra GN Ro 037 S2, espectro.

Nesta amostra o gel foi encontrado apenas na superfície da argamassa, apresentando indícios de estar disseminado na matriz. Isto pode explicar a diferença de expansões destas duas amostras citadas anteriormente, GN Ro 037 S1 (0,306 % aos 182 dias) e GN Ro 037 S2 (0,724 % aos 182 dias). Na série S1 não foi empregado o aditivo plastificante, e as argamassas moldadas com relação a/c 0,37 ficaram muito secas, gerando dificuldades no adensamento dentro dos moldes. Com isto esta amostra apresentou poros em elevada quantidade, e dentro destes poros se deu boa parte da acomodação das expansões do gel, apresentando menores valores no ensaio de expansão. Já na série S2, por causa do emprego do plastificante, a argamassa ficou trabalhável e a matriz compacta, fazendo com que o gel formado ficasse confinado, e então as barras apresentaram valores de expansão mais elevados.

As imagens obtidas para a amostra Gn La 037 S1 estão na Figura 113 e na Figura 114 (ampliação). Nota-se um poro e dentro dele produtos sílico-cálcio-alcalinos na forma cristalizada. A ampliação mostra a textura. O espectro obtido está na Figura 115.

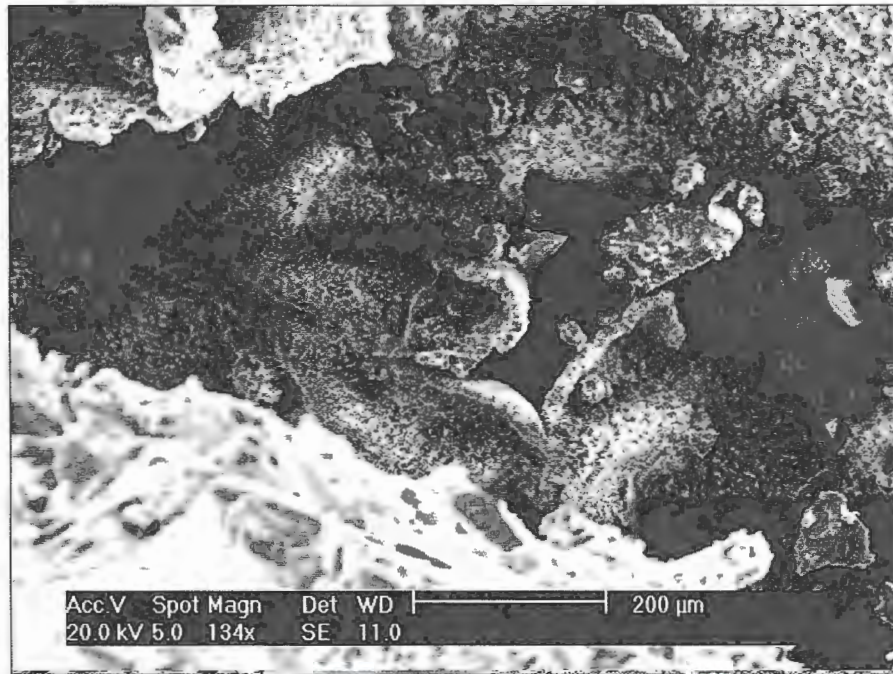


Figura 113: amostra GN La 037 S1, aumento de 134 x.

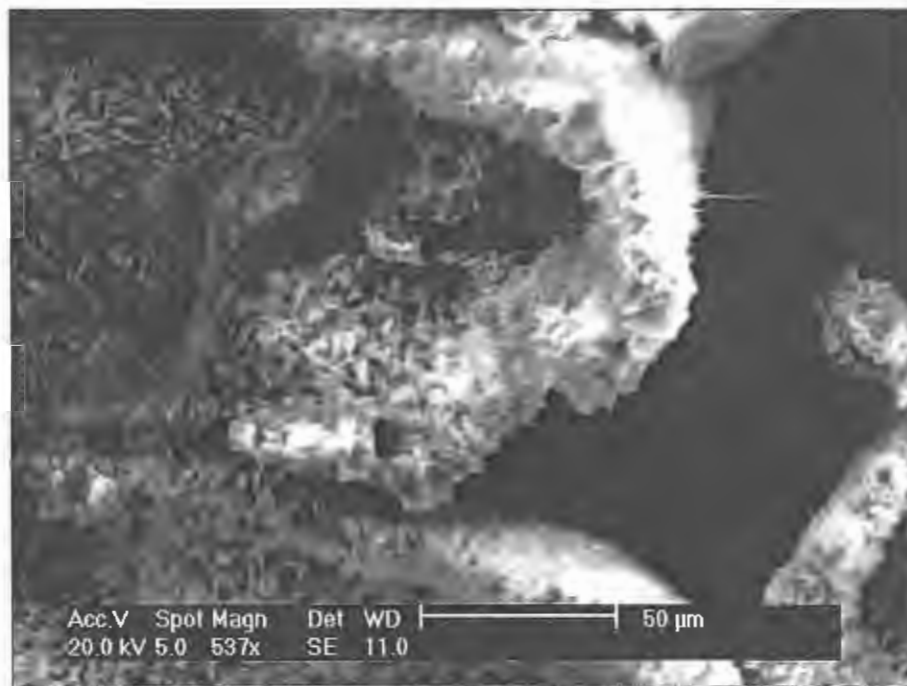


Figura 114: amostra GN La 037 S1, aumento de 537 x (ampliação da imagem anterior).

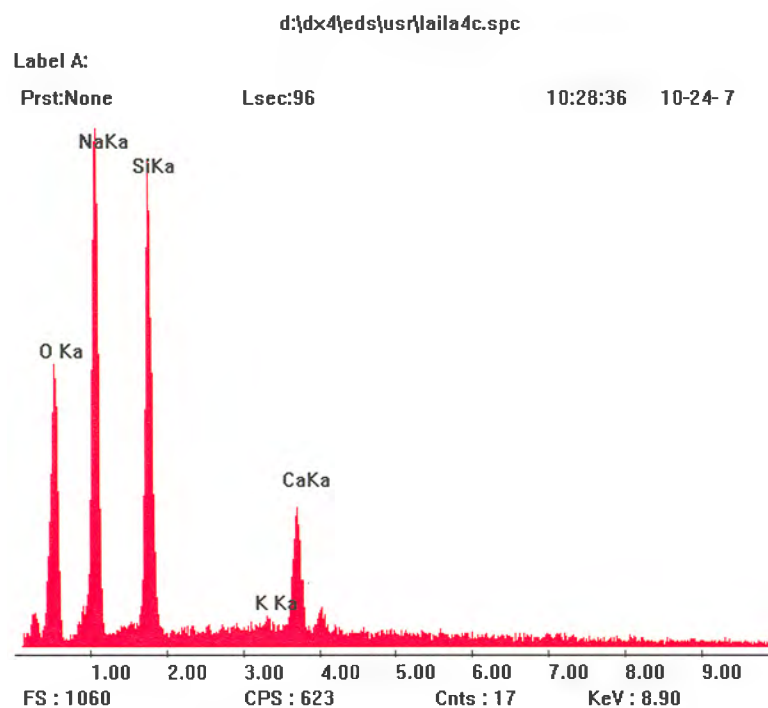


Figura 115: amostra GN La 037 S1, espectro.

A Figura 116 a seguir exibe um poro da amostra GN La 037 S2, revestido com gel maciço gretado nas bordas. Na Figura 117 tem-se a ampliação desta imagem, mostrando também o gretamento do gel (fissuras ao centro do poro). Na Figura 118 está apresentado o espectro do material.

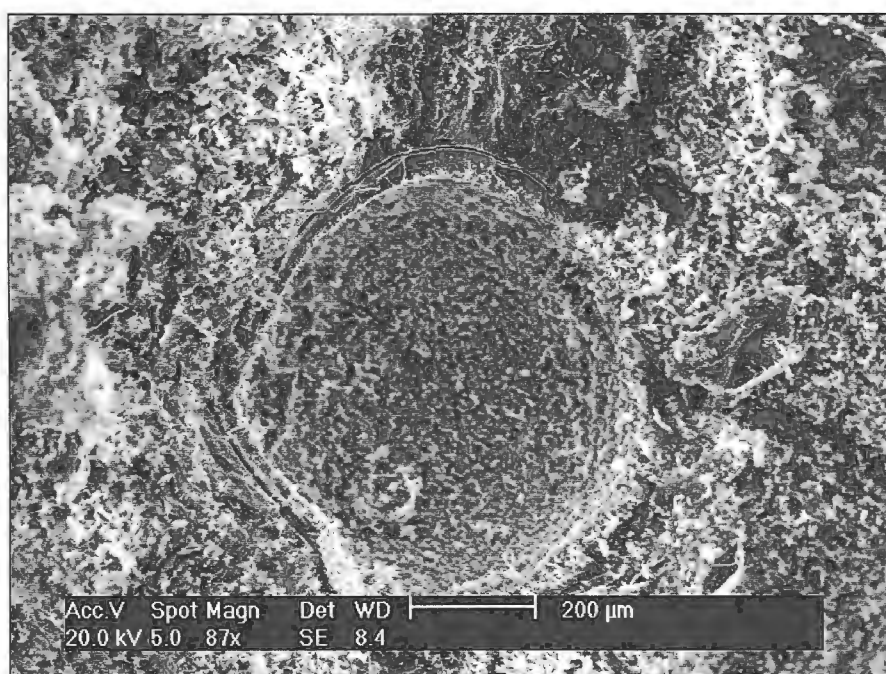


Figura 116: amostra GN La 037 S2, aumento de 87 x.

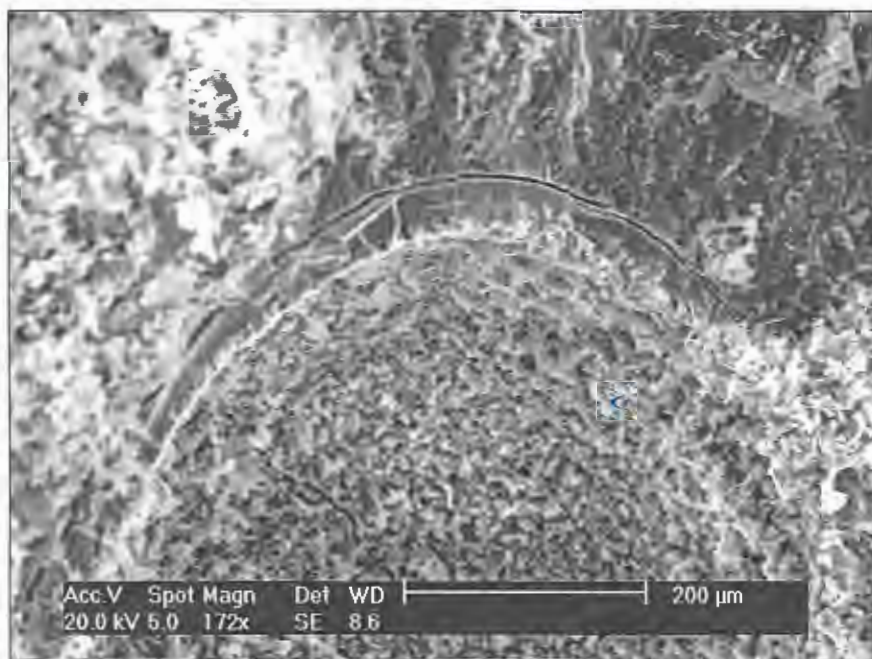


Figura 117: amostra GN La 037 S2, aumento de 172 x.

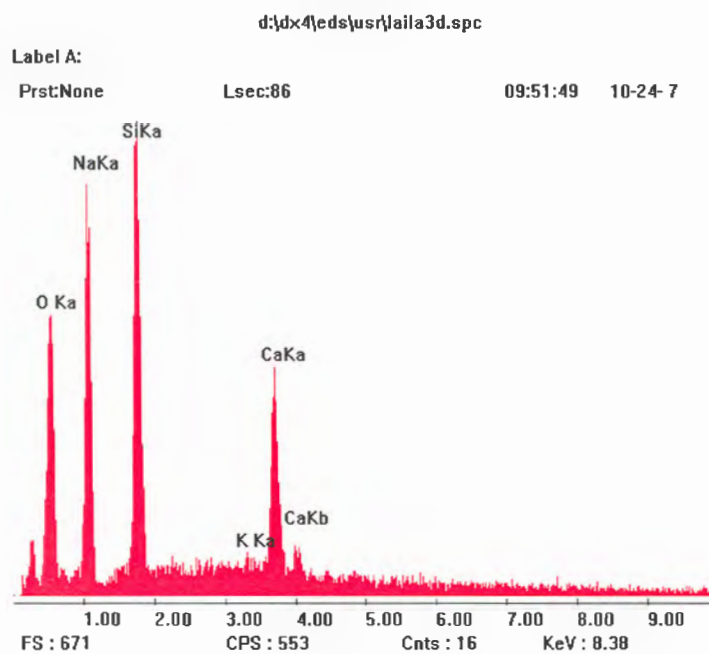


Figura 118: amostra GN La 037 S2, espectro.

No caso do comparativo entre os produtos de reação das amostras GN La 037 S1 e GN La 037 S2, tem-se diferenças menores de expansão (0,864 % e 0,980 % aos 182 dias, respectivamente). Isto pode ser atribuído ao fato de que a forma La do grão é mais arredondada, fazendo com que as diferenças de consistência entre as argamassas das séries S1

e S2 não sejam tão acentuadas. Este arranjo se confirma através das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

4.6 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

Os resultados obtidos para a argamassa confeccionada com a rocha GN, para as três diferentes séries ensaiadas, estão apresentados nas tabelas a seguir, resumidamente. Para cada amostra foi calculada a absorção por imersão, o índice de vazios, a massa específica seca e a massa específica saturada. Estão indicados a média, o desvio padrão e também o coeficiente de variação para cada ensaio.

Tabela 41: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 1, moagem Ma.

Amostra	cp	Absorção (A - %):	I vazios (Iv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN Ma S1 057	1	10,53	21,69	2,06	2,63
	2	10,58	21,74	2,05	2,63
	3	10,72	22,01	2,05	2,63
média		10,61	21,82	2,06	2,63
desvio padrão		0,10	0,17	0,00	0,00
coef. variação (%)		0,91	0,78	0,17	0,14

Amostra	cp	Absorção (A - %):	I vazios (Iv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN Ma S1 047	1	8,56	18,34	2,14	2,62
	2	8,83	18,78	2,13	2,62
	3	8,94	19,03	2,13	2,63
média		8,78	18,72	2,13	2,62
desvio padrão		0,20	0,35	0,01	0,00
coef. variação (%)		2,25	1,85	0,43	0,17

Amostra	cp	Absorção (A - %):	I vazios (Iv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN Ma S1 037	1	7,06	15,79	2,24	2,66
	2	6,45	14,66	2,27	2,66
	3	6,50	14,64	2,25	2,64
média		6,67	15,03	2,25	2,65
desvio padrão		0,33	0,66	0,02	0,01
coef. variação (%)		5,02	4,39	0,74	0,48

Tabela 42: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 1, moagem Ro.

Amostra	cp	Absorção (A - %):	lvazios (lv - %):	ρ_{seca} ($\rho_s - g/cm^3$):	ρ_{sat} ($\rho_{sat} - g/cm^3$):
GN Ro S1 057	1	10,97	22,76	2,07	2,69
	2	10,69	22,20	2,08	2,67
	3	10,89	22,55	2,07	2,67
média		10,85	22,50	2,07	2,68
desvio padrão		0,14	0,28	0,00	0,01
coef. variação (%)		1,33	1,26	0,15	0,33

Amostra	cp	Absorção (A - %):	lvazios (lv - %):	ρ_{seca} ($\rho_s - g/cm^3$):	ρ_{sat} ($\rho_{sat} - g/cm^3$):
GN Ro S1 047	1	9,28	19,70	2,12	2,64
	2	8,58	18,44	2,15	2,63
	3	9,06	19,34	2,13	2,65
média		8,97	19,16	2,14	2,64
desvio padrão		0,36	0,65	0,01	0,01
coef. variação (%)		3,98	3,39	0,61	0,24

Amostra	cp	Absorção (A - %):	lvazios (lv - %):	ρ_{seca} ($\rho_s - g/cm^3$):	ρ_{sat} ($\rho_{sat} - g/cm^3$):
GN Ro S1 037	1	6,80	15,25	2,24	2,64
	2	6,89	15,40	2,24	2,64
	3	6,64	14,95	2,25	2,65
média		6,78	15,20	2,24	2,64
desvio padrão		0,12	0,23	0,01	0,00
coef. variação (%)		1,83	1,51	0,33	0,06

Tabela 43: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 1, moagem La.

Amostra	cp	Absorção (A - %):	lvazios (lv - %):	ρ_{seca} ($\rho_s - g/cm^3$):	ρ_{sat} ($\rho_{sat} - g/cm^3$):
GN La S1 057	1	10,13	20,89	2,06	2,61
	2	10,40	21,25	2,04	2,59
	3	10,35	21,19	2,05	2,60
média		10,29	21,11	2,05	2,60
desvio padrão		0,15	0,20	0,01	0,01
coef. variação (%)		1,42	0,93	0,49	0,24

Amostra	cp	Absorção (A - %):	lvazios (lv - %):	ρ_{seca} ($\rho_s - g/cm^3$):	ρ_{sat} ($\rho_{sat} - g/cm^3$):
GN La S1 047	1	8,06	17,35	2,15	2,60
	2	8,03	17,32	2,16	2,61
	3	7,61	16,36	2,15	2,57
média		7,90	17,01	2,15	2,59
desvio padrão		0,25	0,56	0,00	0,02
coef. variação (%)		3,15	3,29	0,17	0,82

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN La S1 037	1	5,91	13,32	2,25	2,60
	2	5,63	12,82	2,28	2,61
	3	5,34	12,15	2,27	2,59
média		5,63	12,76	2,27	2,60
desvio padrão		0,28	0,59	0,01	0,01
coef. variação (%)		5,01	4,59	0,55	0,46

Tabela 44: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 2, moagem Ma.

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN Ma S2 057	1	10,56	21,69	2,05	2,62
	2	10,97	22,53	2,05	2,65
	3	10,44	21,55	2,06	2,63
média		10,66	21,92	2,06	2,64
desvio padrão		0,28	0,53	0,01	0,01
coef. variação (%)		2,62	2,40	0,29	0,51

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN Ma S2 047	1	8,65	18,32	2,12	2,59
	2	9,02	18,20	2,13	2,61
	3	8,39	17,81	2,12	2,58
média		8,68	18,11	2,12	2,59
desvio padrão		0,32	0,27	0,01	0,01
coef. variação (%)		3,64	1,47	0,35	0,46

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN Ma S2 037	1	6,63	13,63	2,16	2,58
	2	6,73	13,89	2,16	2,60
	3	6,50	13,39	2,16	2,58
média		6,62	13,63	2,16	2,58
desvio padrão		0,11	0,25	0,00	0,01
coef. variação (%)		1,73	1,84	0,06	0,40

Tabela 45: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 2, moagem Ro.

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN Ro S2 057	1	10,97	22,76	2,07	2,69
	2	10,69	22,20	2,08	2,67
	3	10,89	22,55	2,07	2,67
média		10,85	22,50	2,07	2,68
desvio padrão		0,14	0,28	0,00	0,01
coef. variação (%)		1,33	1,26	0,15	0,33

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN Ro S2 047	1	8,82	18,76	2,13	2,62
	2	8,99	18,97	2,11	2,60
	3	8,77	18,56	2,12	2,60
média		8,86	18,77	2,12	2,61
desvio padrão		0,12	0,20	0,01	0,01
coef. variação (%)		1,32	1,08	0,41	0,38

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN Ro S2 037	1	6,90	14,90	2,16	2,54
	2	7,14	15,35	2,15	2,54
	3	6,81	14,72	2,16	2,54
média		6,95	14,99	2,16	2,54
desvio padrão		0,17	0,33	0,01	0,00
coef. variação (%)		2,49	2,18	0,31	0,07

Tabela 46: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 2, moagem La.

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN La S2 057	1	9,83	20,46	2,08	2,62
	2	9,73	20,32	2,09	2,62
	3	9,05	18,92	2,09	2,58
média		9,54	19,90	2,09	2,60
desvio padrão		0,42	0,85	0,00	0,02
coef. variação (%)		4,43	4,26	0,23	0,89

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN La S2 047	1	7,90	16,84	2,13	2,56
	2	7,54	16,17	2,14	2,56
	3	7,58	16,25	2,14	2,56
média		7,67	16,42	2,14	2,56
desvio padrão		0,20	0,37	0,01	0,00
coef. variação (%)		2,57	2,24	0,33	0,12

Amostra	cp	Absorção (A - %):	l vazios (lv - %):	ρ seca (ρ_s - g/cm ³):	ρ sat (ρ_{sat} - g/cm ³):
GN La S2 037	1	6,22	13,01	2,14	2,54
	2	6,50	13,47	2,13	2,54
	3	6,09	12,63	2,13	2,54
média		6,27	13,04	2,13	2,54
desvio padrão		0,21	0,42	0,01	0,00
coef. variação (%)		3,36	3,24	0,41	0,06

Tabela 47: resultados do ensaio de absorção por imersão para a Série 3.

Amostra	cp	Absorção (A - %):	lvazios (lv - %):	ρ_{seca} ($\rho_s - g/cm^3$):	ρ_{sat} ($\rho_{sat} - g/cm^3$):
GN Ma S3	1	7,73	16,05	2,18	2,65
	2	7,67	15,98	2,17	2,65
	3	7,56	16,03	2,18	2,65
média		7,65	16,02	2,18	2,65
desvio padrão		0,09	0,04	0,01	0,00
coef. variação (%)		1,12	0,23	0,29	0,00

Amostra	cp	Absorção (A - %):	lvazios (lv - %):	ρ_{seca} ($\rho_s - g/cm^3$):	ρ_{sat} ($\rho_{sat} - g/cm^3$):
GN La S3	1	7,05	15,66	2,16	2,59
	2	7,16	15,40	2,16	2,60
	3	7,12	15,24	2,19	2,57
média		7,11	15,43	2,17	2,59
desvio padrão		0,06	0,21	0,01	0,02
coef. variação (%)		0,80	1,37	0,67	0,61

Amostra	cp	Absorção (A - %):	lvazios (lv - %):	ρ_{seca} ($\rho_s - g/cm^3$):	ρ_{sat} ($\rho_{sat} - g/cm^3$):
GN Ro S3	1	8,07	16,12	2,21	2,64
	2	7,90	16,31	2,20	2,64
	3	7,80	16,24	2,21	2,65
média		7,92	16,22	2,21	2,65
desvio padrão		0,14	0,10	0,01	0,01
coef. variação (%)		1,72	0,59	0,23	0,23

Pode se observar, pelos coeficientes de variação apresentados, que a grande maioria das amostras teve variação muito pequena entre os 3 corpos-de-prova ensaiados. O maior coeficiente de variação foi apresentado pela amostra da série 1, moagem do tipo mandíbulas (Ma) e relação a/c 0,37 (GN Ma S1 037), que foi de 5,02 % para a absorção e 4,39 % para o índice de vazios. A segunda maior variação foi da amostra também da série 1, moagem do tipo Los Angeles e relação a/c 0,37 (GN La S1 037), de 5,01 % para a absorção e 4,59 % para o índice de vazios. As demais amostras apresentaram coeficientes de variação sempre menores que 5 %. Os coeficientes de variação das massas específicas seca e saturada foram sempre menores que 1 %. Foi feita a verificação de existência de resultados espúrios, e nenhum valor individual está afastado mais do que o dobro do desvio da média.

A seguir, os gráficos comparativos das médias de absorção por imersão (Figura 119 à Figura 121) e índice de vazios (Figura 122 à Figura 124) para cada uma das séries.

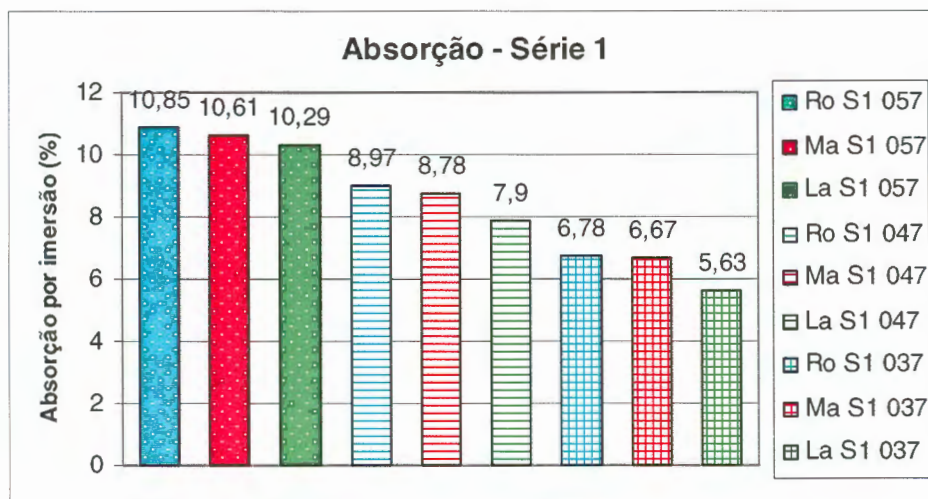


Figura 119: absorção por imersão (médias) da Série 1.

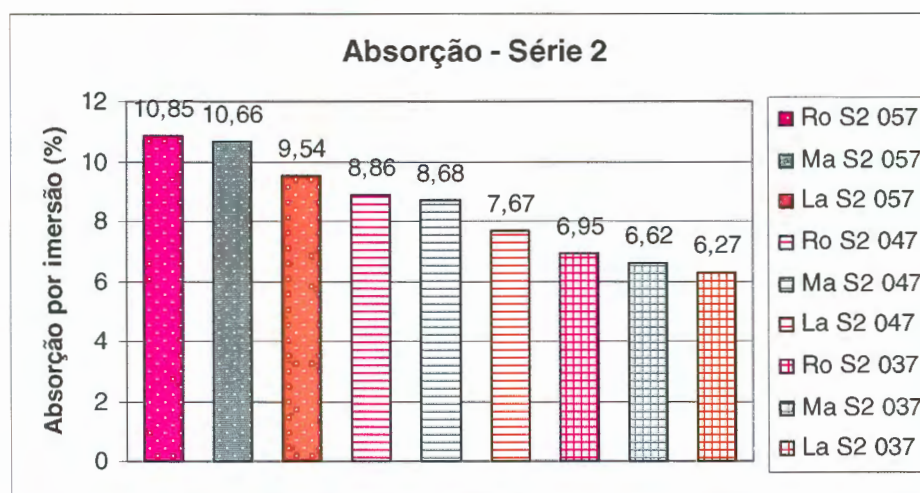


Figura 120: absorção por imersão (médias) da Série 2.

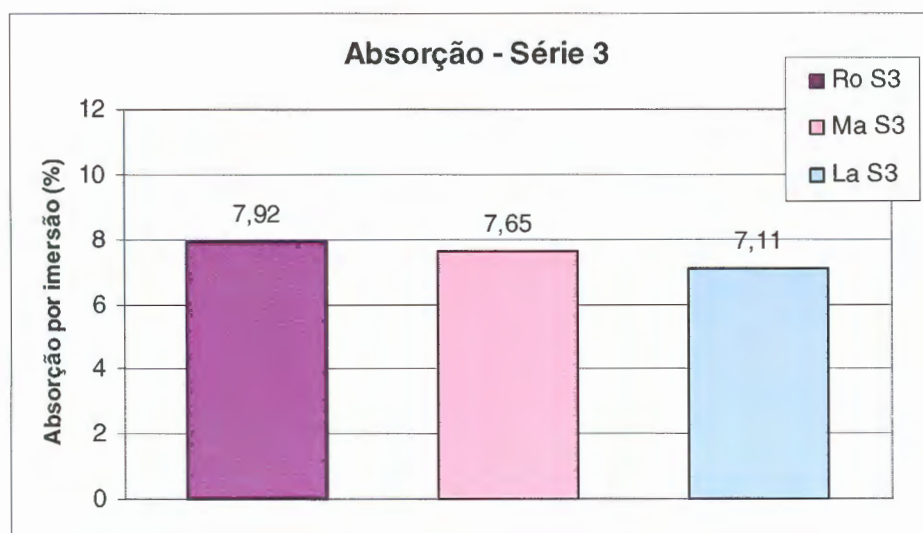


Figura 121: absorção por imersão (médias) da Série 3.

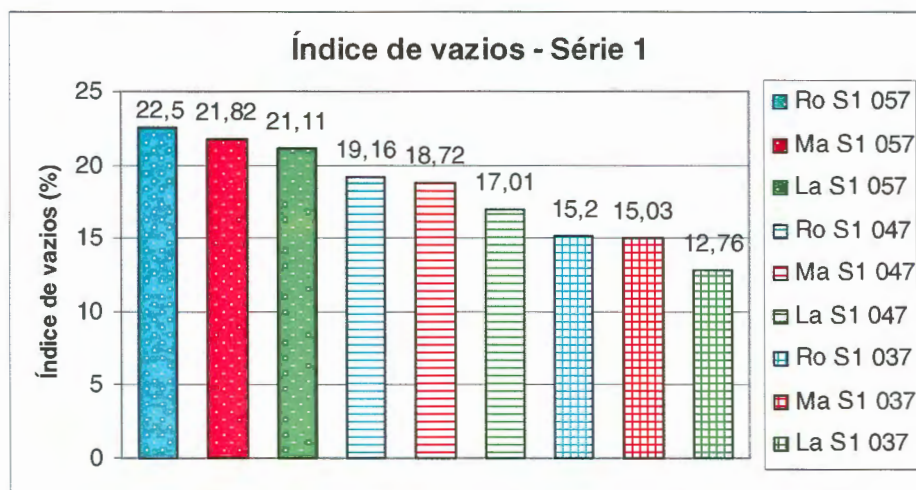


Figura 122: índice de vazios (médias) da Série 1.

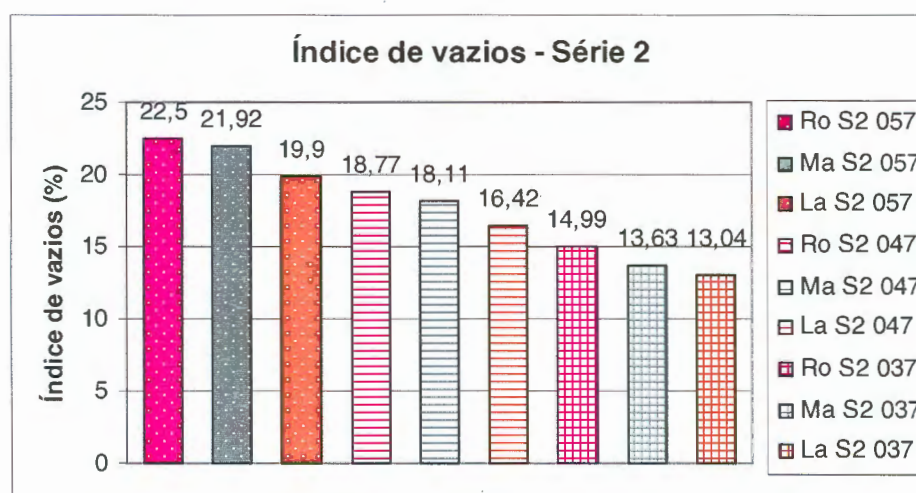


Figura 123: índice de vazios (médias) da Série 2.

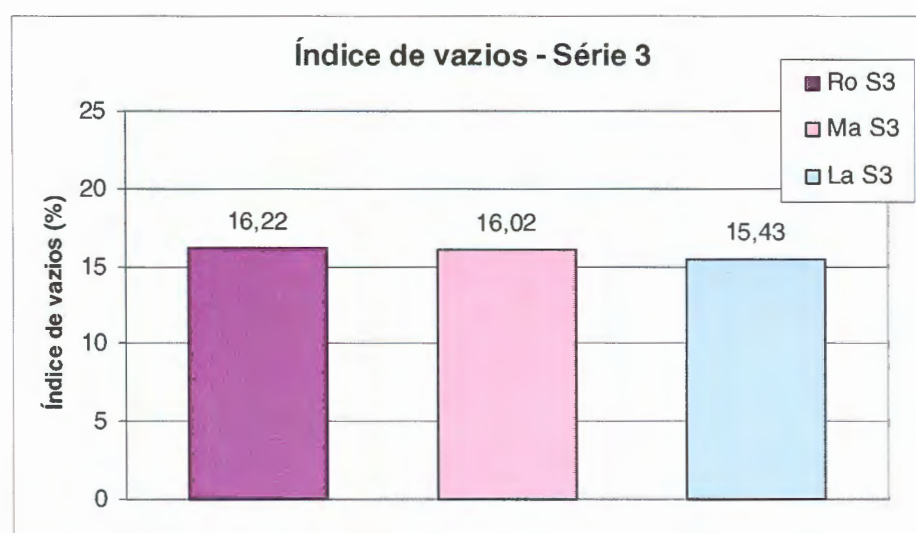


Figura 124: índice de vazios (médias) da Série 3.

Na série 1, de consistência variável, observa-se que o comportamento foi o mesmo para as três relações a/c: a maior absorção foi da amostra moída no moinho de Rolos (Ro), seguida pela amostra moída no Mandíbulas (Ma) e então pela amostra moída no Los Angeles (La). O mesmo padrão de comportamento foi seguido no índice de vazios. Também se observa que a maior absorção foi das amostras moldadas com a maior relação a/c (0,57), como já era esperado.

Para a série 2, onde todas as amostras exibiram a mesma consistência, fixada através de aditivos, o comportamento foi idêntico ao da série 1, tanto para a absorção quanto para o índice de vazios.

Na série 3, a consistência foi fixada e então as relações a/c variaram: 0,40 para a amostra moída no Los Angeles (GN La S3), 0,44 para a amostra moída no Mandíbulas (GN Ma S3) e 0,45 para a amostra moída no moinho de Rolos (GN Ro S3). Neste caso, a absorção da amostra GN Ma S3 mostra-se coerentemente maior que a da amostra GN La S3, pois tem maior relação a/c, e a amostra GN Ro S3 apresenta absorção maior que a GN Ma S3, do mesmo modo.

Para poder avaliar melhor estes resultados, fez-se necessário analisar se existia diferença significativa entre os valores de absorção por imersão e índice de vazios das amostras. Foi feita então uma análise de variância (ANOVA), utilizando-se o programa Statistica 7.0.

A diferença exibida nos valores de absorção e índice de vazios entre as diferentes relações a/c avaliadas é significativa, ou seja, quando a relação a/c muda de 0,57 para 0,47 e então 0,37, observa-se variação real nos valores. Entretanto, para fins comprobatórios, foi feita inicialmente uma análise de variância entre amostras de mesma moagem, mas com diferentes relações a/c, para a série 1. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 48, onde “S” quer dizer que a existe significância.

Considerando-se que há diferença significativa entre as amostras quando $F > F_{\text{crítico}}$ e também quando $p\text{-valor} < 0,05$, comprova-se que há diferença entre todas as amostras da série 1, quanto à relação a/c.

Tabela 48: análise de variância entre amostras da série 1, de mesma moagem, mas diferentes relações a/c.

Moagem	Amostras	F	F _{crítico}	p-valor	Significância
Ro	GN Ro S1 057	228,01	5,14	2,19 x 10 ⁻⁶	S
	GN Ro S1 047				
	GN Ro S1 037				
Ma	GN Ma S1 057	218,24	5,14	2,49 x 10 ⁻⁶	S
	GN Ma S1 047				
	GN Ma S1 037				
La	GN La S1 057	300,76	5,14	9,63 x 10 ⁻⁷	S
	GN La S1 047				
	GN La S1 037				

Também foi executado o teste de Duncan entre as amostras, para observar se havia diferença entre os pares. Os resultados encontram-se na Tabela 49, demonstrando que há diferença significativa entre todos os ensaios. O mesmo raciocínio pode ser estendido para a série 2, uma vez que os valores são bastante próximos.

Tabela 49: teste de Duncan entre amostras da série 1, de mesma moagem, mas diferentes relações a/c.

Moagem	Amostras	p-valor	Significância
Ro	GN Ro S1 057 e GN Ro S1 047	0,00029	S
	GN Ro S1 047 e GN Ro S1 037	0,00025	S
	GN Ro S1 057 e GN Ro S1 037	0,00011	S
Ma	GN Ma S1 057 e GN Ma S1 047	0,00029	S
	GN Ma S1 047 e GN Ma S1 037	0,00025	S
	GN Ma S1 057 e GN Ma S1 037	0,00011	S
La	GN La S1 057 e GN La S1 047	0,00024	S
	GN La S1 047 e GN La S1 037	0,00025	S
	GN La S1 057 e GN La S1 037	0,00011	S

Partiu-se então para a análise de variância entre amostras de mesma relação a/c, mas diferentes moagens, para observar-se se a influência da moagem nos resultados de absorção é realmente significativa. Os valores de F, F_{crítico} e p-valor encontrados estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 50: análise de variância entre amostras da série 1, de mesma relação a/c, mas diferentes moagens.

Relação a/c	Amostras	F	F _{crítico}	p-valor	Significância
0,57	GN Ro S1 057	13,62	5,14	0,0058	S
	GN Ma S1 057				
	GN La S1 057				
0,47	GN Ro S1 047	12,84	5,14	0,0068	S
	GN Ma S1 047				
	GN La S1 047				
0,37	GN Ro S1 037	17,55	5,14	0,0031	S
	GN Ma S1 037				
	GN La S1 037				

Tabela 51: análise de variância entre amostras da série 2, de mesma relação a/c, mas diferentes moagens.

Relação a/c	Amostras	F	F _{crítico}	p-valor	Significância
0,57	GN Ro S2 057	16,28	5,14	0,0037	S
	GN Ma S2 057				
	GN La S2 057				
0,47	GN Ro S2 047	24,36	5,14	0,0013	S
	GN Ma S2 047				
	GN La S2 047				
0,37	GN Ro S2 037	11,92	5,14	0,0081	S
	GN Ma S2 037				
	GN La S2 037				

Tabela 52: análise de variância entre amostras da série 3, com diferentes moagens.

Relação a/c	Amostras	F	F _{crítico}	p-valor	Significância
0,450	GN Ro S3	52,85	5,14	0,0002	S
0,437	GN Ma S3				
0,405	GN La S3				

Observa-se, dos resultados apresentados nas tabelas anteriores, que entre todas as amostras as diferenças resultaram significativas ($F > F_{\text{crítico}}$ e $p\text{-valor} < 0,05$).

Também foi executado, neste caso, o teste de Duncan, para analisar entre que moagens a diferença é realmente significativa. Os valores encontrados para as três séries ensaiadas estão nas tabelas a seguir. Os resultados cuja diferença não é significativa estão indicados com “NS”.

Tabela 53: teste de Duncan entre amostras da série 1, de mesmas relações a/c, mas diferentes moagens.

Relação a/c	Amostras	p-valor	Significância
0,57	GN Ro S1 057 e GN Ma S1 057	0,0672	NS
	GN Ro S1 057 e GN La S1 057	0,0024	S
	GN Ma S1 057 e GN La S1 057	0,0251	S
0,47	GN Ro S1 047 e GN Ma S1 047	0,4183	NS
	GN Ro S1 047 e GN La S1 047	0,0038	S
	GN Ma S1 047 e GN La S1 047	0,0082	S
0,37	GN Ro S1 037 e GN Ma S1 037	0,6335	NS
	GN Ro S1 037 e GN La S1 037	0,0021	S
	GN Ma S1 037 e GN La S1 037	0,0030	S

Tabela 54: teste de Duncan entre amostras da série 2, de mesmas relações a/c, mas diferentes moagens.

Relação a/c	Amostras	p-valor	Significância
0,57	GN Ro S2 057 e GN Ma S2 057	0,4627	NS
	GN Ro S2 057 e GN La S2 057	0,0023	S
	GN Ma S2 057 e GN La S2 057	0,0042	S
0,47	GN Ro S2 047 e GN Ma S2 047	0,3720	NS
	GN Ro S2 047 e GN La S2 047	0,0008	S
	GN Ma S2 047 e GN La S2 047	0,0017	S
0,37	GN Ro S2 037 e GN Ma S2 037	0,0561	NS
	GN Ro S2 037 e GN La S2 037	0,0033	S
	GN Ma S2 037 e GN La S2 037	0,0455	S

Tabela 55: teste de Duncan entre amostras da série 3, de diferentes moagens.

Amostras	p-valor	Significância
GN La S3 e GN Ma S3	0,0007	S
GN La S3 e GN Ro S3	0,0002	S
GN Ma S3 e GN Ro S3	0,0155	S

Da série 1, observa-se que não há diferença significativa entre os resultados de absorção das argamassas confeccionadas com a rocha moída no moinho de Rolos e moída no moinho de Mandíbulas, para as três relações a/c estudadas. Ou seja, a diferença significativa está entre a moagem no Abrasão Los Angeles e as outras duas moagens. Isto quer dizer que o agregado moído no Abrasão Los Angeles gera argamassas com absorção efetivamente diferente das argamassas feitas com agregado moído em moinho de Rolos e em moinho de Mandíbulas. O mesmo comportamento é observado na série 2.

Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado.

Já na série 3, comprova-se que há diferença significativa entre todos os valores de absorção da série.

Ainda para complementação destes resultados obtidos, os corpos-de-prova cilíndricos de 5 x 10 cm utilizados no ensaio de absorção foram rompidos à compressão, com idade de 91 dias. Os resultados das séries encontram-se nos gráficos das figuras a seguir (Figura 125, Figura 126 e Figura 127).

Não foi feito tratamento estatístico destes resultados, uma vez que não foram realizados de acordo com todos os itens da norma (foram realizados posteriormente ao ensaio de absorção, sendo que a cura ficou prejudicada).

Os corpos-de-prova foram rompidos apenas para complementar os resultados de absorção, a fim de se observar se as amostras de maior absorção seriam efetivamente as amostras de menor resistência mecânica, de acordo com as teorias existentes. Isto se comprovou para as três séries, como se observa nas figuras a seguir: comportamento crescente das resistências mecânicas de acordo com a diminuição da relação a/c e inversamente proporcionais aos resultados obtidos com a absorção por imersão.

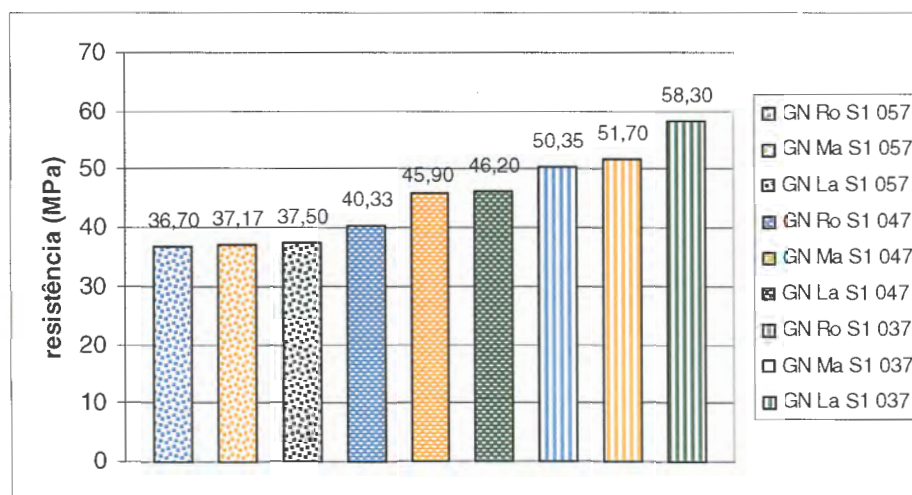


Figura 125: resistências à compressão das amostras da série S1.

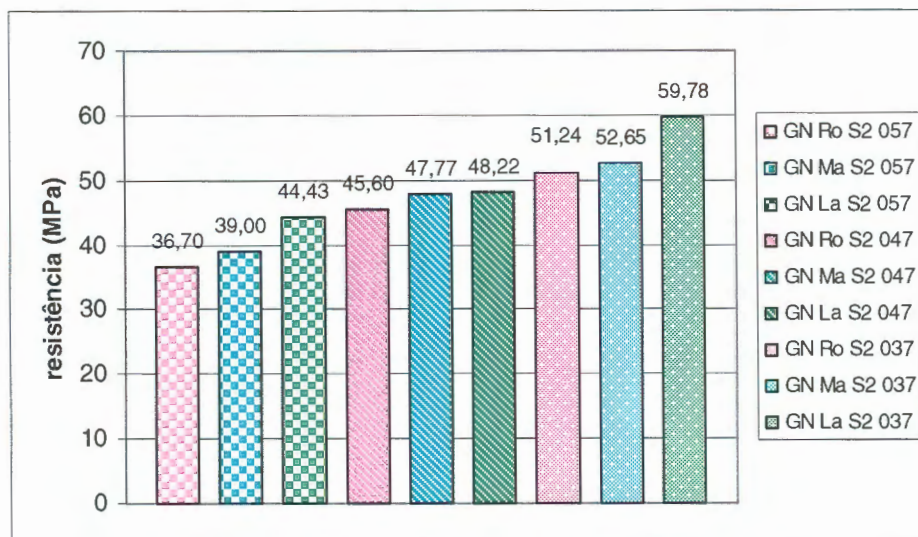


Figura 126: resistências à compressão das amostras da série S2.

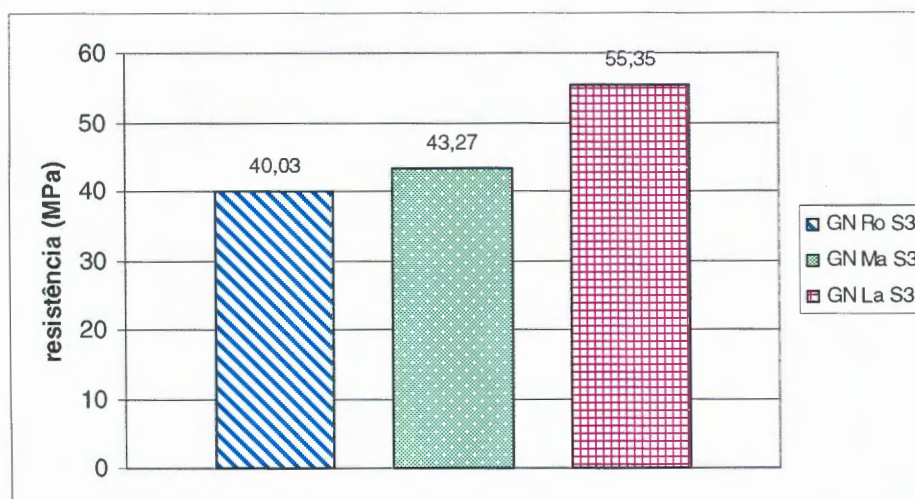


Figura 127: resistências à compressão das amostras da série S3.

4.7 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

O critério para escolha das amostras que seriam ensaiadas por porosimetria de mercúrio foi o mesmo utilizado para selecionar as amostras para ensaio de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura – ver seção 4.5). Logo, foram ensaiadas as amostras:

- a) GN Ro 037 S1;
- b) GN Ro 037 S2;
- c) GN La 037 S1;
- d) GN La 037 S2.

As figuras a seguir (Figura 128 e Figura 129) exibem duas informações: um gráfico “Diâmetro de poro x Volume acumulativo” e outro “Diâmetro de poro x Porosidade acumulativa”. Ressalta-se que todas as amostras são confeccionadas com a mesma rocha, e são argamassas de mesma relação a/c (0,37), onde a diferença entre elas está na moagem da rocha (forma do grão) e presença de aditivo ou não (S2 ou S1).

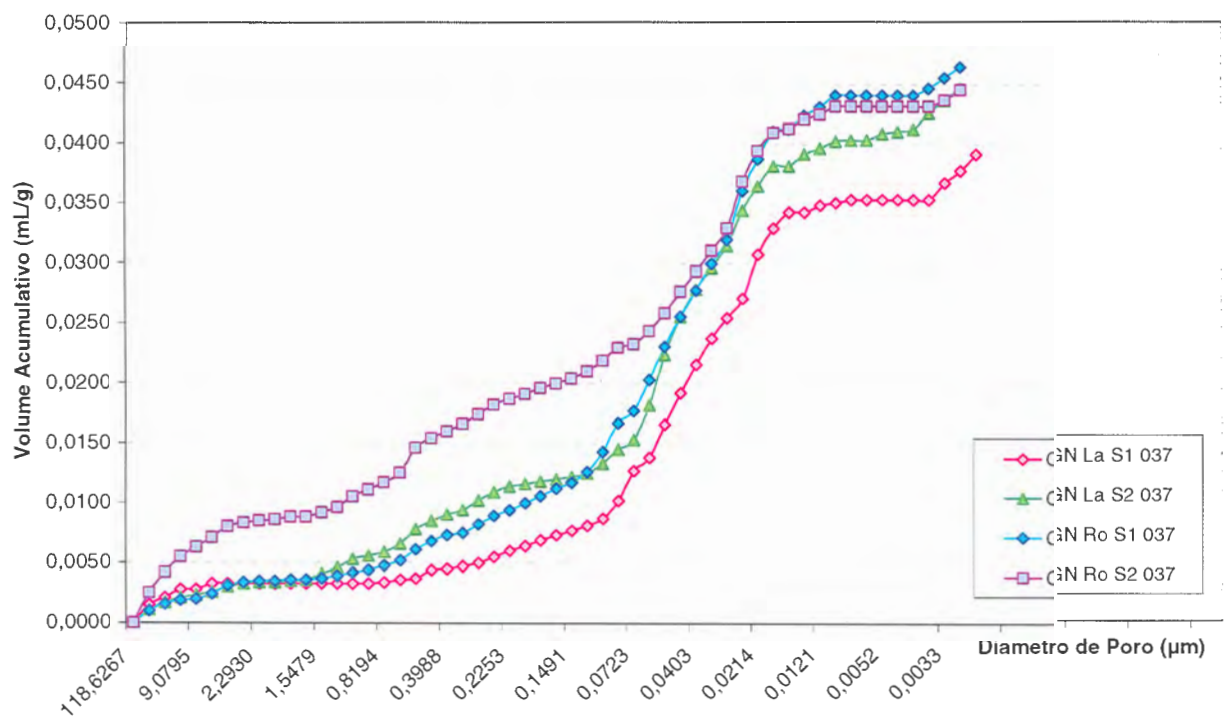


Figura 128: gráfico “diâmetro de poro x volume acumulativo” - comparativo.

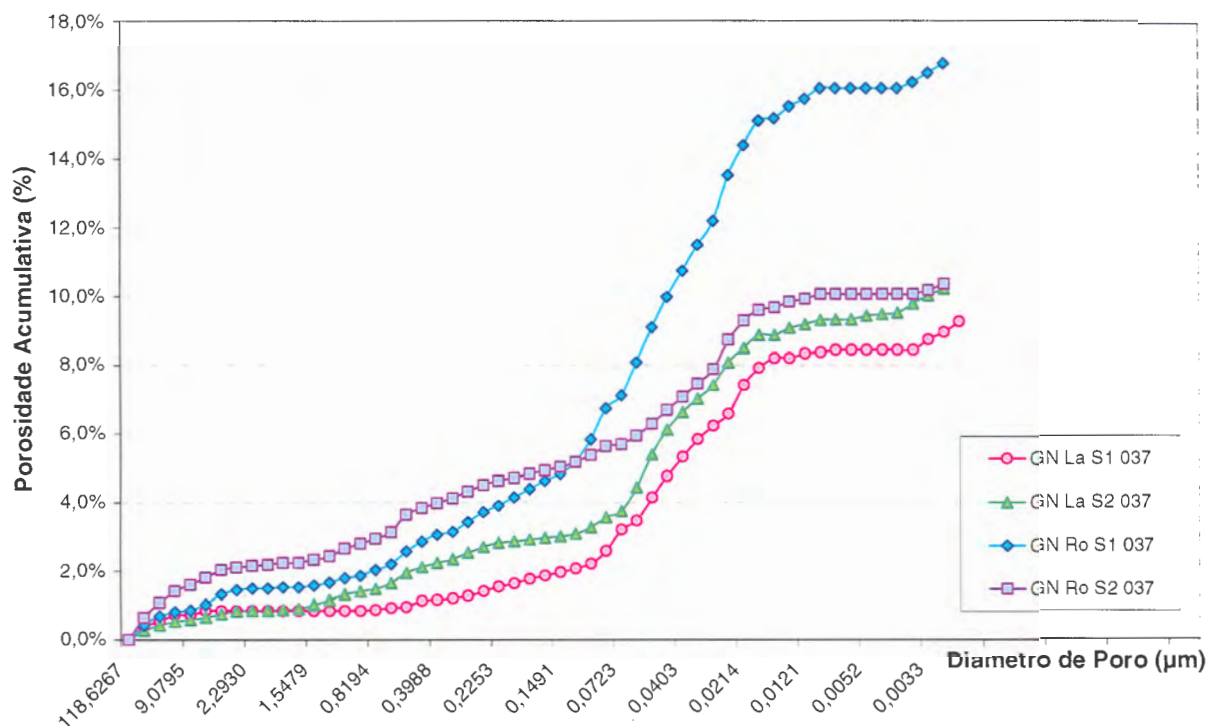


Figura 129: gráfico “diâmetro de poro x porosidade acumulativa” - comparativo.

Pode ser notado na Figura 129, que a porosidade da amostra GN Ro 037 S1 é a maior dentre as amostras ensaiadas, enquanto que a amostra GN La 037 S1 tem a menor porosidade acumulativa.

Na Tabela 56 a seguir estão resumidos alguns dados que podem ser observados nos gráficos anteriores: a porosidade (valor total no gráfico diâmetro de poro x porosidade acumulativa), o volume de poros abertos da amostra (valor máximo de volume de intrusão - V_m - no gráfico diâmetro de poro x volume acumulativo) e o diâmetro médio dos poros (diâmetro de poros para $V_m/2$).

Tabela 56: tabela resumo dos dados do ensaio de porosimetria de mercúrio.

Amostra	Porosidade (%)	Volume de poros abertos (mL/g)	Diâmetro médio dos poros (μm)
GN Ro 037 S1	16,78	0,0465	0,0513
GN Ro 037 S2	10,37	0,0446	0,0926
GN La 037 S1	9,26	0,0392	0,0508
GN La 037 S2	10,22	0,0447	0,0518

Observa-se que a amostra que apresentou a maior porosidade foi a GN Ro 037 S1. Este resultado é coerente, pois esta amostra foi moldada sem aditivo plastificante, com a menor relação a/c e com o agregado de forma mais angulosa, o que resultou na menor consistência medida (153 mm). Esta argamassa seca proporciona uma moldagem difícil, o que pode justificar a maior porosidade. Quando se introduz o plastificante na mesma argamassa (GN Ro 037 S2), tem-se uma consistência bem mais elevada (332 mm), melhor adensamento e redução na porosidade.

Quando se analisa a argamassa GN La 037 S1, com a mesma relação a/c (ou seja, mesmas quantidades de água e de cimento empregadas) do que a amostra GN Ro 037 S1, só diferindo pela forma do grão (conseqüentemente, nesta série, também pela consistência), tem-se menor porosidade (9,26%). Isto porque a forma do grão possibilita uma maior consistência (185 mm – valor mais próximo da consistência considerada ideal pela NBRI: 225 mm), o que possibilita melhor arranjo e diminuição dos vazios.

Comparando-se as amostras GN Ro 037 S2 e GN La 037 S2, de mesma consistência, somente diferindo na forma do grão, as porosidades medidas são bastante próximas.

Em suma, a porosidade nas argamassas moldadas para o ensaio da ASTM C 1260 pode ter relação direta com a consistência das mesmas. Exceção ao raciocínio se faz quando se compara as amostras GN La 037 S1 e GN La 037 S2, em função de que, se acredita que possam ter ocorrido problemas em algum dos dois ensaios. A argamassa GN La 037 S2, por ter maior consistência, deveria exibir menor porosidade que a GN La 037 S1.

Uma provável explicação para o fato pode ser a incorporação de ar que se deu por ocasião do acréscimo de aditivo. Esta incorporação de ar faz surgir vazios um pouco maiores que os vazios capilares, e isto se reflete na porosidade total.

Quando se compara as porosidades com as expansões aos 182 dias de idade, tem-se uma boa correlação ($R^2 = 0,8725$). O gráfico da Figura 130 demonstra esta correlação. Quando a amostra GN La 037 S2 é retirada da correlação, o valor de R^2 se eleva para 0,9887. Na correlação com as expansões aos 28 dias o valor de R^2 é igual a 0,8001.

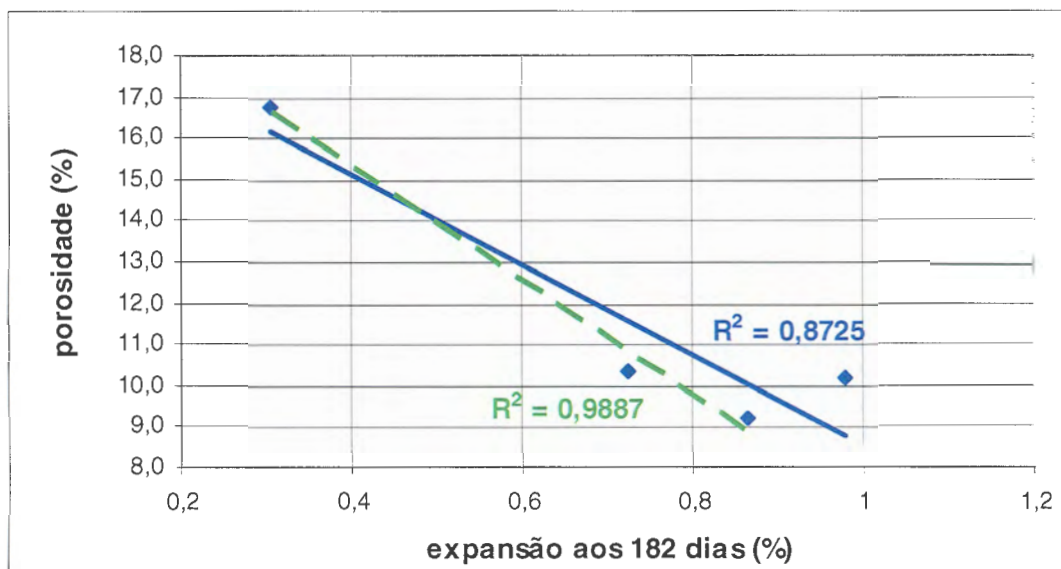


Figura 130: correlação entre a porosidade e as expansões aos 182 dias de idade.

Para se fazer uma melhor análise dos resultados deste ensaio, cabe observar não só a porosidade total, mas também o tamanho e a distribuição dos poros. MEHTA e MONTEIRO (1994), ao discorrerem sobre a estrutura do concreto, discutem sobre os vários tipos de vazios e o significado da presença destes na pasta.

Os vazios de tamanho menor, como os espaços interlamelares no C-S-H, contribuem para a retração por secagem e para a fluência. Já os vazios de tamanho maior, como os capilares e os vazios de ar incorporado e aprisionado, afetam negativamente a resistência e a impermeabilidade da pasta. Segundo os autores, os vazios capilares maiores que 50 nm, chamados de macroporos, são os mais prejudiciais quanto a estas propriedades.

Ainda de acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), existe uma relação direta entre a permeabilidade da pasta e o volume de poros maiores que cerca de 100 nm.

Para analisar os tamanhos de poros de cada argamassa estudada, é necessário lançar mão dos dados de porosidade incremental, ou seja, os valores de porosidade de acordo com o diâmetro dos poros. Isto pode ser observado na Tabela 57, onde os dados estão apresentados, e nos gráficos das figuras a seguir (Figura 131 e Figura 132).

Tais gráficos correlacionam a porosidade correspondente a cada tamanho de poro, e estão agrupados para fins comparativos entre argamassas com agregado de mesma moagem (na Figura 131 as amostras GN Ro 037 S1 e S2, e na Figura 132 as amostras GN La 037 S1 e S2).

Tabela 57: dados da porosidade incremental por diâmetro de poro.

GN La S1 037		GN La S2 037		GN Ro S1 037		GN Ro S2 037	
Diâmetro de poro (μm)	Porosidade incremental (%)	Diâmetro de poro (μm)	Porosidade incremental (%)	Diâmetro de poro (μm)	Porosidade incremental (%)	Diâmetro de poro (μm)	Porosidade incremental (%)
118.7518	0.0000	118.6267	0.0000	119.3815	0.0000	118.6267	0.0000
36.2800	0.3891	36.2216	0.2795	36.2099	0.4316	36.3151	0.6440
18.1781	0.1820	18.1751	0.1526	18.1663	0.2594	18.1722	0.4645
12.1141	0.1820	12.1194	0.1018	12.1128	0.1299	12.1115	0.3101
9.0832	0.0000	9.0788	0.0509	9.0810	0.0866	9.0795	0.2070
7.2611	0.1300	7.2616	0.0764	7.2630	0.1731	7.2453	0.2070
6.0480	0.0000	6.0489	0.1018	6.0463	0.3025	6.0470	0.2070
3.0835	0.0000	2.6358	0.0764	2.5966	0.1299	2.6950	0.0777
2.8852	0.0000	2.2846	0.0509	2.2940	0.0433	2.2930	0.0518
2.3085	0.0000	2.1976	0.0000	2.1982	0.0000	2.2076	0.0000
2.2036	0.0000	1.9376	0.0255	1.9296	0.0433	1.9464	0.0518
1.9526	0.0000	1.8660	0.0255	1.8666	0.0000	1.8683	0.0000
1.8617	0.0000	1.5433	0.1272	1.5317	0.0433	1.5479	0.0777
1.5425	0.0000	1.2777	0.1272	1.2838	0.0433	1.2819	0.1295
1.2807	0.0000	1.0297	0.1780	1.0334	0.1731	1.0340	0.2070
1.0299	0.0260	0.9051	0.0764	0.8954	0.0866	0.9029	0.1553
0.9041	0.0260	0.8175	0.0764	0.8160	0.1299	0.8194	0.1812
0.8211	0.0260	0.7206	0.1526	0.7205	0.1731	0.7203	0.2070
0.7169	0.0260	0.5179	0.3048	0.5143	0.3886	0.5157	0.5415
0.5176	0.1820	0.4513	0.1780	0.4490	0.3025	0.4507	0.2070
0.4541	0.0521	0.3995	0.1272	0.3971	0.2163	0.3988	0.1553
0.4028	0.0521	0.3588	0.1018	0.3616	0.1299	0.3601	0.1553
0.3624	0.0781	0.2994	0.2034	0.3024	0.3025	0.3002	0.2070
0.3024	0.1300	0.2549	0.1526	0.2596	0.2594	0.2578	0.2070
0.2596	0.1300	0.2226	0.1272	0.2260	0.2594	0.2253	0.1295
0.2269	0.1041	0.1988	0.0509	0.1993	0.2594	0.2010	0.1295
0.1993	0.1300	0.1790	0.0509	0.1782	0.2594	0.1787	0.1036
0.1795	0.1041	0.1614	0.0509	0.1613	0.2594	0.1616	0.1036
0.1622	0.1041	0.1490	0.0509	0.1484	0.2163	0.1491	0.1036
0.1494	0.1041	0.1281	0.0764	0.1280	0.3886	0.1277	0.1553
0.1284	0.1560	0.1007	0.2034	0.1003	0.7743	0.1008	0.2586
0.1008	0.3891	0.0787	0.3048	0.0785	1.0297	0.0789	0.2844
0.0788	0.6469	0.0725	0.2034	0.0725	0.3886	0.0723	0.0777
0.0725	0.2857	0.0603	0.7586	0.0605	1.1146	0.0606	0.2586
0.0604	0.7239	0.0517	1.0588	0.0518	1.1993	0.0518	0.3874
0.0519	0.6726	0.0454	0.8088	0.0453	1.0722	0.0454	0.4645
0.0454	0.5954	0.0404	0.6078	0.0402	0.9447	0.0403	0.4388
0.0403	0.5697	0.0363	0.4565	0.0363	0.9447	0.0363	0.4388
0.0362	0.4408	0.0330	0.4313	0.0330	0.8596	0.0330	0.4902
0.0329	0.4150	0.0263	0.7586	0.0263	1.7464	0.0263	1.0010
0.0263	0.9544	0.0213	0.5070	0.0214	1.1569	0.0214	0.6696
0.0214	0.5697	0.0173	0.4313	0.0173	0.9872	0.0173	0.3874
0.0173	0.3374	0.0165	0.0000	0.0165	0.0433	0.0165	0.0777
0.0165	0.0000	0.0140	0.2542	0.0140	0.4746	0.0140	0.2328
0.0140	0.1820	0.0121	0.1526	0.0121	0.3025	0.0121	0.1036
0.0121	0.0260	0.0091	0.1526	0.0091	0.4316	0.0091	0.1812
0.0091	0.0781	0.0073	0.0255	0.0073	0.0000	0.0073	0.0000
0.0073	0.0260	0.0061	0.0000	0.0061	0.0000	0.0061	0.0000
0.0061	0.0000	0.0052	0.1018	0.0052	0.0000	0.0052	0.0000
0.0052	0.0000	0.0045	0.0509	0.0045	0.0000	0.0045	0.0000
0.0045	0.0000	0.0040	0.0509	0.0040	0.0000	0.0040	0.0000
0.0040	0.0000	0.0036	0.3301	0.0036	0.2594	0.0036	0.0000
0.0036	0.3633	0.0033	0.2795	0.0033	0.3886	0.0033	0.1295
0.0033	0.2598	0.0030	0.2542	0.0030	0.3886	0.0030	0.2328
0.0030	0.3633	-	-	-	-	-	-

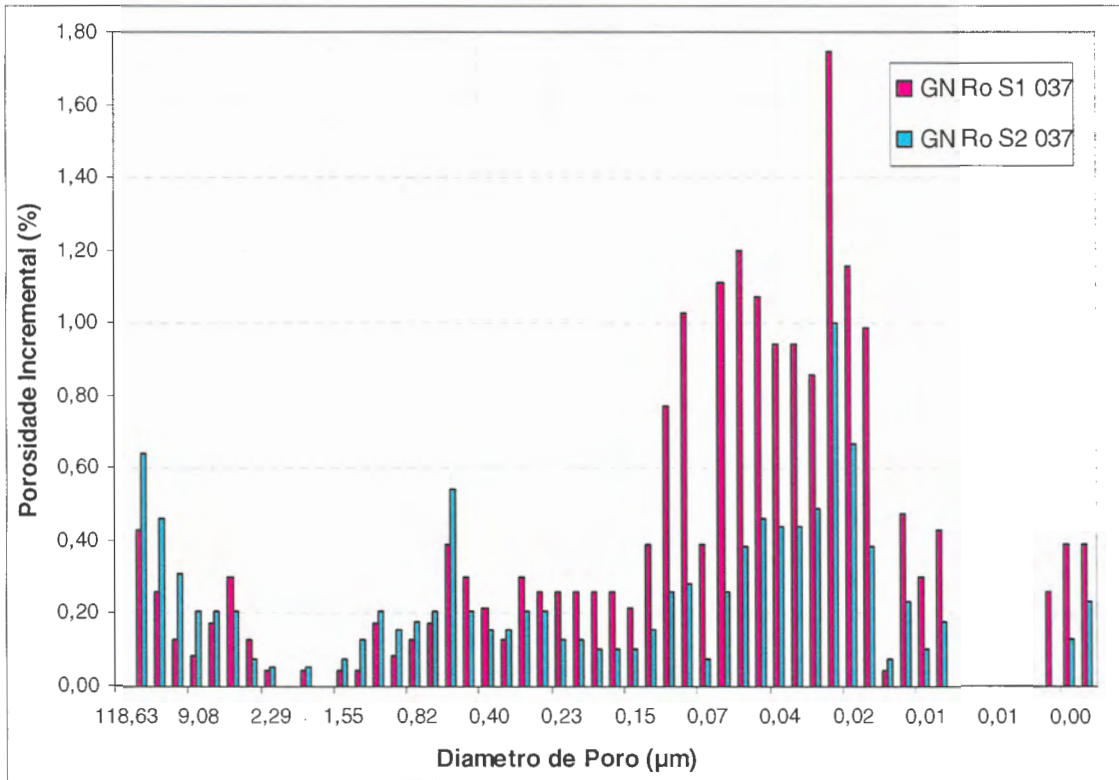


Figura 131: gráfico “diâmetro de poro x porosidade incremental” das amostras GN Ro 037 S1 e GN Ro 037 S2.

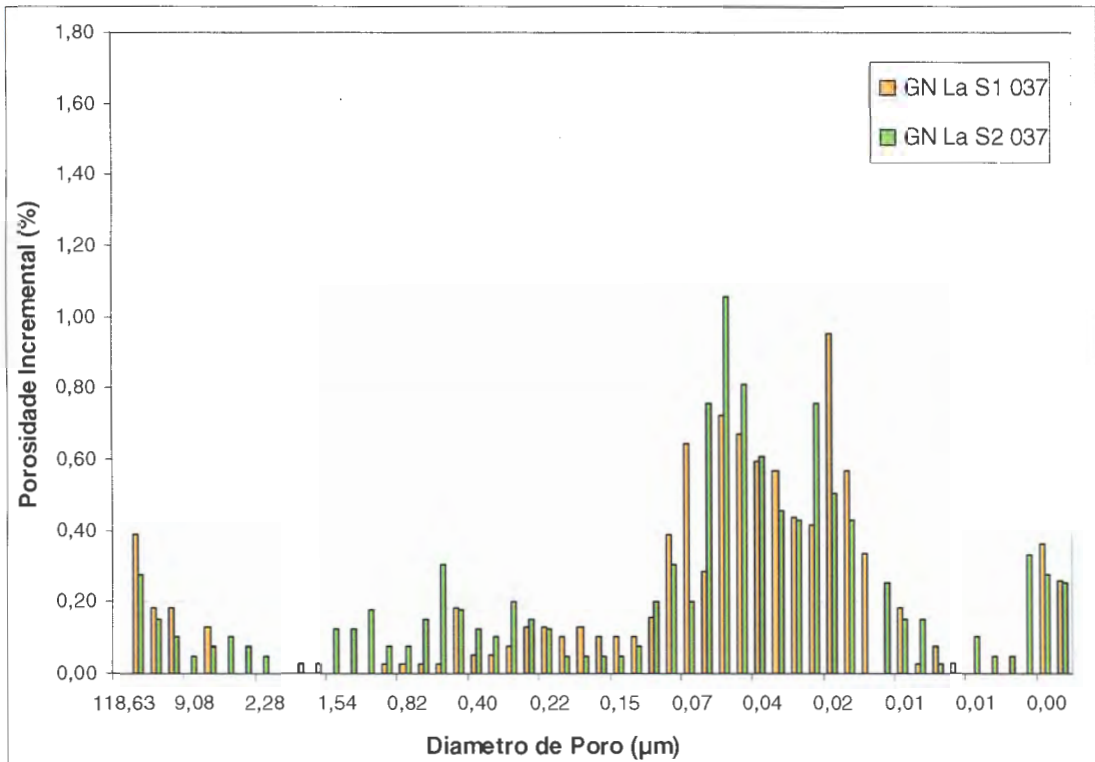


Figura 132: gráfico “diâmetro de poro x porosidade incremental” da amostra GN La 037 S1 e GN La 037 S2.

Observa-se nos gráficos das figuras anteriores (Figura 131 e Figura 132), que as porosidades das amostras moídas em moinho de rolos são visivelmente maiores que das amostras moídas em Abrasão Los Angeles, principalmente a amostra GN Ro 037 S1.

Além desta primeira análise visual, pode ser feito um comparativo entre as 4 argamassas ensaiadas, em função das faixas de tamanho de poro que são consideradas de maior influência na permeabilidade e na resistência de pastas de cimento Portland.

Segundo os valores citados por MEHTA e MONTEIRO (1994), podem ser feitos comparativos por dois critérios: pelos chamados macroporos, com diâmetros maiores que 50 nm ($0,05 \mu\text{m}$), e pelos poros com diâmetros maiores que 100 nm ($0,1 \mu\text{m}$). Empregando os valores da Tabela 57, obtêm-se os valores dados a seguir, na Tabela 58, que podem ser melhor visualizados no gráfico da Figura 133.

Tabela 58: porosidade incremental em função dos diâmetros dos poros.

Amostra	Porosidade incremental relativa aos poros de diâmetro maior que 50 nm (%)	Porosidade incremental relativa aos poros de diâmetro maior que 100 nm (%)
GN Ro 037 S1	11,07	6,27
GN Ro 037 S2	7,11	5,64
GN La 037 S1	5,03	2,70
GN La 037 S2	6,49	3,36

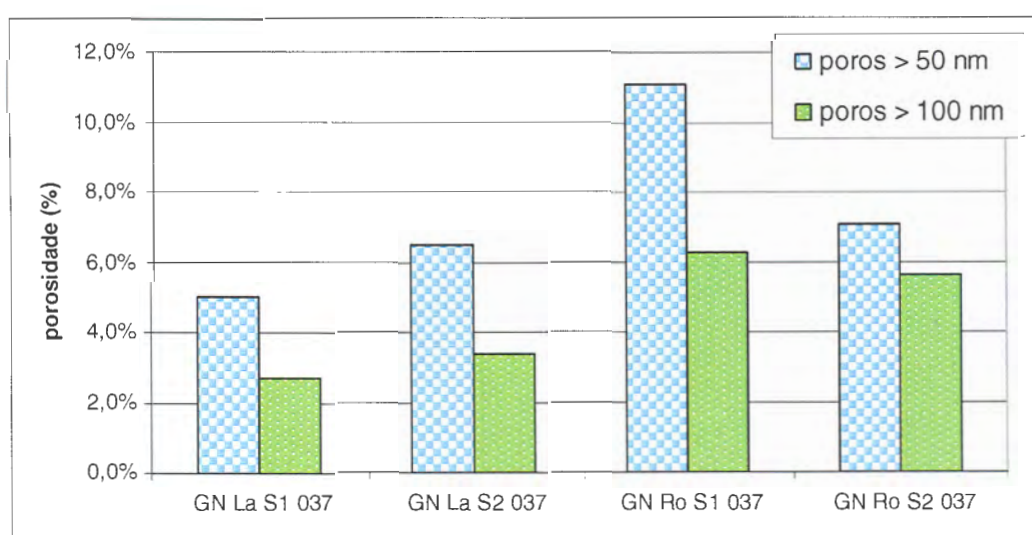


Figura 133: análise da porosidade das argamassas em função de dois critérios de tamanho de poro.

Observa-se que, tanto pelo critério dos poros maiores que 50 nm quanto pelo critério dos poros maiores que 100 nm, os resultados são os mesmos. A argamassa que possui maior quantidade de poros maiores, os que influenciam na permeabilidade e na resistência, é a argamassa GN Ro S1 037.

Quando se compara as duas argamassas moldadas com o agregado moído no moinho de rolos (GN Ro S1 037 e GN Ro S2 037), observa-se que o acréscimo de aditivo faz com que a porosidade diminua, em função do aumento da consistência e melhor processo de adensamento.

As duas argamassas moldadas com aditivo (GN Ro S2 037 e GN La S2 037) possuem porosidades semelhantes, embora a amostra GN Ro S2 037 ainda seja um pouco mais porosa, provavelmente pela forma desfavorável do grão.

Comparando-se as duas amostras moídas no Los Angeles, a amostra com aditivo (GN La S2 037) tem porosidade um pouco maior que a sem aditivo. Como comentado anteriormente, isto pode se dever ao fato de que as duas possuem boa trabalhabilidade, entretanto a argamassa com aditivo incorporou ar. Os indícios de que este raciocínio esteja correto estão na Figura 132. Nota-se que a amostra GN La S1 037 não possui poros na faixa de 1 a 10 μm , enquanto que a amostra com aditivo (GN La S2 037) os tem. Estes poros já saem da faixa de poros capilares e entram na faixa de poros de ar incorporado. É possível que sejam estes tamanhos de poros que fazem a diferença nos valores da Tabela 58.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente observou-se que há uma mudança significativa na forma do grão de acordo com a moagem. A moagem através de moinho de rolos resultou em uma forma de grão mais angulosa, enquanto que a moagem através do equipamento de Abrasão Los Angeles resultou em formas mais arredondadas, com a moagem no moinho de mandíbulas apresentando forma intermediária.

A variação no índice de forma dos grãos de agregado sujeitos a diferentes moagens é grande (há diferenças de 200% a 300% entre os índices de forma dos dois extremos), bem como na superfície específica. A informação visual passada ao observador, que foi registrada através de microscópio ótico, é comprovada por meio destes dois ensaios.

Cabe lembrar que foram empregados nesta tese apenas três tipos de moagem, para reproduzir alguns dos meios mais utilizados para tal fim. Existem diversos outros tipos de moinhos empregados para este processo, como o moinho de martelo, por exemplo.

Como o ensaio da ASTM C 1260 é relativamente simples de ser executado, não requerendo aparelhagem muito sofisticada, ele pode ser realizado até mesmo em laboratórios de pequeno porte. Em laboratórios de institutos de pesquisa, comumente se dispõe de maior aparelhagem para preparo de amostras. Em grandes universidades, é usual contar com o apoio de laboratórios do curso de Geologia, onde estão disponíveis diversos tipos de britadores para redução de amostras rochosas. Entretanto, em laboratórios de menor porte, qualquer processo poderá ser usado para moagem da amostra a ser ensaiada, uma vez que a ASTM C 1260 deixa em aberto esta questão.

Pode causar estranheza em outros países que seja usado, por exemplo, o aparelho de Abrasão Los Angeles para britar a amostra para ensaio de reação álcali-agregado. Entretanto, é um

aparelho bastante comum em laboratórios de Geotecnia e em laboratórios de Pavimentação, o que o torna mais acessível para tal fim em países em desenvolvimento como o Brasil.

Outra questão a ser abordada é a quantidade de amostra necessária para reduzir o agregado nas frações exigidas para o ensaio. De acordo com o tipo de rocha, mudam as características físicas, tais como a dureza e a resistência ao desgaste. Alguns processos de moagem geram maior quantidade de pó (fração passante na peneira 0,075 mm), o que é desprezado para o ensaio. Deste modo, dependendo do processo de moagem e do tipo de rocha, pode ser necessário o dobro da quantidade de amostra para preparo do material a ensaiar. Isto pode ser importante na especificação da coleta da amostra para ensaio.

O primeiro ponto a ser constatado, desta forma, é que há diferença significativa entre as formas dos grãos de agregado moídos de diferentes formas. Embora isto já seja conhecimento consolidado no meio técnico, foi comprovada numericamente esta diferença para alguns tipos de britagem mais conhecidas para este fim.

O segundo ponto a ser considerado é que a diferença de forma do grão faz com que existam diferenças consideráveis nas consistências das argamassas moldadas com mesma relação a/c, principalmente entre as argamassas moldadas com o agregado britado em moinho de rolos e em Abrasão Los Angeles. Isto pode ser observado na série S1, onde as argamassas foram moldadas com mesma relação a/c, entretanto apresentando diferentes consistências (Tabela 7). A maior diferença encontrada entre as consistências foi entre as argamassas moldadas com a amostra GP, de relação a/c 0,37: a diferença entre a amostra moída no moinho de rolos e em Abrasão Los Angeles chega a 30%.

Em terceiro lugar, observa-se que, a esta diferença de consistências entre argamassas, corresponde uma diferença nas expansões do ensaio da ASTM C 1260. A diferença entre as expansões da série S1 foi mais pronunciada para a rocha GN, depois para a rocha GP e menos significativas para a rocha BR. Ou seja, de acordo com o tipo de rocha a variação de comportamento de acordo com a mudança na forma do grão pode ser maior ou menor.

A amostra GN, por exemplo, que mais apresentou variações nas expansões em idades mais avançadas, poderia ser classificada de 3 formas diferentes quando analisada aos 16 dias, sendo que para a relação a/c 0,37 e moagem em moinho de rolos, até mesmo aos 28 dias o comportamento seria classificado como inócuo. Entretanto, foi a rocha que mais apresentou expansão em idades mais avançadas. Isto quer dizer que a amostra que poderia ser Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado.

inicialmente classificada pela ASTM C 1260 como a menos reativa, revela o comportamento mais reativo dentre as três, quando são analisadas idades mais avançadas. A amostra classificada como inócua (GN) exibe expansões de até 0,9% aos 182 dias, enquanto que, na mesma idade, a amostra classificada como potencialmente reativa (GP) apresentou expansões máximas de aproximadamente 0,6%, e a classificada como reativa (BR), de 0,3%.

Neste ponto, questiona-se o que é mais importante: se a classificação imediata do agregado em um ensaio acelerado, ou então a previsão do comportamento deste agregado em obra, em condições reais de exposição. A rocha BR ensaiada pelas condições da ASTM C 1260 apresenta, aos 16 dias, a quase totalidade da expansão aos 182 dias (0,3%), enquanto que a rocha GN, aos 16 dias, exibe menos que 0,2% de expansão, porém aumenta em quase 300% este valor aos 182 dias. Não restam dúvidas sobre em qual das duas o comportamento em campo seria mais danoso: a que exibiria maiores fissurações na estrutura, em função de maiores expansões, ou seja, a amostra GN.

Tal raciocínio é justificado também pela análise petrográfica das rochas em questão. A amostra GN, visualmente classificada no início como um granito, na verdade é um granulito cataclasado. O metamorfismo presente nesta rocha é o que dá a ela o caráter mais expansivo que o granito GP. Ambas possuem quartzo com extinção ondulante, mas a amostra GN, em função do metamorfismo, apresenta foliação milonítica, biotita orientada e minerais fraturados, evidentes indícios de comportamento potencialmente mais expansivo. Quando a rocha foi britada, estas falhas nos minerais ficaram ainda mais expostas, propiciando maior contato destes com os álcalis, potencializando deste modo a reação. Observou-se também que não houve estabilização das expansões até a idade final adotada, ou seja, ainda havia potencial para expansões. Já o basalto estudado possuía apenas 5% de vidro vulcânico, o que pode explicar o comportamento mais expansivo nos primeiros dias e estabilização das expansões a partir de certa idade, quando já teria sido consumido o vidro vulcânico disponível para reação. A partir de então, mesmo que a fonte de álcalis seja inesgotável, uma das condições para a ocorrência da reação já não existe mais (presença de sílica).

Um importante aspecto pode ser destacado quanto ao observado anteriormente: a variação das expansões de acordo com o tipo do agregado e também da constituição mineralógica deste. Neste trabalho, por causa da mineralogia do basalto vesicular, este apresentou as menores expansões estudadas. Entretanto, em outro trabalho conduzido também com basalto (VALDUGA *et al.*, 2005), porém basalto denso, as diferenças nas expansões foram bastante

acentuadas. Isto ressalta que a análise petrográfica é mesmo uma importante ferramenta auxiliar na verificação da potencialidade reativa do agregado. Ela pode dar indícios não apenas da reatividade do material, como sinalizar comparativamente qual tipo será mais expansivo. Por isso a importância de que seja feita por um profissional experiente e analisada cuidadosamente.

Quando a consistência não influencia mais nos comparativos entre as expansões, caso da série S2, observa-se que ainda assim há diferenças nas expansões causadas pela forma do grão e pelas relações a/c. Na maioria dos casos, as expansões mais elevadas ocorreram nas amostras moídas em Abrasão Los Angeles (La), e com as menores relações a/c (0,37). Entretanto, as diferenças entre expansões são menos acentuadas que na série S1. O mesmo pode ser verificado na série S3, onde a relação a/c variou de forma menos expressiva e a consistência foi mantida constante: as diferenças de expansão entre as amostras moídas de maneiras diferenciadas não foi tão expressiva.

O quarto ponto refere-se, deste modo, à diferença de expansões que é causada pela diferença de relação a/c entre as argamassas. Estas diferenças existem, embora de forma menos acentuada, pois diferentes relações a/c geram diferentes porosidades das argamassas.

Em quinto lugar, conclui-se que as diferenças de expansão podem ser explicadas pelas diferenças de porosidade entre as argamassas. As argamassas mais porosas exibem maior quantidade de vazios, igualmente de maior tamanho. Estes espaços servem para acomodação do gel, fazendo com que a expansão se dê, em um primeiro momento, dentro dos mesmos. Com o gel acomodado dentro dos poros, o aumento na dimensão das barras de argamassa do ensaio da ASTM C 1260 pela expansão do gel fica menos pronunciado.

Isto pode ser constatado quando se observa que as maiores expansões, em geral, foram para as amostras moídas em Abrasão Los Angeles (La), e para as menores relações a/c (0,37). Nestas duas condições as porosidades foram as menores medidas no ensaio de absorção, pois a baixa relação a/c permite a formação de uma matriz mais compacta, e a forma mais arredondada produz uma melhor organização dos grãos dentro da matriz, deixando menos vazios.

Além das diferenças de porosidade medidas no ensaio de absorção, o ensaio de porosimetria por mercúrio foi uma ferramenta útil para comparativo entre os tamanhos dos vazios. Neste caso pôde ser melhor explicada a diferença de porosidade causada pela diferença na forma

dos grãos: a maior porosidade corresponde às argamassas confeccionadas com agregado anguloso (Ro), principalmente quando a consistência não foi acertada com aditivo.

Como sexto ponto analisado, cita-se a análise estatística também como ferramenta importante. Através dela foi possível comprovar que as expansões são significativamente diferentes para diferentes moagens do agregado. Para o fator idade, observou-se que as diferenças de expansão não são significativas nas primeiras idades, ou seja, não é sumamente importante fazer leituras diárias até aproximadamente 7 dias de idade, embora estas leituras delineiem melhor a curva. No caso da amostra de basalto (BR), as leituras também deixam de ser significativas a partir de certa idade (aproximadamente 35 dias).

5.2 CONCLUSÕES

Resumidamente, as principais conclusões desta tese foram que:

- Existe influência da relação a/c nos resultados de expansão por RAA;
- Existe influência da consistência da argamassa, originada pela forma do grão, nos resultados de expansão por RAA;
- A influência da consistência é maior que a influência da relação a/c;
- Existe influência da forma do grão nas expansões por RAA, uma vez que propiciam argamassas de diferentes consistências;
- As maiores expansões são causadas por agregados de grãos com formato mais arredondado e por argamassas com menores relações a/c, pois em ambos os casos têm-se menor porosidade.

Comprovou-se com este trabalho que a norma ASTM C 1260 pode levar a falhas na classificação do agregado quanto à reatividade potencial, dependendo do tipo de agregado e do preparo da amostra para ensaio.

Alguns pontos podem ser adaptados no ensaio para conduzir a resultados mais confiáveis. Para os materiais e as condições empregados nesta pesquisa, pode ser afirmado que:

- a) Uma vez que os comportamentos expansivos são bastante distintos entre diferentes tipos de rocha, a fixação de diferentes limites conforme os tipos geológicos principais pode ser mais acertada. Rochas que apresentam valores menores de expansão aos 16 dias não necessariamente terão comportamento menos expansivo em campo em idades

mais avançadas, e vice-versa. Neste trabalho foram analisados somente basaltos e granitos, e o comportamento exibido foi bastante diferenciado. Na avaliação de gnaisses, quartzitos e outras rochas também comumente empregadas para confecção de concreto no país também podem ser encontrados comportamentos variados. Quando o campo de avaliação deixa de ser as reações do tipo álcali-sílica e álcali-silicato, e passa a ser as reações álcali-carbonato, tem-se ainda outro comportamento, uma vez que o mecanismo de expansão é bastante diverso dos outros tipos de reação. Foi notado neste trabalho que as taxas de expansão para cada tipo de rocha são diferenciadas, pois a forma de crescimento da curva de expansão ao longo do tempo diferiu para as três amostras. Uma classificação dos agregados quanto à reação álcali-agregado que levasse em conta não apenas os limites de expansão em idades determinadas, mas também a taxa de expansão ao longo do tempo, pode ser eficaz para classificar agregados de comportamento lento;

- b) A ASTM C 1260 fixa a relação a/c para moldagem das barras de argamassa que são utilizadas para medição de expansão, enquanto que a NBRI (norma sul-africana) fixa a consistência para uma melhor moldagem. Ambas (relação a/c e consistência) demonstraram ter influência nos resultados de expansão, entretanto com a consistência fixa estas diferenças são menos acentuadas. Argamassas de baixa consistência, por serem de difícil moldagem, podem apresentar vazios em excesso, e isto pode conduzir a resultados falso-negativos. Deste modo, fixar não apenas a relação água/cimento, sem dúvida um parâmetro essencial, mas também uma faixa de consistência para a argamassa, se faz importante. Sugere-se, com base nos resultados desta tese e também de pesquisas anteriores da autora, que seja mantida a relação a/c fixa de 0,47, mas que a consistência também seja verificada. Valores entre 250 mm e 300 mm no ensaio da mesa de consistência correspondem a uma argamassa trabalhável, geralmente sem exsudação e de fácil moldagem. Uma consistência de 250 mm poderia ser adotada como valor mínimo, sendo que, em caso de verificação de consistência menor, esta seria modificada pelo acréscimo de aditivo plastificante;
- c) E, o mais importante: se faz necessário fixar uma forma de moagem do agregado para preparo da amostra a ser ensaiada pela ASTM C 1260. Esta fixação da forma de moagem pode ser feita a partir de três pontos de vista:
- fixar uma moagem que induza a um comportamento mais intenso quanto às expansões (maiores valores), com a finalidade de simular a pior situação possível.

Neste caso, a recomendação seria a adoção da britagem em Abrasão Los Angeles (forma La), pois na maioria dos casos foi a que conduziu aos maiores valores de expansão;

- fixar um tipo de britador mais comum em laboratórios de ensaio, de modo a apenas uniformizar os ensaios nos laboratórios do país. Em geral, o britador mais fácil de ser encontrado em laboratórios é o britador de mandíbulas, por ser de pequeno porte;
- ou ainda tentar buscar algum tipo de correlação entre britagem e comportamento de expansão, em campo e em laboratório. Também neste caso, o britador adotado poderia ser o de mandíbulas, pois na maioria das vezes este tipo de britador é utilizado ao menos como britador primário, para a redução dos blocos de rocha em fragmentos menores, sendo posteriormente adotados outros tipos como britadores secundários e terciários. Some-se a isto o fato de que, em geral, não se consegue dar às partículas de agregado britado uma forma tão arredondada como o agregado toma quando britado em Abrasão Los Angeles; assim como também não se deseja agregados com forma tão lamelar como os britados em moinhos de rolos, pois dão origem a concretos mais ásperos, com menor trabalhabilidade e, possivelmente menores resistências. A forma intermediária obtida com o britador de mandíbulas pode ser a mais correlata com a forma real do agregado britado.

Vale observar que, mesmo entre britadores de mandíbulas de diferentes laboratórios pode existir diferença. Porém, ainda que não se tenha informações mais consolidadas sobre qual a melhor forma de britar este agregado para ensaio, interferindo da menor forma possível nas variações das condições de campo, fixar um tipo de britagem permitirá que os comparativos de resultados entre laboratórios sejam efetivados com mais segurança.

5.3 RECOMENDAÇÕES

Como sugestões para trabalhos futuros, têm-se alguns pontos a serem comentados:

- inicialmente, faz-se necessário ampliar a quantidade de amostras para delinear melhor estas influências. Utilizar um número maior de amostras e também rochas de diferentes tipos litológicos fará com que se obtenha maior segurança sobre as

- influências existentes entre a forma do grão, a relação a/c e a consistência sobre as expansões devido à reação álcali-agregado;
- outros tipos de moinhos também poderão ser empregados para observar a variação na forma dos grãos e, desta forma, das consistências das argamassas e das expansões das mesmas;
 - a realização de um maior número de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio para estudo da porosidade das argamassas se faz desejável. Através de mais resultados deste ensaio, dados importantes podem ser acrescentados a esta relação da porosidade com a expansão;
 - um programa interlaboratorial, envolvendo os principais laboratórios capacitados a realizar o ensaio da ASTM C 1260, pode auxiliar na verificação da variabilidade dos resultados, e também no estudo de valores adequados para os coeficientes de variação das leituras.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, T. **Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na Região Metropolitana do Recife.** Disponível em: [http://pcc2526.pcc.usp.br/Arquivos/2007/Aulas/07.03.28Aula5\(2\).pdf](http://pcc2526.pcc.usp.br/Arquivos/2007/Aulas/07.03.28Aula5(2).pdf). Acessado em: 21/08/07, às 16:15 h.

ANDRIOLO, F.R. Documentação sobre o panorama brasileiro. In : SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Relatório Final - Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio - Parte I.** Goiânia, 1999. p. 9-59.

ANDRIOLO, F.R. AAR Dams Affected in Brazil - Report on the Current Situation. In : International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 11., 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 1243-1252.

ARMELIN, J.L. e PAULON, V.A. Análise e diagnóstico de barragem apresentando reação deletéria. In : CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, IV, 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1997. p. 197-202.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389:** Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 9773:** Agregados - Reatividade potencial de álcalis em combinações cimento/agregado. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9774:** Agregados - Verificação da reatividade potencial pelo método químico. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10340:** Agregados - Avaliação da reatividade potencial das rochas carbonáticas com os álcalis do cimento. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **Projeto 18:200.01-001 – Agregados – Reatividade álcali-agregado.** Rio de Janeiro, 2007.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS - American Society For Testing And Materials. **ASTM C - 289/03** : Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method). Philadelphia, 2003. Section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrete and aggregates), p. 156-162.

_____. **ASTM C - 856/95** : Standard practice for petrographic examination of hardened concrete. Philadelphia, 1997. Section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrete and aggregates), p. 406-420.

_____. **ASTM C - 1260/07** : Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 2007. Section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrete and aggregates), p. 647-650.

_____. **ASTM C - 1293/06** : Standard test method for concrete aggregates by determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. Philadelphia, 2006. Section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrete and aggregates), p. 651-656.

BATIC, O.R.; MILANESI, C.A. Effects of alkali-silica and alkali-carbonate rock reaction on aggregate-mortar bond. In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 1-10.

BÉRUBÉ, M.A.; FRENETTE, J. Testing concrete for AAR in NaOH and NaCl solutions at 38° C and 80° C. **Cement and Concrete Composites**, UK, n. 1, v. 16, p. 189-198, 1994.

BLIGHT, G.E., ALEXANDER, M.G., RALPH, T.K. and LEWIS, B.A. Effect of alkali-aggregate reaction on the performance of a reinforced concrete structure over a six-year period. In: **Magazine of Concrete Research**. 41, n. 147, p. 69-77, 1989.

BLIGHT, G. E.; BALLIM, Y. Properties of AAR-affected concrete studied over 20 years. In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11, 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 1109-1118.

BROEKMANS, M.A.T.M. Structural properties of quartz and their potential role for ASR. In: **Materials Characterization**, USA, v.53, p. 129-140, 2004.

CHATTERJI, S., THAULOW, N., JENSEN, A.D. Studies of alkali-silica reactions: part 6. Practical implications of a proposed reaction mechanism. In: **Cement and Concrete Research**, USA, v. 18, p. 363-366, 1988.

DAVIES, D., OBERHOLSTER, R.E. Alkali-silica reaction products and their development. In: **Cement and Concrete Research**, USA, v. 18, p. 621-635, 1988.

DENG, M.; TANG, M. Mechanism of desdolomitization and expansion of dolomitic rocks. In: **Cement and Concrete Research**, USA, v. 23, n. 6, p. 1397-1408, 1993.

DIAMOND, S. Alkali reactions in concrete pore solutions effects. In : **Internacional Conference Alkalis in Concrete**, 6., 1983. Idorn G. M. and Rostam S. eds., p. 155 - 156.

DIAMOND, S. The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. In: **Cement and Concrete Composites**, n. 26, p. 919-933, 2004.

DURAND, B. Long-term monitoring results of concrete electrical tower foundations affected by ASR and repaired with different products and repair methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11, 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 1049-1051.

FARIAS, L. A.; HASPARYK, N. P.; ANDRADE, M. A. S. Estudo Preliminar de diferentes bases de aditivos e adições na Raa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves, Brasil. **Anais...**Bento Gonçalves, 2007.

FERRARIS, C.F. Alkali-silica Reaction and High Performance Concrete. Disponível em: <<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build95/art004.html>>. Acesso em: 25 fev. 2005, às 14:21 h.

FONTOURA, J.T.F. Investigações sobre a reação álcali-agregado - metodologias e ensaios. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Relatório Final - Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio - Parte II - Tema I**. Goiânia, 1999. p. 65-80.

FORSTER, S.W. State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity. In: **ACI Committee Report 221.1R**, p. 1-31, 1998.

FOURNIER, B., BERUBÉ, M.A., THOMAS, M.D.A., FOLLIARD, K.J. Mitigation of the effect of Alkali-Silica Reaction in Concrete Structures: a review. In: INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING, IV, 2005, Olinda - PE. **Anais...** Olinda, 2005. p. 1-20.

FREITAG, S.A.; ST JOHN, D.A.; GOGUEL, R. ASTM C1260 and the alkali reactivity of New Zealand greywackes. In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 305-313.

FRENCH, W.J. The characterization of potentially reactive aggregates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTIONS, 9, 1992, London, England. **Anais ...** England, 1992. p. 338-346.

GALLO, G.; SANCHEZ, L.; MEDEIROS, M.; ANDRADE, T. Medidas preventivas para a reação álcali-agregado (RAA) no concreto. In: **Concreto & Construções – Revista do Instituto Brasileiro do Concreto**, Ano XXXIV, n. 46, p. 22-28, 2007.

GRATTAN-BELLEW, P.E. Microcrystalline quartz, undulatory extinction and the alkali-silica reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTIONS, 9, 1992, London, England. **Anais ...** England, 1992. p. 388-394.

GRATTAN-BELLEW, P.E. A critical review of ultra-accelerated tests for alkali-silica reactivity. In: **Cement and Concrete Composites**. N. 19, p. 403 – 414, 1997.

GRATTAN-BELLEW, P.E; MITCHELL, L. Preventing Concrete Deterioration Due to Alkali-Aggregate Reaction. In: **Construction Technology Update**. N. 52. Disponível em: <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca> Acessado em: 10 jun. 2007, às 14:40 h.

GOGTE, B.S. An evaluation of some common Indian rocks with especial reference to alkali-aggregate reactions. In: **Engineering Geology**, V. 7, n. 135, 1973.

GOUVEA, D. **Porosimetria ao mercúrio**. Apostila da disciplina “Técnicas de caracterização de materiais” - PMI – 2201, do curso de Engenharia Química da USP. Disponível em: http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_7_Porosimetria_ao_Mercurio_PMI-2201.pdf. Acessado em: 13/11/07, às 17:44 h.

HASPARYK, N.P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado - efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. 1999. 257 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiânia, Goiânia.

HASPARYK, N.P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HASPARYK, N.P., GONÇALVES, I.N., VEIGA, F.N. Reação álcali-agregado: a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos. In : CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, IV, 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1997.

HASPARYK, N. P.; CAVALCANTI, A. J. C. T.; ANDRADE, W. P. Reação álcali-agregado em barragens. In: **Concreto & Construções – Revista do Insituto Brasileiro do Concreto**, Ano XXXIV, n. 42, p. 38-43, 2006.

HASPARYK, N. P.; MUNHOZ, F.; SANCHEZ, L.; SALLES, F.; HAMASSAKI, L. Efeito dos álcalis e da finura do cimento nas expansões geradas pela reação álcali-agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves, Brasil. **Anais...**Bento Gonçalves, 2007.

HELMUTH, R., STARK, D. Alkali-silica reactivity mechanisms. In : SKALNY, J.; MINDESS, S. **Materials Science of Concrete III**. Estados Unidos : American Ceramic Society, 1992. p. 131-208.

HOOPS, D.W. **Alkali Silica reaction in concrete**. Londres : Ed. Thomas Telford, 1988.

IDORN, G. M.; JOHANSEN, V.; THAULOW, N. Assessment of causes of cracking in concrete. In : SKALNY, J.; MINDESS, S. **Materials Science of Concrete III**. Estados Unidos : American Ceramic Society, 1992. p. 131-208.

KAWAMURA, M.; ARANO, N.; KATAFUTA, K. ASR gel composition, secondary ettringite formation and expansion of mortars immersed in NaCl solution. In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 199-208.

KERRICK, D.M.; HOOTON, R.D. ASR of concrete aggregate quarried from a fault zone: results and petrographic interpretation of accelerated mortar bars tests. In: **Cement and Concrete Research**. V. 22, N. 5, p. 949 – 960, 1992.

KUPERMAN, S. C.; VIEIRA, S. R. S. S.; FERREIRA, W. V. F.; TIBA, R. Tentativas para determinação do término da reação álcali-agregado na estrutura de uma tomada d'água. In : Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 1997. p. 129-136.

KUPERMAN, S. C.; FABBRO, J. C.; CIFÚ, S.; KAKO, H.; TAVARES, F.; FERREIRA, W. V. F.; WERNECK, A. C. A.; SARDINHA, V. L. A. Management of a water intake affected by alkali-aggregate reaction. In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 1323-1332.

- LACASSE, C.; LABOSSIÈRE, P.; NEALE, K.W. On fiber-reinforced polymer rehabilitation of alkali-aggregate reaction-damaged beams. In: **ACI Structural Journal**, V. 100, n.1, p. 66-74, 2003.
- MARUSIN, S. L. Sample preparation – the key to SEM studies of failed concrete. In: **Cement and Concrete Composites**, U.K., v. 17, p. 311 - 318, 1995.
- MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo : Ed. Pini, 1994.
- MONTEIRO, P.J.M.; PREZZI, M. ; SPOSITO, G. The alkali-silica reaction, part I. In: **ACI Materials Journal**, USA, v. 94, n. 1, p. 10-17, jan. 1997.
- MONTEIRO, P.J.M., SHOMGLIN, H.R., WENK, H.R. and HASPARYK, N.P. Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction. In: **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 2, p. 179-183, 2001.
- MORANVILLE-REGOURD, M. Products of reaction and petrographic examination. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTIONS, 8, 1989, Kyoto, Japan. **Anais ... Japan**, 1989. p. 445-456.
- OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G. An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali- Reactivity of Siliceous Aggregates. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 16, n.2, p. 181-189, 1986.
- OLAGUE, C.; LÓPEZ, W.; CASTRO, P. Caracterización de la reactividad potencial de agregados para uso en pavimentos rígidos del estado de Chihuahua, México. In : CONPAT 99, 1999, Montevideo. **Anais...Montevideo**, 1999. p. 1297-1305.
- PAULON, V.A. **Reações álcali-agregado em concreto**. 1981. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da USP , Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PAULON, V. A.; CAVALCANTI, A. Alkali-aggregate reaction at Moxotó Dam. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 7, 1986, Ottawa. **Anais... Ottawa**, 1986. p. 1-5.
- PREZZI, M.; KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P.J.M.; SANTOS, M.C.; ANDRADE, W.P. Importância da química de superfície na reação álcali-agregado. In : Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, 1997, Goiânia. **Anais... Goiânia**, 1997. p. 173-196.
- PRISZKULNIK, S. **Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problemas de reação álcali-agregado**. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Volume 2. Editor: Geraldo C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Alkali-aggregate reaction. In: **Concrete Technology**. Disponível em: www.cement.org/tech/cct_dur_AAR.asp Acessado em: 12 nov. 2007, às 18:00 h.
- SHAYAN, A.; DIGGINS, R. G.; IVANUSEC, I.; WESTGATE, P. L. 1988. Accelerated Testing of Some Australian and Overseas Aggregates for Alkali-aggregate Reactivity. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 18, p. 843 - 851, 1988.

SILVA, C.A.R.; FONTOURA, J.T.F.; SANTOS, M.C.; HASPARYK, N.P. Métodos utilizados na investigação da reação álcali-agregado. In : Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 1997. p. 53-60.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas Usinas Hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso/Chesf – Influência da reação nas propriedades do concreto**. 2007. 220 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVEIRA, J. F. A.; CAVALCANTI, A. J. C. T.; HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M. Investigação da reatividade álcali-agregado e a confiabilidade dos métodos acelerados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 44, 2002, Belo Horizonte, Brasil. **Anais...** Belo Horizonte, 2002.

SWAMY, R. N. Assessment and rehabilitation of AAR-affected structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTIONS, 10, 1996, Melbourne, Austrália. **Anais ...** Austrália, 1996. p. 68-83.

TANG, M., MIN, D., ZHONGZI, X. Comparison between alkali-silica reaction and alkali-carbonate reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11, 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 109-118.

THAULOW, N.; JAKOBSEN, U.H.; CLARK, B. Composition of alkali-silica gel and ettringite in concrete railroad ties : SEM-EDX and X-ray diffraction analyses. In: **Cement and Concrete Research**, USA, v. 26, n. 2, p. 309-318, fev. 1996.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de rochas do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. 2005. Exame de qualificação para obtenção do título de Mestre – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado: mapeamento de agregados reativos no estado de São Paulo**. 2002. 213 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

VALDUGA, L.; SGARBOSSA, F.; DAL MOLIN, D.C.C.; PAULON, V.A. Influência da forma do agregado, da relação água/cimento e da consistência da argamassa na verificação da potencialidade reativa do agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 47, 2005, Recife, Brasil. **Anais...** Olinda, 2005. p. 118-128.

VALVERDE, F. **A mineração de agregados e o desenvolvimento sustentável**. In: I Seminário “A indústria mineral sustentável”, 2006, ANEPAC – Associação Nacional de Produtores de Agregados para Construção Civil, 2006. Disponível em: <http://www.fiepr.org.br/fiepr/conselhos/mineral/uploadAddress/14%20fernando%20valverde%5B21316%5D.pdf> Acessado em: 11 dez. 2007, às 17:00 h.

VEIGA, F.N.; GONÇALVES, I.N.; HASPARYK, N.P. Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidrelétricas. In : Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 1997. p. 69-79.

- VIEIRA, S.R.S.S.; PECCHIO, M.; ABREU, J.V.; FERREIRA, M.C.N.F. Avaliação de diferentes cimentos como inibidores da reação álcali-agregado. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 40., 1996, São Paulo. **Anais...**São Paulo, 1996. p. 579-590.
- VIEIRA, S.R.S.S.; OLIVEIRA, M.A.F. Estudo Petrográfico de alguns agregados brasileiros, com ênfase na avaliação de sua reatividade potencial frente aos álcalis do cimento. In : REIBRAC, 39., 1997, São Paulo. **Anais...**São Paulo, 1997. p. 77-91.
- VIEIRA, S.R.S.S. Investigação das reações álcali-agregado em concreto. In : Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 1997. p. 143-150.
- XU, Z., LAN, X., DENG, M., TANG, M. A new accelerated method for determining the potential alkali-carbonate reactivity. In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. **Anais...** Québec, 2000. p. 129-138.
- WENK, H-R., PANNETIER, J. Texture Development in deformed granodiorites from the Santa Rosa mylonite zone, southern California. **Journal of Structural Geology**, V. 12, n. 2, p. 177 – 184, 1990.
- WENK, H-R.; CHRISTIE, J.M. Comments on the interpretation of deformation textures in rocks. **Journal of Structural Geology**, V. 13, n. 10, p. 1091 – 1110, 1991.

ANEXO A – ANÁLISES QUÍMICA E FÍSICA DO CIMENTO



TIPO: CP V-ARI

RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

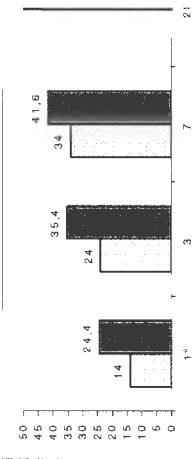
Data	Químicos										Físicos						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega		Blaine	# 200	# 325	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	m m		h : min	h : min				cm 2/g
2																	
3	4,31	18,82	2,57	60,21	5,08	3,26	3,49	1,26	0,72	0,59	0,50	2:10	3:00	4,370	0,20	1,10	
4	4,34	18,83	2,57	60,19	5,04	3,24	3,29	1,65	0,88	0,59	0,50	2:15	3:15	4,300	0,20	1,20	
5																	
6																	
7																	
8	4,33	18,79	2,56	60,35	5,11	3,10	3,31	1,79	0,80	0,58	0,50	2:10	3:00	4,450	0,20	1,70	
9																	
10	4,35	18,92	2,56	60,25	5,16	3,21	3,47	1,82	0,94	0,58	0,50	2:05	3:00	4,410	0,10	1,40	
11																	
12	4,32	18,80	2,56	60,25	5,09	3,25	3,16	1,63	0,96	0,58	1,00	2:10	3:15	4,330	0,09	0,90	
13																	
14																	
15																	
16	4,33	18,88	2,56	60,29	5,22	3,24	3,52	1,68	0,90	0,58	0,50	2:20	3:15	4,320	0,20	1,30	
17																	
18	4,36	18,86	2,56	60,27	5,22	3,28	3,43	1,18	0,98	0,59	0,50	2:20	3:15	4,350	0,20	1,20	
19																	
20																	
21																	
22	4,34	18,80	2,56	60,25	5,23	3,24	3,29	1,71	0,92	0,58	0,50	2:10	3:00	4,460	0,10	1,30	
23																	
24	4,33	18,85	2,58	60,29	5,24	3,27	3,17	1,65	0,50	0,59	1,00	2:15	3:15	4,420	0,07	0,90	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31	4,30	18,92	2,58	60,19	5,11	3,25	3,71	1,68	0,74	0,59	1,00	2:10	3:15	4,480	0,20	1,40	
Média	4,33	18,85	2,57	60,25	5,15	3,23	3,38	1,56	0,83	0,59	0,65	2:12	3:09	4,389	0,16	1,24	
Sd	0,02	0,05	0,01	0,05	0,07	0,05	0,17	0,22	0,15	0,00	0,24	0:04	0:07	0,4	63,67	0,06	0,24
Min	4,30	18,79	2,56	60,19	5,04	3,10	3,16	1,18	0,50	0,58	0,50	2:05	3:00	28,7	4,300	0,07	0,90
Max	4,36	18,92	2,58	60,35	5,24	3,28	3,71	1,79	0,98	0,59	1,00	2:20	3:15	30,1	4,480	0,20	1,70

Obs.: A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI é regida pela NBR 5733,

a qual não estabelece valor mínimo.

A massa específica média do CP V-ARI ITAMBÉ é 3,12 g/cm³ (NBRM 23).

As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.



carimbo/assinatura