

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CÍVIL**

**JOÃO RICARDO PEREIRA DA SILVA**

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO  
AGREGADO**

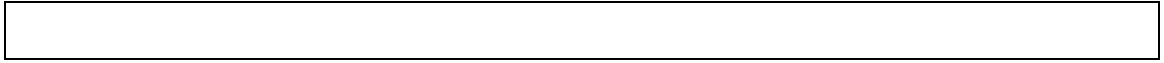
**RECIFE  
2016**

JOÃO RICARDO PEREIRA DA SILVA

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: INFLUÊNCIA DA GRANUMETRIA DO  
AGREGADO**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Tecnologia das Construções, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. Orientadora Professora Maria da Graça de Vasconcelos Xavier Ferreira, PhD.

Recife  
2016



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**CIVIL**

JOÃO RICARDO PEREIRA DA SILVA

**REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO**  
**AGREGADO**

**Comissão Examinadora:**

---

**Prof.<sup>a</sup> Maria da Graça de Vasconcelos Xavier Ferreira, PhD.**

**Orientadora - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP**

---

**Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva.**

**Examinador Interno - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP**

---

**Prof. Dr. Evenildo Bezerra de Melo.**

**Examinador Externo - Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**

Aprovado em 25 de novembro de 2015

## Dedicatória

Aos meus pais (João e Janecy), ao meu irmão Maurício, minha irmã Edjane, minha madrinha Maria e a minha esposa Amanda.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar discernimento, força, saúde e sempre me proteger. Muito obrigado por ter meus pais, existentes e presentes em minha vida, nesse momento tão precioso da minha carreira. Agradeço ao Senhor por permitir a conclusão de mais uma etapa da minha vida e por me ajudar a superar todas as minhas dificuldades.

Aos meus pais, João e Janecy, fontes inesgotáveis de amor, que sempre me apóiam em todas as minhas decisões e rezam por mim todos os dias.

Aos meus irmãos (Edjane e Maurício) aos meus primos (Jaciane, Sérgio e José Herques), por estarem sempre presentes na minha vida participando dos principais momentos de descontração.

À minha esposa, Amanda, por existir em minha vida, pelo amor, paciência e ajuda nos maus e bons momentos; obrigado por compartilhar minhas alegrias e tristezas.

À Universidade Católica de Pernambuco, arrimo de conhecimento de tantos estudantes, por me ajudar na formação de cidadão desde o período da graduação em Engenharia Civil.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, que foram decisivos para meu aprendizado, por estarem sempre à disposição dos alunos, em especial ao professor Fernando Arthur e a professora Eliana Barreto. Gostaria de agradecer ao professor Ângelo Just pelo apoio e incentivo que me foi dado ao longo dos anos.

Agradeço à Professora Maria da Graça por quem tive o privilegio de ser orientado, uma grande amiga, exemplo de vida e pessoa, pelo incansável apoio e contribuição, uma verdadeira disseminadora do conhecimento. Agradeço pela confiança depositada e pelo incentivo à pesquisa.

Aos funcionários da secretaria do Programa de Pós-Graduação em especial ao funcionário Sérgio, pelo apoio e orientação que tanto ajuda a nós, mestrandos.

Ao professor Sérgio Carvalho de Paiva, do laboratório de química da UNICAP, pela amizade e contribuição para os experimentos.

Ao SENAI-PE pela abertura que me foi dada, em especial ao laboratorista Clayton por ter sido fundamental nos experimentos.

À CAPES e ao CNPq pelas bolsas de estudo que me foram concedida, fundamental para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a oportunidade única de fortalecer a minha amizade com o mestre Carlos Vitor que compartilhou da luta, do esforço, do cansaço e da vitória.

Ao programa de pós-graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, na pessoa do professor Evenildo, por contribuir com sua estrutura para a realização da pesquisa.

Aos amigos do Serviço Geológico do Brasil – CPRM – Vanildo pelo incentivo e apoio, a Hismana pela contribuição essencial nos ensaios.

Ao Professor Júlio César – UFPE – pela amizade, acolhimento e incentivo a realização do estudo.

Ao Professor Evenildo de Melo, da UFPE, pela amizade, incentivo e apoio fundamental para a realização das pesquisas e conhecimento repassado.

À TECOMAT pela abertura do laboratório, em especial ao professor Tibério Andrade pela orientação e incentivo. Ao Eng.º Civil Edson Martins pela amizade e acolhimento para realização dos ensaios e ao professor Antônio Carlos de Albuquerque Melo pela amizade, apoio e incentivo.

Ao CETENE pela realização dos ensaios no MEV.

A POLIMIX-Olinda por fornecer o cimento.

Ao Eng.º Químico Sidney Clay Santos, da empresa MIZU, por ter disponibilizado os ensaios do cimento.

“Não importa se você pensa que pode ou se acha que não pode; de qualquer forma você está certo”.

HENRY FORD



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Tipos de cimentos produzidos no Brasil e respectivos teores de adições. ....	65
Tabela 3.2 - Características físicas do cimento. ....	66
Tabela 3.3 - Característica química do cimento. ....	66
Tabela 3.4 - Granulometria e quantidade do agregado miúdo para moldagem da amostra padrão. ....	68
Tabela 3.5 - Variação das expansões das amostras ....	68
Tabela 4.1 – Expansões das amostras de argamassa aos 30 dias. ....	78
Tabela 4.2 - Resumo (ANOVA: Fator único). ....	79
Tabela 4.3 - Análise de variância da influência da granulometria (A, B, C, D e E) nas expansões.....	79
Tabela 4.4 - Variação das expansões das amostras. ....	81
Tabela 4.5 - Expansões médias aos 30 dias e classificação das amostras. ....	81
Tabela 6.1 - Variação dimensional por idade em dias da amostra D .....	113

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1- Bloco de fundação de um edifício comercial localizado na RMR (Andrade, 2006). .....	28
Figura 2. 2 - Fissuras internas na Barragem de Hiwassee- Estados Unidos (ANDRIOLO, 1997). .....	30
Figura 2.3 - Sílica cristalina e amorfa (COUTO, 2008). .....	33
Figura 2.4 - Característica do agregado antes (a) e depois (b) da reação (COUTO, 2008). .....	34
Figura 2.5 – Mecanismo da reação álcali-carbonato (COUTO, 2008). .....	35
Figura 2.6 - O ataque de álcali em sílica bem-cristalizada (A) e em sílica hidratada fracamente cristalizada (B) (DENT GLASSER E KATAOKA, 1981). .....	36
Figura 2.7 - Influência de aditivos na RAA (FARIAS, HASPARIK, ANDRADE, 2007) adaptado. .....	38
Figura 2.8 - Esquemas das transformações químicas da reação álcali-sílica (WANG, GILLOTT,1991). .....	39
Figura 2.9 - Modelo de Gouy-Chapman da parte difusa da dupla camada elétrica. .....	40
Figura 2.10 - Mecanismo da RAA ( FERRARIS, 1995) adaptado. .....	40
Figura 2.11 - Processo químico da formação do gel exsudado (DU; TAN, 2014). .....	41
Figura 2.12 - Efeito de uma taxa relativamente rápida de formação de gel e uma taxa lenta de dissolução de gel (Adaptado de DYER, 2015). .....	42
Figura 2.13 - Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de .....	44
Figura 2.15 - Fluxograma geral para uso do agregado em concreto (adaptada da NBR 15577-1/08). .....	46
Figura 2.16 - Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à reação álcali-agregado adaptado da NBR 15577-1/08. .....	58
Figura 2.17 - Fluxograma de classificação de agregados. Adaptado de SANSHEZ, 2008. .....	59
Figura 3.1 - Coleta das amostras. .....	64
Figura 3.2 - Procedimento do programa experimental. .....	64
Figura 3.3 - Água destilada utilizada no amassamento da argamassa. .....	67
Figura 4.1 - Fatores possíveis para expansão. .....	77
Figura 4.2 - Caixa dos fatores responsáveis possíveis por expansões: Granulometria x resíduo. .....	78
Figura 4.3 - Influência da granulometria x resíduo. .....	79

Figura 4.4 - Teste Tukey.....	80
Figura 4.5 - Representação das amostras com seus respectivos tamanhos. ....	80
Figura 4.6 – Micrografia apresentando .....	86
Figura 4.7 – Micrografia do gel.....	86
Figura 4.8 – Micrografia apresentando .....	86
Figura 4.9 – Micrografia apresentando .....	86
Figura 4.10 – Micrografia apresentando.....	87
Figura 4.11 – Micrografia do gel maciço gretado. ....	87

## LISTA DE FOTOS

Foto 3.1 - Moagem do agregado.....	69
Foto 3.2 - Frações granulométricas para confecção da barra padrão. ....	69
Foto 3.3 - Frações granulométricas das amostras A, B, C, D e E. ....	69
Foto 3.4 - Mistura da argamassa.....	69
Foto 3.5 - Moldagem das barras de argamassa.....	70
Foto 3.6 - Barras de argamassa na câmara úmida. ....	70
Foto 3.7 - Tanque de imersão. ....	70
Foto 3.8 - Barras de argamassa em recipiente com solução de NaOH.....	71
Foto 3.9 - Medições das expansões nas barras de argamassa.....	71
Foto 3.10 - A) Microscópio ótico, B) lâmina, C) agregado D) barras de argamassa para o ensaio petrográfico. ....	73
Foto 4.1 - Observação com Nicol Cruzado, aumento de 40 vezes, de cristais maiores de plagioclásio bordejado por quartzo.....	74
Foto 4.2 - Observação com Nicol Paralelo, aumento de 40 vezes, de feldspato plagioclásio..	75
Foto 4.3 - A) Observações Nicol Cruzado, aumento de 100 vezes, bordas de reação enriquecidas em ferro; B) Observações Nicol Paralelo, aumento de 100 vezes, feldspato plagioclásio.....	75

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Panorama genérico do conhecimento da RAA (adaptado de ANDRIOLO, 1997). .....	30
Gráfico 2.2 - Intervalos granulométricos x Expansão aos 14 dias (Adaptado de Ramyar, 2005). .....	51
Gráfico 2.3 - Influência do teor de finos na expansão devido à Reação Álcali-Agregado (Andriolo, 2006). .....	52
Gráfico 2.4 - Resultados experimentais da expansão devido a RAS para argamassa e concreto com 0,8 Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> (HAHA, 2006). .....	52
Gráfico 2.5 - Expansões no concreto em função do tempo com uma única fração reativa.....	54
Gráfico 2.6 - Expansões de argamassas em função do tempo, com uma única fração reativa. (SEKRANE E ASROUN, 2014). .....	54
Gráfico 2.7 - Faixas granulométricas contendo o tamanho péssimo de partícula versus expansão Adaptado de DYER, 2015. .....	55
Gráfico 4.1- Comparação das evoluções da expansão média de cada amostra x idade. ....	76
Gráfico 4.2 - Comparação entre as expansões médias x média das expansões.....	77
Gráfico 4.3 - Média e desvio padrão das expansões das argamassas aos 30 dias. ....	78
Gráfico 4.4 - Curva comportamento da expansão x granulometria.....	82
Gráfico 4.5 - Curva comportamento aos 12 dias das amostras em relação a padrão. ....	82
Gráfico 4.6 - Curva do comportamento aos 18 dias das amostras em relação a padrão. ....	83
Gráfico 4.7 - Curva comportamento aos 24 dias das amostras em relação a padrão. ....	83
Gráfico 4.8 - Curva comportamento aos 30 dias das amostras em relação a padrão. ....	84
Gráfico 4.9 - Teor ótimo da granulometria para verificação da expansão causada pela RAA.	84
Gráfico 4.10 - Percentual sugerido x Percentual da amostra padrão.....	85

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Resumo da análise petrográfica dos agregados de alguns casos confirmados de RAA na RMR (SINDUSCON-PE, 2006).....	23
Quadro 2.1 - Resumo das comunicações no International Congress of Àlcali-Aggregate Reaction ICAAR (FIGUEROA, ANDRADE, 2007).....	29
Quadro 2.2 - Barragens afetadas pela RAA, no Brasil (ANDRIOLO, 2000). ....	31
Quadro 2.3 - Teores de minerais / pozolânicas empregados para inibição da RAA, em substituição do cimento (HASPARYK, 2005).....	43
Quadro 2.3 - Classificação do agregado quanto a RAA adaptado da NBR 15577-3/08.....	45
Quadro 2.4 - Propriedades do concreto relacionadas com as características relevantes do agregado (BUEST NETO, 2006). ....	47
Quadro 2.5 - Normas de caracterização tecnológica de agregados para os principais usos na construção civil (Adaptado de LUZ e ALMEIDA, 2012).....	48
Quadro 2.6 - Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do agregado. Adaptado de Neto (2011).....	48
Quadro 2.7 - Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado graúdo com relação à massa do agregado. Adaptado de Neto (2011).....	49
Quadro 2.9 - Resumo de estudos sobre a influência da granulometria do agregado na RAA. ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI	Alta Resistência Inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBC	Congresso Brasileiro do Concreto
Cientec	Fundação de Ciência e Tecnologia
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP	Cimento Portland
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
ICAAR	International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
pH	Potencial de hidrogênio
RAA	Reação Álcali-Agregado
RMR	Região Metropolitana do Recife
SINDUSCON-PE	Sindicato da Indústria da Construção Civil de Pernambuco
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UNICAP	Universidade Católica de Pernambuco

## LISTA DE FÓRMULAS QUÍMICAS

$\text{CaCO}_3$ : carbonato de cálcio (calcita)

$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ : carbonato de cálcio e magnésio (dolomita)

$\text{CaO}$ : óxido de cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ : hidróxido de cálcio (portlandita)

Ca/Si: relação cálcio-sílica

C-S-H: silicato hidratado de cálcio

H<sup>-</sup>: ânion hidrogênio

$\text{K}_2\text{O}$ : óxido de potássio

KOH: hidróxido de potássio

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ : hidróxido de magnésio (brucita)

$\text{Na}_2\text{O}$ : óxido de sódio

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ : equivalente alcalino

NaOH: hidróxido de sódio

$\text{SiO}_2$ : sílica

SiOH: silanol

Si-O-Si: ligações do grupo siloxano



## RESUMO

Os estudos da expansão RAA são geralmente limitados pela dificuldade devido à heterogeneidade e faixa de tamanho de agregados reativos. Este trabalho tem o objetivo de estudar o assunto e ajudar no desenvolvimento de modelos para prever o potencial de expansão da argamassa e do concreto que contém agregados reativos. O trabalho apresenta medições a fim de fornecer dados experimentais sobre o efeito do tamanho do agregado na expansão em barras de argamassa. Os resultados mostram que a expansão medida nas argamassas relacionando a fração padrão 2,4-0,15 mm com as frações individuais 2,4; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15 mm, onde a fração 0,6 mm apresentou a maior expansão e a menor foi à fração 0,15 mm. É possível observar a interferência das faixas granulométricas. O efeito do tamanho dos agregados reativos é avaliado e as consequências sobre os ensaios laboratoriais acelerados são discutida.

Palavra-chave: Reação Álcali Agregado, Potencial de expansão, efeito do tamanho do agregado, Barras de argamassa, ensaio acelerado.

## ABSTRACT

Modeling studies the RAA expansion are generally limited by the difficulty due to the heterogeneity and reactive aggregate size range. This work aims to study the issue and help in developing models to predict the potential for expansion of mortar and concrete containing reactive aggregates. The paper presents measurements to provide experimental data on the effect of aggregate size expanding mortar bars. The results show that expansion was measured on mortars relating the standard from 2.4 to 0.15 mm fraction with the individual fractions 2.4; 1.2; 0.6; 0.3; 0.15 mm, where 0.3 mm fraction showed the highest growth and the lowest was the fraction 0.15 mm. You can observe the interference of particle sizes. The effect size of reactive aggregates is evaluated and the consequences of accelerated laboratory tests are discussed.

Keywords: alkali aggregate reaction; potential of expansion; effect of size aggregate, mortar bar, accelerated test.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	21
1.1	JUSTIFICATIVA	22
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	OBJETIVO GERAL	24
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.3	METAS	
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
<b>2</b>	<b>A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO</b>	
2.1	HISTÓRICO	28
2.1	OS TIPOS DE REAÇÃO	32
2.2	A QUÍMICA DA RAA	35
2.3	MECANISMOS DA RAA	38
2.4	MEDIDAS PREVENTIVAS PARA RAA	42
2.5	AGREGADOS PARA CONCRETO	44
2.6	SUBSTÂNCIAS NOCIVAS NO AGREGADO	48
2.7	EFEITOS DO TAMANHO DO AGREGADO NA EXPANSÃO	49
2.8	ENSAIOS	56
2.8.1	ANÁLISE PETROGRÁFICA	59
2.8.2	DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO	60
2.8.3	DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO EM PRISMAS DE CONCRETO	61
2.8.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	62
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	63
3.1	MATERIAIS	65
3.1.1	CIMENTO	65
3.1.2	ÁGUA E SOLUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO	66
3.1.3	AGREGADO	67
3.2	MÉTODOS	67
3.2.1	DOSAGEM DA ARGAMASSA PARA MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA	

---

3.2.2	EXPANSÕES EM BARRAS DE ARGAMASSA CONFORME A NRB 15577-4:2008	68
3.2.3	ANÁLISE PETROGRÁFICA DO AGREGADO E DAS BARRAS DE ARGAMASSA	72
3.2.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	73
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>74</b>
<b>4.1</b>	<b>ENSAIOS PETROGRÁFICOS</b>	<b>74</b>
4.1.1	ANÁLISE PETROGRÁFICA DO AGREGADO	74
4.1.2	ANÁLISE PETROGRÁFICA DAS BARRAS DE ARGAMASSA	75
<b>4.2</b>	<b>EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO</b>	<b>76</b>
<b>4.3</b>	<b>MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>88</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b>	
<b>5.2</b>	<b>CONTRIBUIÇÕES</b>	
<b>5.3</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE A - Ficha técnica do cimento</b>	
	<b>APÊNDICE B - Tabelas contendo a evolução das expansões médias percentuais das barras de argamassa.</b>	
	<b>APÊNDICE C - Gráficos contendo a evolução das expansões médias percentuais das barras de argamassa, ao longo de 30 dias.</b>	

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

O concreto, material de construção mais usado no mundo, é complexo, sujeito a variáveis que influenciam largamente no seu desempenho. Já muito se sabe que a durabilidade, por exemplo, pode ser afetada por reações expansivas entre álcalis existentes no concreto e certas rochas e minerais, por vezes utilizadas como agregados (GILLOT, 1975). A preocupação com as reações de sílica e álcalis é devido ao aumento do teor de álcalis de cimentos, onde se observa a mudança na tecnologia do concreto, e a necessidade de agregados compatíveis com as diversas áreas (DIAMOND, 1975).

Algumas construções de concreto tem apresentado imaturidade quanto a sua tecnologia, onde, isso pode afetar diretamente a durabilidade da obra, apresentando problemas inesperados, por exemplo, com o inadequado uso dos materiais de construção (VALDUGA, 2002).

O aumento da ocorrência de manifestações patológicas em estruturas de concreto, oriundas da reação álcali-agregado tem sido motivo de preocupação no meio técnico nacional. A falta de ensaios eficazes para avaliação dos materiais utilizados na elaboração dos concretos e argamassas e o desconhecimento do meio técnico a respeito do assunto, podem ser considerados como os fatores responsáveis pelo agravamento da atual situação (PECCHIO et al, 2006).

Em relação à durabilidade dos concretos a partir de exemplos de desempenho, a recomendação para prevenção de patologias, especificamente à reação álcali-agregado, é qualificar os agregados, no qual os ensaios de desempenho são utilizados quando o estudo petrográfico mostrar quantidades de minerais reativos acima de 4% (BAROGHEL-BOUNY et. al, 2014).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A engenharia civil está cada vez mais sofrendo com o surgimento das patologias, onde muitas vezes não se obtém um diagnóstico preciso, que possa identificar exatamente a origem da manifestação patológica, principalmente quando surge nas fundações, devido à dificuldade de se observar o início da patologia.

Em se tratando de RAA, a Região Metropolitana do Recife (RMR) tem apresentado vários casos deste fenômeno e existem poucos laboratórios e empresas especializadas na análise e solução do problema.

Há vários métodos laboratoriais para avaliar a potencialidade reativa dos agregados. Os mais utilizados no Brasil são a análise petrográfica e o método acelerado em barras de argamassa. Este último permite avaliação da potencialidade reativa do agregado dentro de um intervalo de 30 dias.

Em relação ao método acelerado com barras de argamassa, existem discussões no meio técnico, devido às faixas granulométricas utilizadas na moldagem das barras. Ainda não se têm consenso quanto a influência do tamanho dos grãos do agregado para determinação das expansões geradas ao longo dos 30 dias de ensaio.

Agregados, oriundos de regiões mapeadas e estudadas cujas amostras foram classificadas como reativas, sem levar em conta a sua formação geológica e conseqüentemente o grau de potencialização frente à RAA, foram utilizados em várias obras como componentes dos concretos.

Em 2006 o Sindicato da indústria da construção civil de Pernambuco (SINDUSCON-PE) apresentou uma cartilha, onde, mostra, através de pesquisa, um resumo da análise petrográfica dos agregados utilizados na RMR, conforme Quadro 1.1.

Casos Nº	Tipo de rocha	Classificação petrográfica	Textura	Minerais reativos
1	Metamórfica	Gnaiss cataclástico	Cataclasito	Quartzo deformado com extinção ondulante, quartzo microcristalino recristalizado em estrutura mortar.
2	Metamórfica	Milonito	Milonítica / Cataclástica	Quartzo deformado com extinção ondulante, quartzo microcristalino recristalizado em estrutura mortar.
3	Metamórfica	Gnaiss cataclástico	Granoblástica/c Cataclástica	Quartzo deformado com extinção ondulante e quartzo recristalizado e quartzo fino.
4	Metamórfica	Cataclasito	Milonítica / Cataclástica	Quartzo deformado com extinção ondulante, quartzo microcristalino recristalizado em estrutura mortar.
5	Metamórfica	Horblenda gnaiss	Granoblástica	Quartzo deformado com extinção ondulante e quartzo recristalizado.
6	Metamórfica	Gnaiss cataclástico	Granoblástica/c cataclástica	Quartzo deformado com extinção ondulante e quartzo recristalizado e quartzo fino.
7	Metamórfica	Milonito	Milonítica	Quartzo deformado com extinção ondulante, quartzo fino e quartzo recristalizado.

Quadro 1.1 - Resumo da análise petrográfica dos agregados de alguns casos confirmados de RAA na RMR (SINDUSCON-PE, 2006).

Os agregados utilizados nos concretos devem ser especificados de acordo com a normatização referente à composição granulométrica (diâmetro máximo), material pulverulento, massa unitária, índice de forma, massa específica, teor de argila em torrões, absorção de água e determinação do inchamento em agregado miúdo (Areia) conforme NBR 7211:2009 – Agregado para Concreto-Especificação.

Andriolo (1997) enfatiza que a metodologia mais indicada, quanto à utilização de agregado no concreto, seria a adoção da prática do uso da adição mineral de modo a complementar as medidas de segurança para inibir a RAA.

O presente trabalho é um estudo da influência da granulometria do agregado na reação álcali-agregado, visando contribuir com o modelo da distribuição das faixas granulométricas no ensaio acelerado em barras de argamassa.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar a influência da granulometria do agregado miúdo na RAA, visando contribuir principalmente com as discussões sobre a distribuição granulométrica para os métodos acelerados nos ensaios de reatividade dos agregados.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Moldar, conforme a NBR 15775-4, barras de argamassa com diferentes faixas granulométricas;
- Medir as expansões nas barras de argamassa de acordo com ensaio do método acelerado conforme NBR 15775;
- Analisar a petrografia do agregado;
- Analisar a petrografia das barras de argamassa;
- Estudar a microestrutura das barras de argamassa através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Comparar os resultados obtidos com os da literatura.



### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos.

O Capítulo 1 introduz o tema da dissertação, apresenta a justificativa, objetivos e estrutura da dissertação.

O capítulo 2 trata da revisão da literatura apresentando uma visão geral sobre a RAA: histórico da reação; os tipos de reação; química e o mecanismo da reação; a classificação dos agregados para uso no concreto, substâncias nocivas nos agregados, contribuição do efeito do tamanho do agregado na reação e ensaios.

O capítulo 3 apresenta os materiais utilizados na fabricação das barras de argamassa e métodos utilizados na pesquisa, análise petrográfica do agregado e das barras de argamassa; ensaio acelerado em barras de argamassa e microscopia eletrônica de varredura nas barras de argamassa.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física e química do cimento, determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado; análise petrográfica do agregado e das barras de argamassa e a microscopia eletrônica de varredura. Ainda neste capítulo é apresentado o comportamento da reação através da expansão versus granulometria e uma sugestão na mudança das ponderações dos valores de cada faixa granulométrica para fabricação da barra padrão.

As considerações finais estão no capítulo 5 juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2 REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A RAA é um fenômeno patológico que provoca deterioração no concreto e pode desencadear problemas estruturais. O desenvolvimento desta degradação apresenta enormes dificuldades para diagnosticar a origem da patologia e sua recuperação, comprometendo a durabilidade das estruturas afetadas por esse fenômeno. Apesar de dificilmente ser mencionada como causa primária do colapso de uma estrutura, a fissuração gerada pela RAA pode favorecer outros processos de degradação do concreto, como a carbonatação e a corrosão das armaduras (RIBEIRO; CUNHA, 2014).

RAA é complexa e existem muitos fatores interagindo e parâmetros interdependentes que influenciam sua ocorrência. Atualmente, não existe um único teste que possa garantir que nunca mais uma estrutura será afetada pela RAA (Swamy, 1992).

A mineralogia dos agregados envolvidos separa em três tipos as reações álcalis agregado como: reação álcali-sílica, reação álcali silicato e reação álcali-carbonato. Os tipos das sílicas reativas são opala (amorfa), calcedônica (criptocristalina fibrosa) e tridimita (cristalina) (NEVILLE, BROOKS, 2013).

Uma grande variedade de agregados de uso comum em todo o mundo, em particular aqueles com uma composição siliciosa, é vulnerável ao ataque pelo fluido alcalino dos poros de concreto. Este ataque, em condições úmidas, produz um gel higroscópico e pode causar fissuras no concreto. O mecanismo de degradação é denominado Reação Álcali Agregado (RAA) (HAHA, 2006).

Expansão e fissuras em peças de concreto, devido à RAA, requerem a combinação de 3 condições: uma quantidade significativa de agregado reativo; álcalis (sódio e potássio) disponíveis acima de um nível crítico na estrutura de poros do concreto e a presença de água ou umidade (FATT, BENG, 2007).

Jensen et al. (1984) através de uma extensa investigação petrográfica de amostras de concreto afetadas pela reação álcali-sílica, concluíram que um sistema de bolhas de ar irá reduzir a expansão devido à reação álcali-silicato. Os resultados mostram que, em média, a introdução de 4% de ar diminuiu a expansão em cerca de 40%.

Elevada relação água cimento, para o concreto, é ruim quanto à obtenção de resistência mecânica, devido ao elevado índice de vazios após evaporação da água, mas em relação à RAA, quando se trata de alta porosidade do concreto, é benéfica fazendo que existam alívios considerados de tensões e conseqüentemente diminuindo as fissuras (FERRARIS, 2000).

Andriolo (1997) afirma, em relação às propriedades do concreto, que a resistência à Tração e o módulo de Elasticidade são influenciadas pela RAA, sendo que ambas podem afetar o desempenho e integridade das estruturas de concreto. Porém essas perdas de propriedades não ocorrem ao mesmo tempo, ou na proporção da expansão.

O quadro fissuratório originado pela reação álcali-agregado (RAA) pode ser semelhante aos outros processos de deterioração que causam danos ao concreto (Swamy, 1992). Essa reação pode induzir à fissuração e expansão em concreto, particularmente em peças expostas à umidade externa. As fissuras podem ser visualmente graves e há desacordo entre engenheiros sobre as conseqüências estruturais da reação (Hobbs, 1988). Almeida e Sales (2014) comentam que as manifestações de reações álcali-agregado são percebidas em estruturas situadas em ambientes úmidos, tais como barragens, pilares de pontes e quebra-mares.

Lindgård et al. (2012) afirmam que a utilização de agregados potencialmente reativos requer testes de desempenho confiáveis para avaliar a reatividade álcali-sílica de diferentes combinações de agregação. Vários desses testes de desempenho têm sido usados em todo o mundo por mais de 15 anos, mas nenhum deles provou adequado para todos os tipos de agregados e todos ligantes.

Segundo Multon e Toutlemonde (2006) os efeitos mecânicos da RAA têm de ser modelado, de modo a avaliar o nível de degradação e a estabilidade de uma estrutura em concreto armado.

Vários programas experimentais têm demonstrado os efeitos de esforços compressivos sobre peças de concreto induzidos por RAA. O efeito é tão significativo que modelos de avaliação devem levar em consideração a alteração das expansões da RAA devido a tensões aplicadas e as conseqüências sobre a resposta mecânica de estruturas danificadas. Estruturas de concreto afetadas pela RAA estão geralmente sujeitas a cargas que afetam a expansão macroscópica do material (DUNANT; SCRIVENER, 2012).

A Figura 2. 1 apresenta um exemplo de manifestação em um bloco de fundação afetado pela RAA.



Figura 2. 1- Bloco de fundação de um edifício comercial localizado na RMR (Andrade, 2006).

## 2.2 HISTÓRICO

Entre 1920 e 1930 várias estruturas em concreto foram construídas na Califórnia, USA e desenvolveram fissuras dentro de alguns anos de sua construção. Em 1940, Stanton demonstrou que a expansão gerada pela reação álcali-agregado era a principal causa para tal deterioração (RAMACHANDRAN, 1995).

Conforme Ramachandran (1995), posteriormente mostrou-se que nestas estruturas de concreto foi usada uma combinação de alto teor de álcalis no cimento e agregado opalino. A fissuração do concreto devido à reação álcali-sílica também foi reconhecida em muitos outros países. Swenson (1957) relatou outra reação expansiva deletéria conhecida como reação álcali-carbonato.

Várias estruturas, incluindo barragens e pontes, sofreram deterioração induzida pela RAA, que prejudica a durabilidade e também pode afetar a segurança das instalações (CAPRA; SELIER, 2002). Desde que o fenômeno foi reconhecido como um problema de durabilidade do concreto, há mais de 70 anos por Stanton, vários projetos de investigação concentraram-se em métodos de ensaio para a determinação da reatividade e correspondentes critérios de aceitação (LINDGÅRD et al., 2013).

Desde 1974 o International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete (ICAAAR) vem discutindo o problema (FIGUEROA, ANDRADE, 2007), Quadro 2.1.

Nº	LOCAL	ANO	PAÍSES PARTICIPANTE	DELEGADOS	TRABALOS PUBLICADOS
1	Dinamarca	1974	4	23	13
2	Irlanda	1975	7	25	20
3	Reino Unido	1976	13	48	27
4	USA	1978	8	54	26
5	África do Sul	1981	12	52	38
6	Dinamarca	1983	21	187	56
7	Canadá	1986	23	300	101
8	Japão	1989	16	327	136
9	Reino Unido	1992	29	320	150
10	Austrália	1996	26	220	130
11	Canadá	2000	24	230	142
12	China	2004	29		164

Quadro 2.1 - Resumo das comunicações no International Congress of Àlcali-Aggregate Reaction ICAAR (FIGUEROA, ANDRADE, 2007).

Andriolo (1997) depois de ter participado do “*Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dam*”, em Chattanooga, Tennessee, em Outubro de 1995, na tentativa de se elaborar um documento de âmbito brasileiro sobre o fenômeno. Essa tentativa decorreu, não pela magnitude do número de obras hidroelétricas noticiadas, mas também pelo crescimento desse número.

Diante disso, verificou-se a necessidade de estabelecer um plano de ação sobre o tema, considerando:

- a divulgação do assunto;
- o estabelecimento de acervo técnico;
- o desenvolvimento de “massa crítica” sobre o tema;
- a provocação (benéfica) quanto à dimensão do fenômeno;
- a tentativa de induzir à pesquisa;
- a busca de materiais e soluções alternativas para inibir a RAA;
- a busca de soluções para minimizar ou neutralizar o fenômeno, após o início da RAA.

A ideia da publicação foi registrar dados e transmitir informações colhidas sobre o Panorama Internacional sobre a RAA. Na Figura 2. 2 é mostrada a Barragem de Hiwassee nos USA, uma das obras disponíveis à visitação no evento citado.



Figura 2. 2 - Fissuras internas na Barragem de Hiwassee- Estados Unidos (ANDRIOLO, 1997).

No Brasil a preocupação em relação à ameaça da reação começou há cerca de 50 anos, principalmente quando do estudo dos materiais e concretos para as obras do Setor Elétrico, em particular as Hidroelétricas (ANDRIOLO, 1997). Em Pernambuco, especialmente na RMR - Região Metropolitana do Recife, em 2004, ano no qual ocorreu o colapso do Edifício Areia Branca, embora a reação álcali-agregado não tenha sido a causa principal do colapso, constatou-se a sua presença. Com isso gerou-se, no meio técnico, uma grande preocupação, o que provocou o desenvolvimento de estudos sobre o fenômeno, especialmente na RMR (Andrade, 2006).

O panorama genérico internacional do conhecimento quanto à RAA pode ser resumido como mostra o Gráfico 2.1.

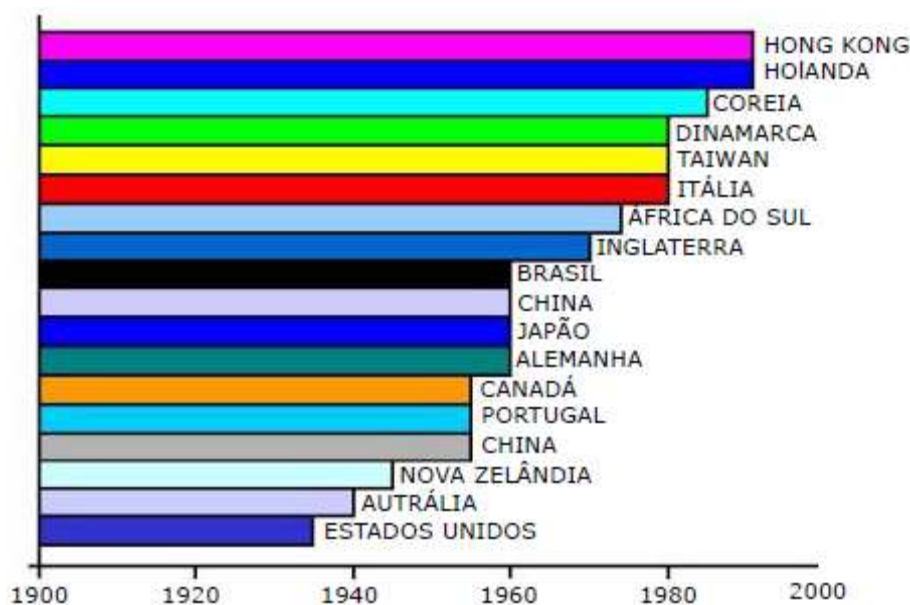


Gráfico 2.1 - Panorama genérico do conhecimento da RAA (adaptado de ANDRIOLO, 1997).

Pecchio et al. (2006) comentam que recentemente foram identificados inúmeros casos de ocorrências de RAA em blocos e sapatas de fundações de edifícios residenciais e comerciais na Região Metropolitana de Recife – PE e que não há no mundo re-

gistro similar da ocorrência de reação álcali agregado em tal magnitude com tamanho impacto social associado.

Os principais sintomas causados por RAA podem ser notados por um conjunto de informações disponíveis sobre as estatísticas e ocorrência do fenômeno RAA em barragens brasileiras, conforme Quadro 2.2.

General Data				AAR. Symptom		
Project/Dam/ End of Construction		Owner	Rock-Aggregate	Structure	Observation Period	Symptom
Paulo Afonso I	1954	CHESF	Granite-Gneiss	Water Intake; Power House	1978	a;c
Paulo Afonso II	1960	CHESF	Granite-Gneiss	Water Intake; Power House	1978	a;c
Paulo Afonso III	1973	CHESF	Granite-Gneiss	Water Intake; Power House	1978	a;c;d;f
Paulo Afonso IV	1979	CHESF	Granite-Gneiss	Water Intake; Power House	1985	a;c;d;e;f
Moxotó	1977	CHESF	Granite-Gneiss	Spillway, Power House	1978	a;c;d;e;f
Pedras	1970	CHESF	Quartzites	Dam	1990	a;b
Traição	1940	EL. PAULO	Milonyte	Water Intake; Power House	1990	B
Bilings Pedra	1926	EL. PAULO	Granite	Water Intake; Power House	1995	B
Jaguara	1971	CEMIG	Quartzites	Water Intake; Power House, Spillway	1996	b;e;f;g
Peti	1946	CEMIG	Gneiss	Water Intake; Spillway	1990	B
Furnas	1964	FURNAS	Quartzites	Spillway	1976	B
Cantareira	1974	SABESP	Granite-Gneiss	Water Intake	1989	a;b;c;f
Ilha dos Pombos	1930	LIGHT	Gneiss	Dam; Spillway	1990	b;c
Jurupará	1970	CBA	Gneiss	Dam	1995	C
Sá Carvalho	1975	ACESITA	Gneiss	Power House	1995	C
Pedro Bight	1932		Granite-Gneiss	Dam; Spillway	1995	B
Santa Branca	1960		Gneiss	Dam; Spillway	1995	B
Rio das Pedras	1970	CHESF	Gneiss	Dam; Spillway	1996	B
Joanes II	1971	COELBA	Gneiss	Dam	1994	B

(a): stressed quartz; (b): cracks; (c): opened construction joint;  
(d):displacements between blocks; (e): crest movement;  
(f): turbine movement; (g): turbine base deformation

Quadro 2.2 - Barragens afetadas pela RAA, no Brasil (ANDRIOLO, 2000).

## 2.1 OS TIPOS DE REAÇÃO

O quartzo deformado é o principal responsável pela ocorrência da reação, admitindo-se também que o feldspato tem papel importante na cinética da reação (LUCENA, GALGOUL, 1996). A RAA compreende diferentes processos químicos entre os íons alcalinos dos poros do concreto e os materiais agregados (GRATTAN-BELLEW, 1992). Lua e Almeida (2012) explicam que as reações mais prejudiciais entre o cimento e os agregados, na preparação do concreto, são as reações denominadas de:

- **Reação Álcali-Sílica;**
- **Reação Álcali-Silicato;**
- **Reação Álcali-Carbonato**

### 2.1.1 REAÇÃO ÁLCALI – SÍLICA (RAS)

Figuroa e Andrade (2007) resumem que a RAS ocorre quando os agregados são formados por sílica amorfa, vidros vulcânicos ou artificiais.

De acordo com a NBR 15577/08 a RAS é definida:

“Tipo de reação álcali agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo. Constituem exemplos de sílica reativa: opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, entre outros. Este é o tipo de reação álcali-agregado que mais rapidamente se desenvolve”.

Alguns agregados silicosos, quando constituídos de sílica amorfa, mal cristalizada são atacados pela solução intersticial dos poros do concreto. A sílica liberada pelo ataque reage, em seguida, com os álcalis  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  desta solução intersticial, gerando, ao final, um gel (CARLES-GIBERGUES; HORMAIN, 2014).

Couto (2008) apresenta um modelo de dois tipos de sílica presentes nos agregados, conforme Figura 2.3.



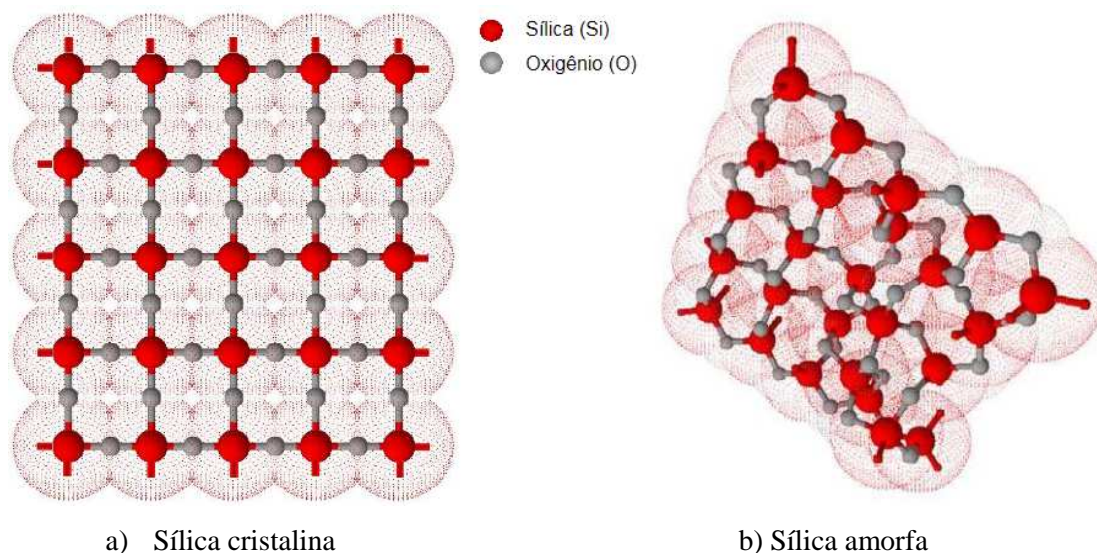


Figura 2.3 - Sílica cristalina e amorfa (COUTO, 2008).

## 2.1.2 REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO

A NBR 15577/08 define como:

“Tipo específico de reação álcali-sílica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas. Os silicatos reativos mais comuns são quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzos, entre outros. Geralmente, esta reação é mais lenta do que a reação álcali-sílica”.

Esta se refere às reações envolvendo filossilicatos tais como vermiculita, clorita e mica presentes em rochas do filito, argilito etc. Estas reações são difíceis de serem caracterizadas, no entanto podem ser expansivas (LUZ; ALMEIDA, 2012).

Essencialmente a diferença entre a reação álcali-silicato e a álcali-sílica reside no fato de que os agregados reativos não são formados de sílica livre, mas de silicatos variados (filossilicatos ou tectossilicatos, são ou alterados) (CARLES-GIBERGUES; HORMAIN, 2014). A Figura 2.4 apresenta este mecanismo.

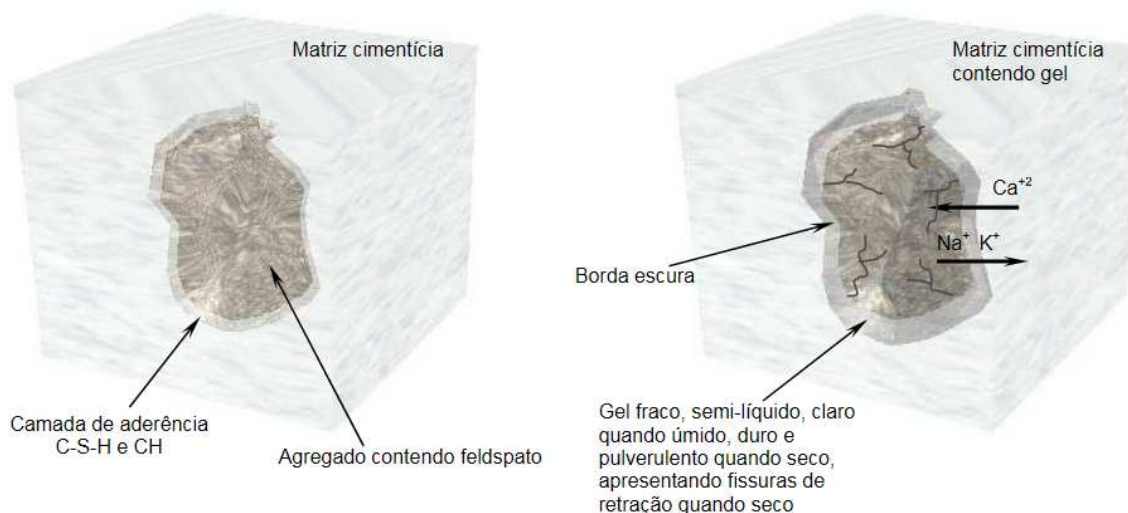


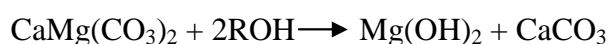
Figura 2.4 - Característica do agregado antes (a) e depois (b) da reação (COUTO, 2008).

### 2.1.3 REAÇÃO ÁLCALI-CARBONATO (RAC)

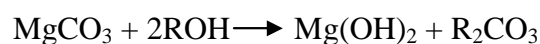
Segundo a NBR 1557/08 esta reação é definida:

“Tipo de reação álcali agregado em que participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A forma mais conhecida de deterioração é devida à desdolomitização da rocha e consequente enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Não há a formação de gel expansivo, mas de compostos cristalizados como brucita, carbonatos alcalinos, carbonato de cálcio e silicato magnésiano. Como a reação regenera os hidróxidos alcalinos, a desdolomitização terá continuidade até que a dolomita tenha reagido por completo ou a fonte de álcalis se esgote”.

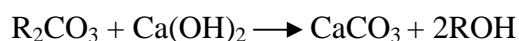
Esse processo difere das reações álcali-sílica se caracteriza pela decadência da dolomita como efeito de sua reação com álcalis (Góralczyk, 2012). A RAC também é chamada de “desdolomitização” (Dyer, 2015).



R é o sódio ou potássio. No entanto, a Magnesita ( $\text{Mg}_2\text{CO}_3$ ) passa, também, por processo similar:



produtos de carbonatos alcalinos reagem com o produto de hidratação do cimento  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para produzir:



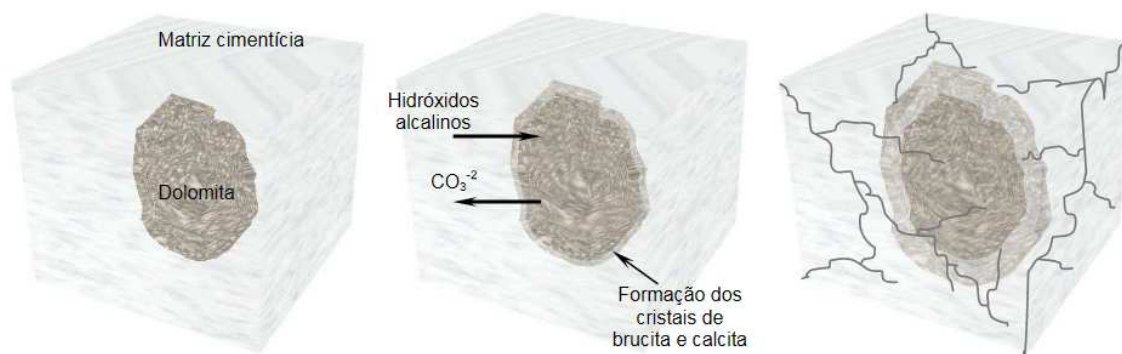


Figura 2.5 – Mecanismo da reação álcali-carbonato (COUTO, 2008).

### 2.3 A QUÍMICA DA RAA

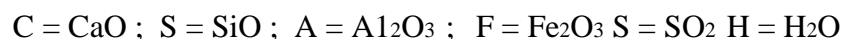
Segundo Diamond (1975) os álcalis originados do cimento podem ser solúveis, encontrados nos sulfatos; e insolúveis encontrados nas fases sólidas presentes no clínquer, podendo todos os álcalis participar da reação deletéria.

Dent Glasser e Kataoka (1981) comentam que o clínquer de cimento Portland é altamente alcalino, alguns silicatos, íons de aluminato ou sulfato são em relação  $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$  em vez de  $\text{Ca}^{2+}$ . Isto pode ser indesejável, porque o pH do fluido dos poros em pastas feitas a partir de tais clínquer os tendem a ser normalmente elevado.

Taylor (1990) cita que no cimento existem quatro principais compostos cristalinos presentes no clínquer:  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ .

- $\text{C}_3\text{S}$  = Silicato tricálcico
- $\text{C}_2\text{S}$  = Silicato dicálcico
- $\text{C}_3\text{A}$  = Aluminato tricálcico
- $\text{C}_4\text{AF}$  = Ferroaluminato tetracálcico

Onde:



Segundo Dent Glasser e Kataoka (1981) a química da RAA pode ser apresentada de duas formas:

- A hidrólise de ânions de ácidos fracos;
- A formação de sais insolúveis de cálcio (por exemplo, sulfato), em vez de hidróxido de cálcio.

Os íons hidroxila produzidos reagem com certos tipos de agregado, os contendo sílica mal cristalizada, sendo particularmente vulneráveis. O ataque de sílica alcalina sobre o bem-cristalizado é contrastado com a de sílica hidratada fracamente cristalizada, Figura 2.6.

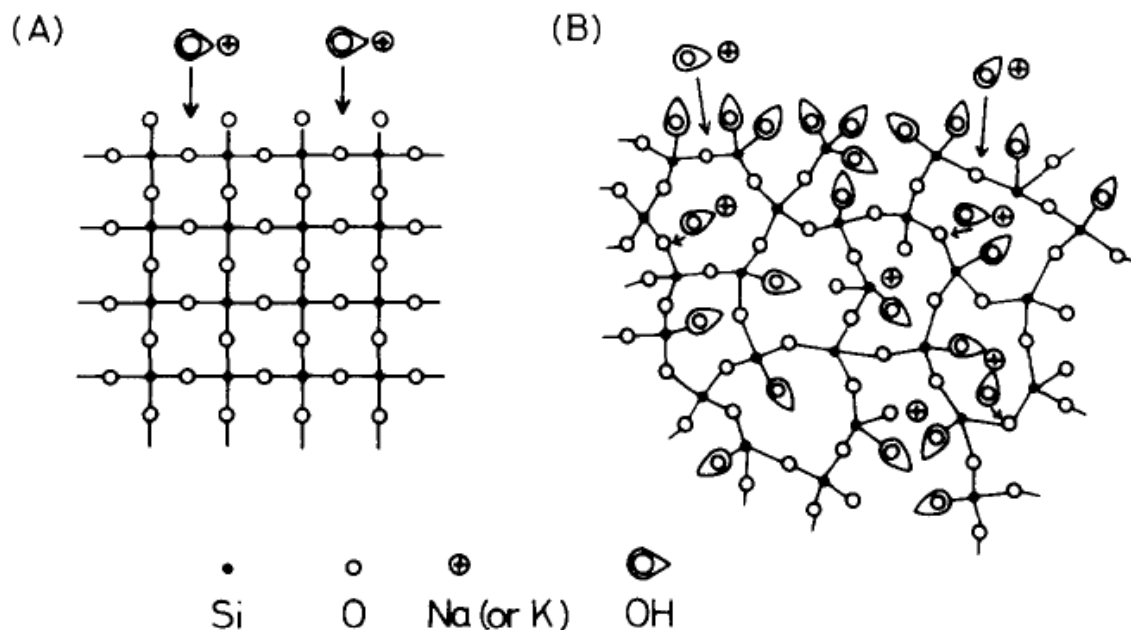


Figura 2.6 - O ataque de álcali em sílica bem-cristalizada (A) e em sílica hidratada fracamente cristalizada (B) (DENT GLASSER E KATAOKA, 1981).

A maioria dos pesquisadores concorda que a principal reação da RAA é a reação entre certas formas de sílica presente nos agregados e os íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) na água dos poros de um concreto (HOBBS, 1988, DIAMOND, PENKO, 1992).

Cátions alcalinos normalmente ocorrem em cimentos ou como sulfatos ou nas principais fases do clínquer. Os efeitos de cátions alcalinos em relação à hidratação do cimento são susceptíveis de serem predominantemente os de íons OH<sup>-</sup>. Íons hidróxido na solução reagem com certos tipos de sílica, que podem ocorrer em conjunto, resultando em tensões internas que podem causar expansão e fissuras (TAYLO, 1997).

Os íons alcalinos Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>, que podem ser provenientes, principalmente, do cimento, mas também da água de amassamento do concreto, de pozolana, junto com os íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) e minerais contidos no agregado, formam o processo químico da RAA (VALDUGA, 2002).

Concretos de cimento Portland são naturalmente alcalinos porque o cimento Portland reage com água para produzir soluções que são saturado com Ca (OH)<sub>2</sub>, mas

também estar presentes no cimento Portland ou minerais como sulfatos, que formam facilmente soluções de NaOH e KOH como o cimento aluminato, para absorver os íons sulfato (MEASHAM, 2007).

Bertolini (2010) descreve que o teor de álcalis no cimento é expresso em percentual equivalente de  $\text{Na}_2\text{O}$  em massa:  $\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0,659 \cdot \% \text{K}_2\text{O}$ . E também afirma que a maior concentração da fase líquida, presente nos poros do concreto, é constituída de uma solução de NaOH e KOH.

Conforme Neville e Brooks (2013), existem compostos secundários, como, MgO,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ , que perfazem, normalmente, um pequeno percentual da massa de cimento. Os compostos  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ , chamados de álcalis, são de extremo interesse, pois podem reagir com alguns agregados reativos, e os produtos dessa reação álcali-agregado causam deterioração do concreto. O teor de álcalis de um cimento, controla o pH em concretos. Alguns estudos nos Estados Unidos mostraram que teores de  $\text{Na}_2\text{O}$  acima de 0,6% podem gerar expansões no concreto devido a RAA (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os Íons de álcalis de alguns compostos químicos, que contêm sais de potássio ou sódio, normalmente contribuem para o conteúdo alcalino total da mistura do concreto (Dyer, 2015).

No caso de componentes como superplastificantes podem influenciar a composição da solução dos poros e na expansão do concreto devido à reação álcali-sílica (WANG, 1989), (FARIAS, HASPARICK, ANDRADE, 2007), (LEEMANN, LOTHENBACH, THALMANN, 2011).

Farias et al (2007) estudaram os efeitos de diferentes bases de aditivos na RAA, no ensaio acelerado em barras de argamassa, indicando a influência nos resultado das expansões, Figura 2.7.

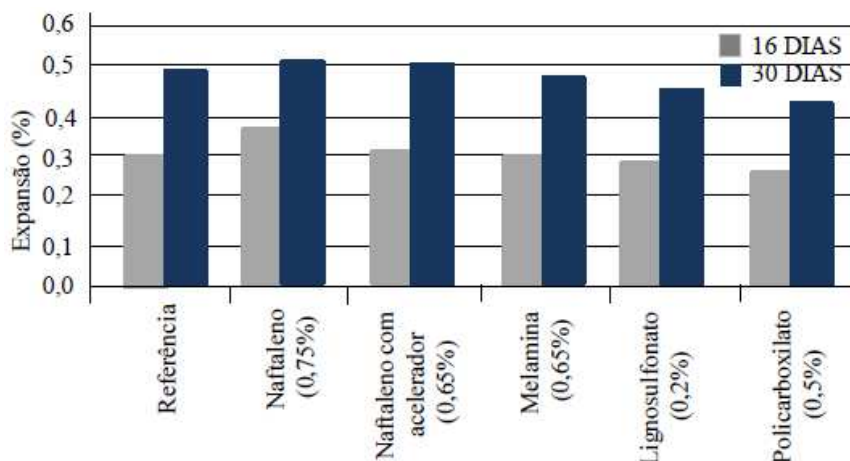
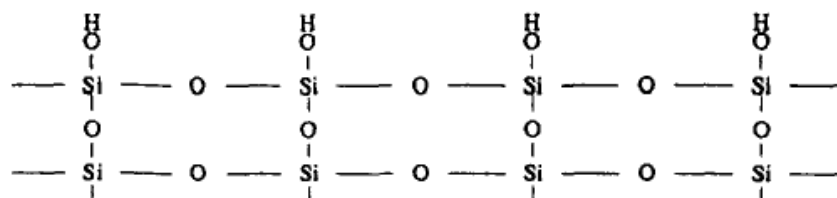


Figura 2.7 - Influência de aditivos na RAA (FARIAS, HASPARIK, ANDRADE, 2007) adaptado.

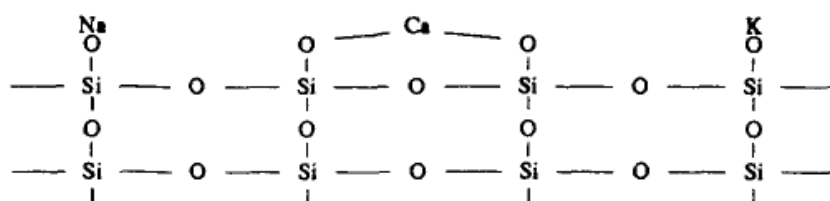
## 2.4 MECANISMOS DA RAA

Um mecanismo de reação álcali-sílica, o que enfatiza o efeito de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , é proposto por Wang e Gillott (1991). Os autores descrevem as transformações químicas da reação álcali-sílica até a formação do gel expansivo. Na estrutura da superfície da sílica (Figura 2.8a), onde se encontra o grupo silanol ( $\text{SiOH}$ ), ocorre troca de íons alcalinos  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e / ou  $\text{Ca}^{++}$ , (Figura 2.8b), para prótons do grupo silanol, sobre a superfície da sílica Figura c.

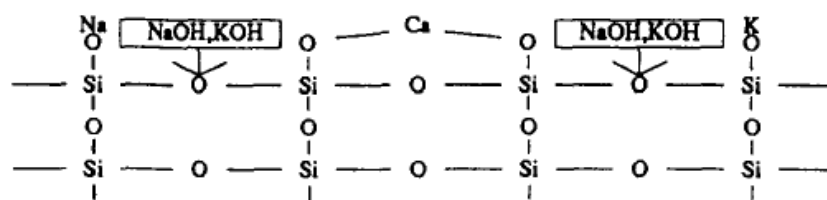
Íons alcalinos podem trocar diretamente para o  $\text{H}^+$ , por conseguinte. No entanto, os íons de  $\text{Ca}^{++}$  na solução podem trocar com íons  $\text{H}^+$  dos grupos silanol ou troca com os íons alcalinos que foram previamente adsorvidos na superfície da sílica. Portanto, uma expansão do gel é produzida. Nessa etapa acontece a quebra das ligações do grupo siloxano ( $\text{Si-O-Si}$ ) pela ação dos hidróxidos ( $\text{NaOH}$  e  $\text{KOH}$ ) (Figuras d e).



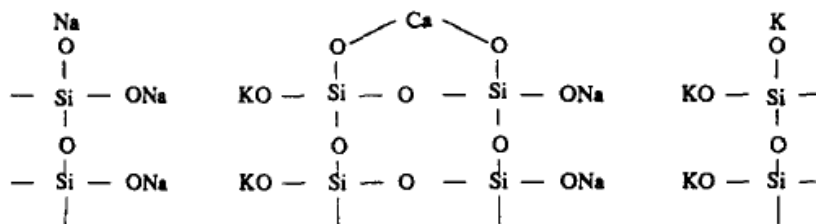
a) Sílica original.



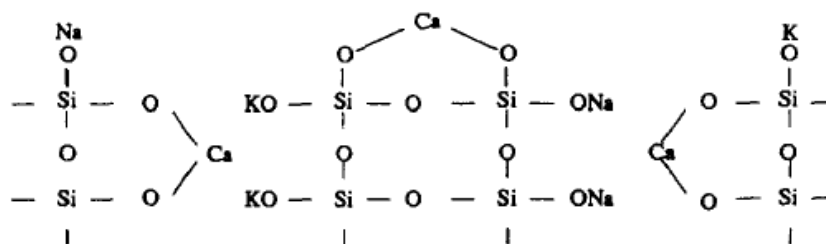
b) Troca de íons alcalinos por prótons do grupo silanol.



c) Ataque as ligações do grupo siloxano.



d) Troca de íons alcalinos na estrutura interna da sílica (formação de gel de álcali-sílica).



e) Troca de íons de cálcio para íons alcalinos.

Figura 2.8 - Esquemas das transformações químicas da reação álcali-sílica (WANG, GILLOTT,1991).

Conforme Prezzi, Monteiro, Sposito (1997) a reação álcali-sílica envolve a interação da superfície da sílica altamente carregada presente no agregado com a solução alcalina nos poros do concreto. Esta reação conduz à dissolução da sílica e a formação de um gel que é expansivo, na presença de água. Nesse comportamento de mudança de volume, a reação do produto é determinada pelos conceitos da química de superfície.

Uma dupla camada elétrica de cátions desenvolve na superfície da sílica para compensar a carga negativa. A camada dupla é composta de sódio, de potássio e íons de cálcio. Segundo os autores e baseado no modelo de dupla camada difusa, proposto por Gouy-Chapman, a estimativa da quantidade de pressão, através da expansão gerada no concreto, induzida pela reação álcali-sílica pode ser feita utilizando o modelo de Gouy-Chapman da parte difusa da dupla camada elétrica, Figura 2.9.

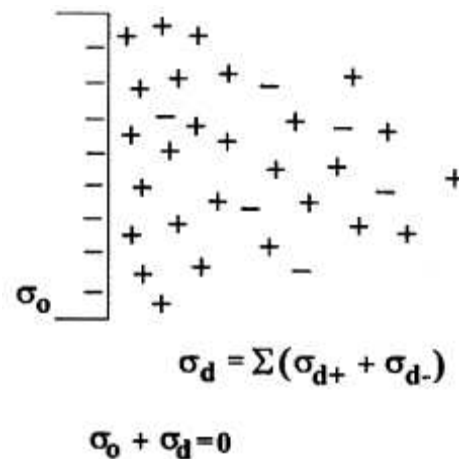


Figura 2.9 - Modelo de Gouy-Chapman da parte difusa da dupla camada elétrica.

Como forma de exemplificar Ferraris (1995) explana, conforme Figura 2.10, o mecanismo da RAA.

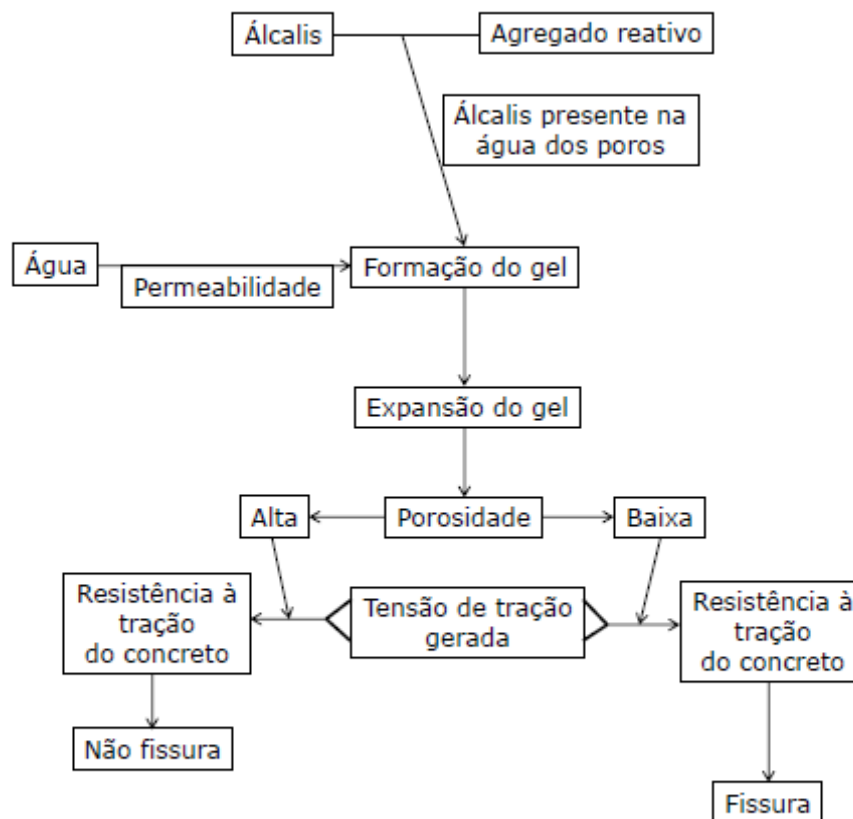


Figura 2.10 - Mecanismo da RAA ( FERRARIS, 1995) adaptado.

Devido ao concreto convencional ser um meio poroso, até certo tempo do início da reação, o gel irá preencher os vazios existentes. Isto explica porque estruturas



afetadas demoram para apresentar problemas, principalmente concretos de elevada relação água cimento (FIGUERÔA, 2006).

Fernandes (2009) estudou quatro estruturas de concreto do norte de Portugal e três barragens e uma ponte, onde gel de álcali-sílica foi encontrada em todas as estruturas, sob diferentes formas. Verificou que a textura e composição do gel variam de acordo com a sua localização no interior do concreto. Esta descoberta é de interesse no que se refere à suposição de que a composição do gel está relacionada com a sua expansividade.

O gel se constitui como material viscoso, de cor esbranquiçada, composto essencialmente de sílica, álcalis (sódio, potássio ou cálcio) e água. Ocorre que o gel assim formado é higroscópico, isto é, tem afeição por água, absorvendo-a por osmose, tornando-se um material expansivo (DU, TANG, 2014). Poole (1992) enfatiza que uma propriedade importante que rege a mobilidade do gel é sua viscosidade.

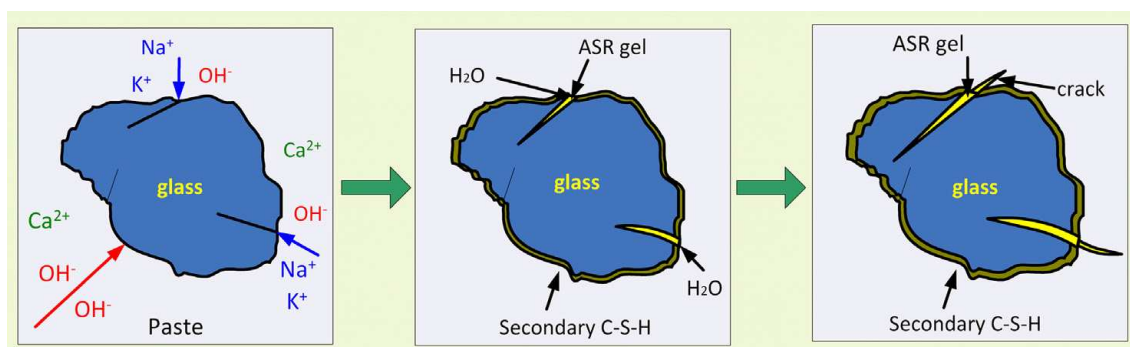


Figura 2.11 - Processo químico da formação do gel exsudado (DU; TAN, 2014).

Dyer (2015) demonstra, através da Figura 2.12, o mecanismo da RAS, que mostra que, onde a formação gel ocorre rapidamente, mas a dissolução acontece lentamente, uma grande quantidade de gel pode ser formada.

O mesmo explica que em partículas pequenas toda porção reativa da partícula pode ser convertida em gel, significando que a subsequente dissolução vai reduzir a contribuição da partícula para a expansão.

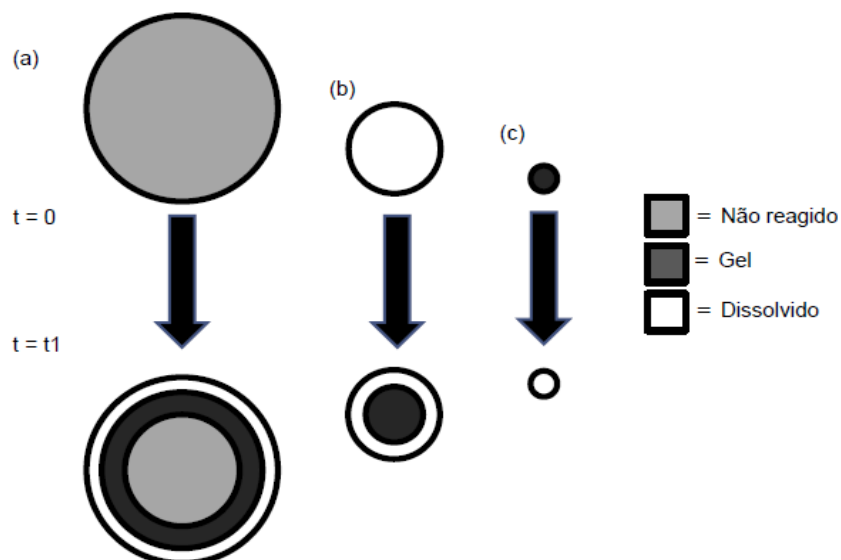


Figura 2.12 - Efeito de uma taxa relativamente rápida de formação de gel e uma taxa lenta de dissolução de gel (Adaptado de DYER, 2015).

Já em partícula grandes, a grande área da superfície e volume das partículas implica que apenas uma pequena fração dos componentes reativos do volume total de agregado terá reagido.

## 2.5 MEDIDAS PREVENTIVAS PARA RAA

Diferentes tipos de materiais têm sido estudados no concreto, como adições, buscando nestes materiais propriedades que apresentem características pozolânicas, necessárias ao combate da RAA.

Ramachandran (1995), Andriolo (1997), Monteiro et al. (1997), Furnas (1997), Hasparik, Monteiro e Carasek (1999), Falcão Bauer et al. (200), Isaia (2002), Figueroa e Andrade (2007), Bertolini (2010) e Dyer (2015) afirmam, em seus estudos no concreto, que a utilização de materiais com propriedades cimentícias como a escória de alto-forno e cinza volante, têm resolvido o problema da RAA satisfatoriamente.

Furnas (1997) relata que o engenheiro russo Alberto Osipov introduziu no meio técnico o agregado pulverizado, através de estudos realizados no CCR (concreto compactado a rolo). Osipov recomendou o uso de agregado pulverizado, como agente inibidor da reação álcali-agregado, nas especificações da Barragem de Capanda, em Angola – África, da seguinte maneira:

- A areia artificial deveria ter pelo menos 7% de material passando na peneira de nº 200 (0,075mm) e 10% passando na peneira de nº 100 (0,150mm).

Medidas preventivas adequadas antes do uso no concreto torna-o possível para evitar a instalação da RAA e conseqüentemente danos às estruturas. Destacam-se (HASPARYK, 2005):

- O estudo preliminar da rocha ou agregado a serem utilizados na obra;
- A caracterização química do cimento utilizado no concreto;
- Os ensaios de laboratórios sobre a reatividade da combinação cimento-agregado;
- O emprego das adições minerais.

Para o emprego das adições minerais / pozolânicas, Hasparyk (2005) sugere alguns teores, (Quadro 2.3):

<b>Adições minerais / pozolânicas</b>	<b>Teores de adições</b>
Sílica ativa	10 a 15
Cinza de casca de arroz amorfa	>12
Metacaulim	10 a 25
Pozolana natural	20 a 30
Cinza volante	25 a 50
Escoria de alto-forno moído	40 a 65

Quadro 2.3 - Teores de minerais / pozolânicas empregados para inibição da RAA, em substituição do cimento (HASPARYK, 2005).

Metha e Monteiro (2014) relatam que na Islândia são encontradas, somente, rochas vulcânicas reativas para fabricação de agregados e que apenas se produz cimento Portland de alta alcalinidade. Esse problema é resolvido de forma satisfatória misturando-se todo o cimento com 8%, aproximadamente, de sílica ativa.

Como medida preventiva a NBR 15577- 1/08, através da Figura 2.13, demonstra alguns exemplos e classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição.

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Estruturas provisórias		Estruturas ou elementos estruturais correntes		Estruturas especiais	
	Classificação da ação preventiva	Exemplo de estrutura	Classificação da ação preventiva	Exemplo de estrutura	Classificação de ação preventiva	Exemplo de estrutura
Não maciço e seco	Desnecessária	Edificações provisórias não expostas a umidade atmosférica	Desnecessária	Superestrutura de obras residenciais, comerciais, industriais e outras.	Mínima	Superestrutura de hospitais, estações, shopping centers, estádio e outros
Maciço e seco	Desnecessária	Edificações provisórias não expostas a umidade atmosférica	Moderada	Bases internas para equipamento pesado Edifícios com revestimento externo	Forte	
Não maciço e exposto a umidade ou em contato com água	Desnecessária	Proteções de taludes rochosos com concreto projetado, fundações de edificações provisórias, caixas d'água, canteiro de obras	Moderada	Postes, cruzetas, tubos, e outros elementos similares de concreto	Forte	obras de arte Comportas de concreto. Fundações de subestações Pré-moldados externos e de galerias Pavimentos externos Elementos de fundações de
			Forte	Vigas de baldrame e elementos de fundações de edificações correntes		
Maciço e em contato com a água	Mínima	Canteiro de obras Ensecadeiras galgávei ou integralmente em concreto Fundações de edificações provisórias	Forte	Estádios Estações de tratamento de esgoto Estruturas de fundações	Forte	Infraestruturas de obras de arte Estruturas hidráulicas Estruturas de usinas termelétricas, nucleares e eólicas

Figura 2.13 - Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição, (Adaptado da ABNT, 2008).

## 2.6 AGREGADOS PARA CONCRETO

A preocupação com os agregados para concreto vem de longa data. Torres (1936) comentava sobre as características e impurezas do agregado, que além de ser resistente, durável e sem ação química nociva sobre o cimento, não deve levar para o concreto elementos estranhos, prejudiciais às reações do cimento ou que dificultem a aderência da pasta de cimento.

Há agregados que reagem com o cimento, por isso é preciso cuidado na escolha. Os agregados que apresentam reatividade, tornam obrigatórios ensaios prévios, pois podem desagregar o concreto pelo aumento de volume que daí resulta (VERÇOZA, 1987).

Já em 1988 Cánovas explicava que os agregados não deveriam apresentar reatividade potencial com os álcalis presentes no concreto e não deveriam reagir com o cimento formando produtos expansivos que pudessem criar tensões internas na massa de concreto.

Andriolo e Sgarboza (1993) explanam que alguns tipos de agregados podem apresentar-se quimicamente reativos aos álcalis presentes nos materiais constituintes do concreto e argamassa. Em relação à influência do agregado na RAA no concreto, Ramachandran (1995) comenta que apesar de todos os agregados poderem ser considerados reativos, apenas aqueles que realmente causarem danos ao concreto são motivo de preocupação.

Andriolo (1997) afirma que durante muito tempo se visualizou os agregados como um material essencialmente inerte e quimicamente inócuo na massa de concreto. De maneira mais realista e contemporânea, essa opinião está cada vez mais sendo contestada, caindo no âmbito da “inverdade”.

Shomglin, Monteiro e Harvey (2001) lembram que o agregado representa uma porção significativa do concreto e que, ao contrário do cimento, existem opções limitadas quanto à composição e a fonte de agregado para ser utilizado.

A NBR 15577-3/08 classifica os agregados quanto à RAA, com base na análise petrográfica da rocha, em potencialmente inócuo ou potencialmente reativo (Quadro 2.4):

Classificação do agregado como potencialmente inócuo	
Mineral	Limite máximo aceitável (%)
Quartzo deformado	5
Calcedônia	3
Tridimita ou cristobalita	1
Vidro vulcânico	3
Opala	0,5

Quadro 2.4 - Classificação do agregado quanto a RAA adaptado da NBR 15577-3/08.

A NBR 15577-1/08 (Figura 2.14) traz um fluxograma geral quanto ao uso dos agregados em concretos.

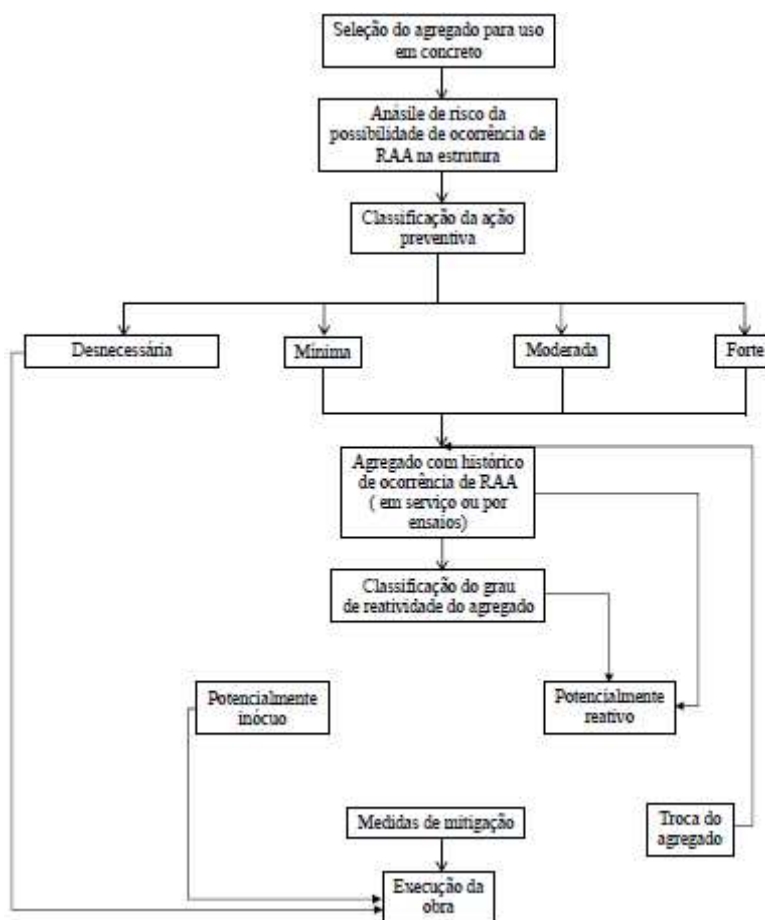


Figura 2.14 - Fluxograma geral para uso do agregado em concreto (adaptada da NBR 15577-1/08).

De acordo com NBR 7211: 2009 Agregados para concreto – Especificação, os agregados são divididos em dois tipos:

Agregado Miúdo: quando a massa dos grãos retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm  $\leq$  5% da massa total da amostra.

Agregado Graúdo: quando a massa dos grãos retidos na peneira com abertura de malha de 75 mm  $\leq$  5% da massa total da amostra.

Ainda segundo a NBR 7211: 2009,

“Os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto”.

Em resumo, são duas principais frações: agregado miúdo ( $D < 4,75$  mm) e agregado graúdo ( $D \geq 4,75$  mm) (TENÓRIO, 2007).

No Quadro 2.5 algumas características do agregado em relação às principais propriedades do concreto.

<b>Propriedades do Concreto</b>	<b>Características Relevantes do Agregado</b>
<b>Resistência Mecânica</b>	Resistência Mecânica Textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima
<b>Retração</b>	Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Limpeza Dimensão máxima
<b>Massa Unitária</b>	Massa Específica Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima
<b>Economia</b>	Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

Quadro 2.5 - Propriedades do concreto relacionadas com as características relevantes do agregado (BUEST NETO, 2006).

Bertolino, Palermo e Bertolino (2012) explicam que há uma controvérsia na literatura sobre a classificação dos agregados quanto a seu uso na construção civil. No entanto, interpretam que a classificação mais utilizada é a que considera o tamanho dos fragmentos, classificando os agregados em: finos (até 0,2 mm), médios (entre 0,2 e 2 mm) e grossos ( $> 2$  mm).

Para atender aos requisitos da indústria da construção civil, antes do uso, os agregados devem ser submetidos a uma caracterização tecnológica, de forma a avaliar as suas principais propriedades físicas, mecânicas, petrográficas /mineralógicas, químicas, visando as suas diferentes aplicações (LUZ e ALMEIDA, 2012).

No Quadro 2.6 são relacionados os principais ensaios utilizados na caracterização tecnológica de agregados para a construção civil.

Propriedades	Uso
	Concreto hidráulico
Amostragem	NBR NM 26
Terminologia	NBR 7225/9935/9942
Petrografia de materiais naturais	NBR 7389
Granulometria	NBR 7217
Materiais Pulverulentos	NBR 7219
Impurezas orgânicas	NBR NM 49/ 7221
Argila e torrões e materiais friáveis	NBR 7218
Massa específica, porosidade e absorção d'água	NBR 6458
Forma	NBR 7809
Massa unitária	NBR 7251/7810
Reatividade	NBR 9773/9771/10340
Sais solúveis	NBR 9917
Alterabilidade	NBR 12696/12697
Abrasão	NBR 6465
Esmagamento	NBR 9938

Quadro 2.6 - Normas de caracterização tecnológica de agregados para os principais usos na construção civil (Adaptado de LUZ e ALMEIDA, 2012).

## 2.7 SUBSTÂNCIAS NOCIVAS NO AGREGADO

Conforme Neto (2011), adaptado nos Quadro 2.7 e Quadro 2.8, de forma resumida, as substâncias nocivas e seus limites aceitáveis nos agregados são:

Determinação	Método de ensaio		Quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo - %
<b>Torrões em argila e materiais friáveis</b>	ABNT NBR 7218/2010		3,0
<b>Material pulverulento</b>	ABNT NBR NM 46:2003	Concreto submetido a desgaste superficial	3,0
		Concreto protegido do desgaste superficial	5,0
<b>Impurezas orgânicas</b>	ABNT NBR NM 49:2001		A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução padrão
	ABNT NBR 7221:1987	Quando a coloração da solução obtida no ensaio for mais escura do que a solução padrão, utilizar esta norma.	10%

Quadro 2.7 - Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do agregado. Adaptado de Neto (2011).



<b>Determinação</b>	<b>Método de ensaio</b>		<b>Quantidade máxima relativa à massa do agregado graúdo - %</b>
<b>Torrões de argila e materiais friáveis</b>	ABNT NBR 7218	Concreto aparente	1,0
		Concreto sujeito a desgaste superficial	2,0
		Outros concretos	3,0
<b>Material pulverulento</b>	NBR NM 46		1,0

Quadro 2.8 - Limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado graúdo com relação à massa do agregado. Adaptado de Neto (2011).

## 2.8 EFEITOS DO TAMANHO DO AGREGADO NA EXPANSÃO

A heterogeneidade e principalmente as diferentes faixas de tamanho dos agregados dificultam a tentativa de modelar as expansões por RAA.

Stanton (1940) já afirmava que o tamanho das partículas do mineral também tem uma influência importante sobre o resultado da expansão através da reação entre o cimento e o agregado. Vivian (1951) estudou o efeito do tamanho do agregado, contento componentes reativos, sobre a expansão em argamassa. Descobriu que, para o agregado estudado, partículas finas possuem maior influência na expansão que as partículas maiores. Powers (1955) ressalta que o tamanho da partícula do mineral reativo é claramente um importante fator na RAA.

A expansão, oriunda da reação álcali-agregado, aumentaria com o aumento da quantidade de material reativo até certa proporção, posteriormente a expansão diminuiria com quantidades ainda maiores. O tamanho de partícula de materiais reativos nos agregados, de moagem fina, causaria diminuição de expansão (BREDSDORFF et al., 1960).

Diamante e Thaulow (1974) realizaram um estudo sobre a expansão devido à reação álcali - agregado condicionado pela influência da dimensão do grão dos agregados reativos. As frações mais finas produziram repentina e rapidamente expansão de até 2,5 por cento; já as frações mais grossas obtiveram expansões mais lentas.

Hobbs, Gutteridge (1979) demonstraram que o dano induzido pela RAS depende do tamanho da partícula reativa afirmaram que uma boa distribuição se encaixa no intervalo (0-3 mm) e (0-15 mm) para o concreto.

ScandiuZZi e Andriolo (1986) afirmam que partículas reativas de granulometrias muito pequenas são inteiramente consumidas na fase inicial e inofensiva da reação;

os mesmos explicam que antes do aparecimento do gel expansivo, oriundo da reação, com elevada superfície específica, há uma rápida redução da concentração de álcalis, reduzindo o perigo da reação.

De acordo com o French (1994) a RAS é mais prejudicial para certos tipos de rochas reativas quando ocorrer num intervalo particular de tamanho. Tem sido observado que, para agregados reativos, tais como vidros vulcânicos de sílex, o tamanho mais prejudicial parece ser entre 3 a 7 mm.

Zhanga et al. (1999) estudaram a influência da granulométrica do agregado na expansão no teste do autoclave chinês. O resultado mostra que o efeito da adição de agregado grosso na expansão de argamassa é complexo. Podem inibir a expansão, podem ter nenhum efeito, ou podem promover a expansão. Além disso, o seu efeito será alterado com a idade. A partir dos resultados das análises experimentais e teóricas, os autores sugerem que, para a avaliação da reatividade do agregado, o tamanho único da granulometria do agregado pode ser mais razoável.

Poyte et al. (2003) desenvolveram um novo modelo que visa à previsão da expansão induzida pela RAA e a descrição da evolução química de concretos afetados. Baseia-se na descrição do transporte e reação dos íons alcalinos. Isso leva em conta a influência do tamanho da classificação do agregado reativo, ou seja, o efeito da presença simultânea de diâmetros máximos diferentes de agregados reativos no concreto.

Já Ramyar (2005) estudou o efeito do tamanho das partículas na expansão da RAA substituindo frações de agregado naturais por agregados não reativos e também por agregados reativos, de mesmo tamanho.

Concluiu que apesar da semelhança química e das composições mineralógicas, o agregado triturado causou maior expansão de RAA do que o agregado natural em todas as frações, (Gráfico 2.2).

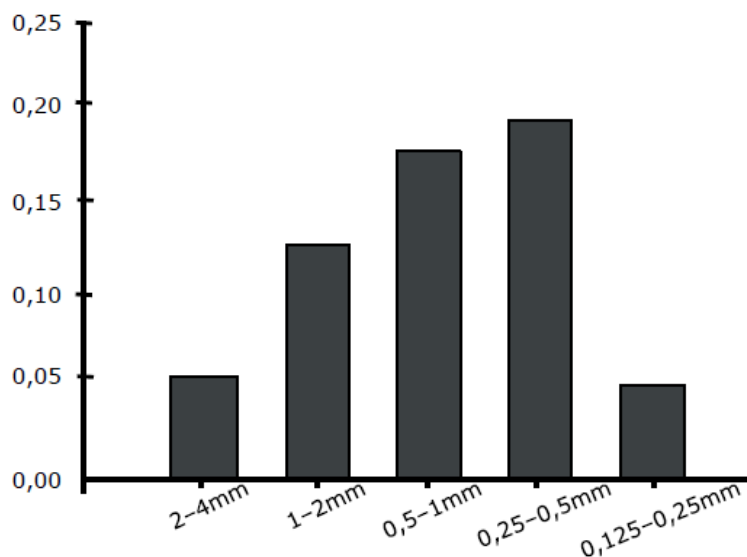


Gráfico 2.2 - Intervalos granulométricos x Expansão aos 14 dias (Adaptado de Ramyar, 2005).

Lu et al (2006) realizaram avaliações de métodos de ensaio para a determinação acelerada da RAA para avaliar a aplicabilidade de uma nova proposta de teste da barra de argamassa acelerado, o teste Chinês (CAMBT). Para agregados no exterior e determinar a fração de tamanho agregado apropriado para o teste, à influência do tamanho de partícula do agregado na expansão devido a RAA foi estudada em frações granulométricas 0,15- 0,80 milímetros, 1,25-2,50 mm e 2,5-5,0 mm.

Correlação entre expansões no teste Cambelt e no teste da barra de argamassa acelerado (AMBT), e as correlações entre os dois ensaios acelerados e o teste em prismas de concreto (CPT) foram examinadas. Os resultados indicam que, para a maioria dos agregados testados, 0,15-0,80 mm não é o tamanho dos agregados mais sensível à expansão no CAMBT, especialmente no período inicial antes de 10 dias.

A fração entre 1,25-2,50 mm de todos os agregados dá a maior expansão inicial (primeiros 10 dias). A Correlação entre expansões na CAMBT e expansões no AMBT é satisfatória. No entanto, as correlações em expansões de ambos AMBT e CAMBT com a CPT são muito pobres. A melhor correlação na CAMBT e na CPT foi obtida quando na faixa de 2,5-5,0 mm; no entanto, mais testes são necessários para estabelecer a confiabilidade total.

Andriolo (2006) realizou um estudo, em âmbito internacional, listando publicações onde se registraram ensaios referentes à ação dos finos quanto à mitigação da Reação Álcali-Agregado e seus aspectos expansivos, citando o que se segue no Gráfico 2.3.

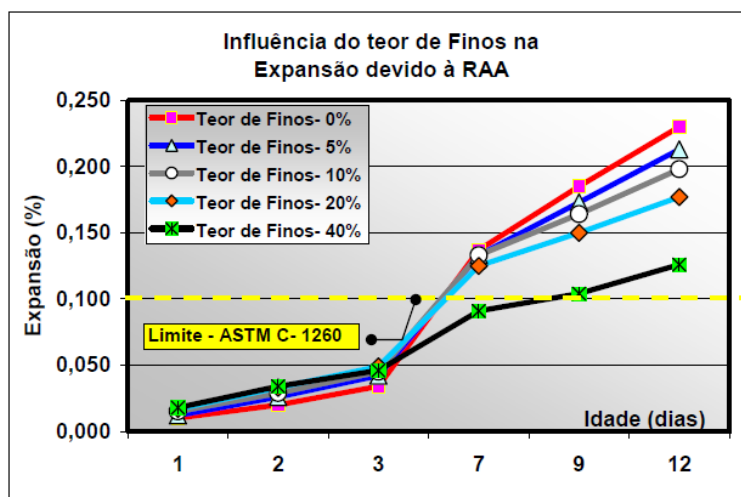


Gráfico 2.3 - Influência do teor de finos na expansão devido à Reação Álcali-Agregado (Andriolo, 2006).

Haha (2006) mostra resultados experimentais da expansão devido a RAS para argamassa e concreto com  $0,8 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ . No Gráfico 2.4 é possível observar que o valor da taxa de expansão inicial, para todas as frações, é sempre maior em argamassas do que em concretos, para todas as composições, indicando difusão mais rápida.

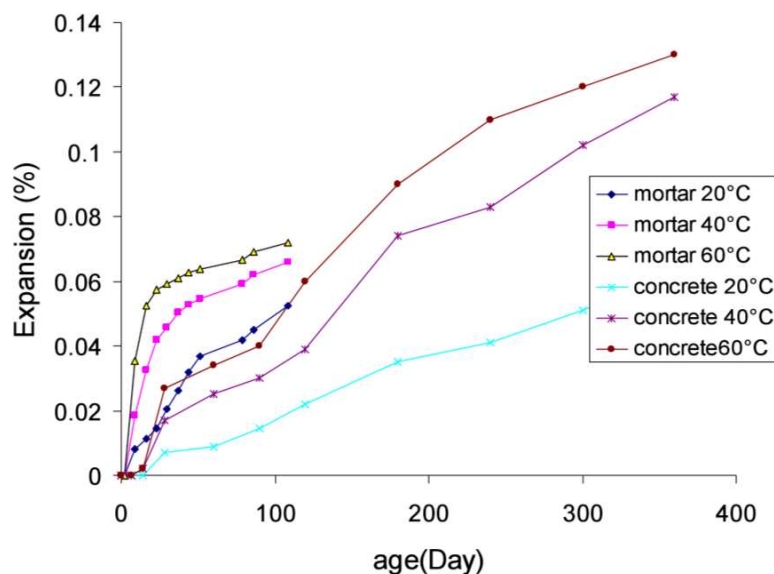


Gráfico 2.4 - Resultados experimentais da expansão devido a RAS para argamassa e concreto com  $0,8 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  (HAHA, 2006).

Portanto, pode-se concluir que menor agregado, mais rápida é a reação. Além disso, a distribuição do agregado produz um aumento na taxa mostrando um aumento da reatividade observada de argamassas. Nesse caso, a amostra de concreto apresenta a menor taxa de expansão que mostra que a constante diminuir de tamanho produzindo

uma mistura menos resistente à penetração e, assim, os álcalis tornam mais acessível à RAS.

Lu et al. (2006) avaliaram o método de ensaio de laboratório para determinar o potencial alcalino do agregado na contribuição da formação da RAA na construção da barragem de concreto Três Gargantas, no Rio Yangtze, na China. Os testes desenvolvidos para atenuar o risco de RAA, no projeto da barragem, incluíram a avaliação do potencial de reatividade alcalina do agregado usando métodos convencionais, mas também a determinação da contribuição do potencial de álcali à solução do poro do concreto. Os autores verificaram que em partículas de granulometrias muito finas, a temperatura teve um efeito semelhante sobre a liberação de álcalis nos três tipos de agregados estudados.

Multon et al. (2008) realizaram experimentos, para verificação da influência da granulometria na reação, e obtiveram resultados que mostram que a expansão RAA é sete vezes maior para partículas grossas (1,25-3,15 mm) do que no intervalo (80-160 µm).

Multon et al. (2010) também realizaram experimentos com agregados reativos em argamassas. Os resultados mostraram que não houve expansão usando partículas com diâmetro máximo de 80 µm, existindo maiores expansões, obtendo 0,33%, em partículas com diâmetro com intervalo de (0,63mm – 1,25mm).

Dunant e Scrivener (2012) usaram uma combinação de experimentos e modelagem para estudar o efeito do tamanho de agregados na manifestação de RAA. Há duas maneiras principais em que os tamanhos dos agregados podem afetar a evolução do dano: a propagação de fissuras em agregados de tamanhos diferentes e as interações entre as regiões expandidas e as não expandidas.

Através das simulações, foi sugerido que: a taxa de expansão do concreto afetado pela RAA depende do comportamento da fratura de agregados individuais na fase inicial e no comportamento da fratura da pasta nas etapas posteriores.

Todas as misturas parecem iniciar as expansões ao mesmo tempo (Gráfico 2.5). As taxas de expansão entre 0 e 100 dias apresentam comportamentos semelhantes. O intervalo 4-8 mm expande mais rápido, seguido pela 8-16 mm. Os intervalos de 0-2 mm e 2-4 mm se comportam de forma idêntica, com expansão mais lenta que as demais.

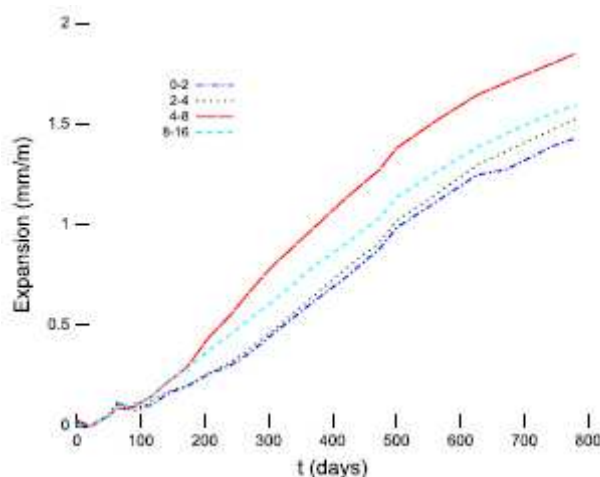


Gráfico 2.5 - Expansões no concreto em função do tempo com uma única fração reativa. (DUNANT E SCRIVENER, 2012).

Sekrane e Asroun (2014) desenvolveram modelos para prever o potencial de expansão, nos quais apresentam medições, a fim de fornecer dados experimentais sobre o efeito do tamanho de partícula de um agregado reativo na expansão em argamassa.

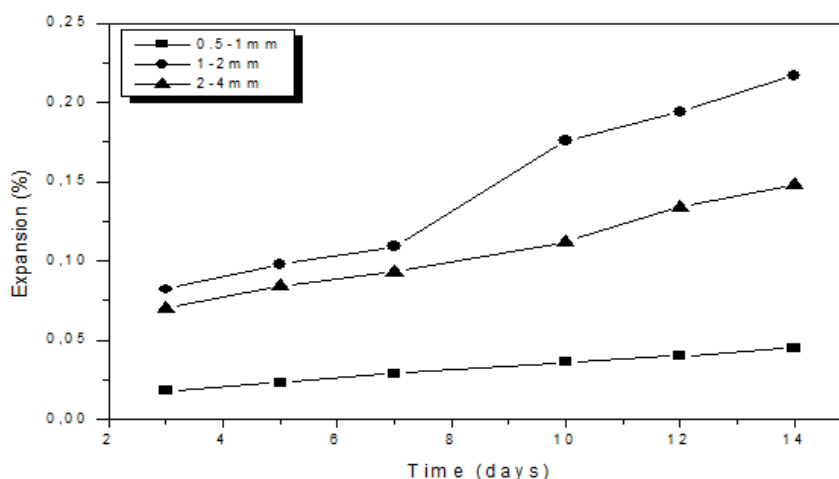


Gráfico 2.6 - Expansões de argamassas em função do tempo, com uma única fração reativa. (SEKRANE E ASROUN, 2014).

Os resultados mostram que não houve expansão em argamassas no intervalo granulométrico (0,5-1,0 mm), enquanto as partículas (1,0-2,0 mm) deram as maiores expansões (0,217%). Dois modelos são propostos: o primeiro estuda as correlações entre as expansões medidas e o tamanho dos agregados e o segundo calcula a espessura da zona porosa necessária para receber todo o volume do gel criado.

Du e Tan (2014) estudaram o efeito do tamanho da partícula do agregado miúdo na reação álcali-agregado em argamassas com vidro reciclado verde e marrom. Os

resultados revelaram que as partículas verdes, de 1,18 e 2,36 mm, apresentaram a mais elevada reatividade, enquanto os outros tamanhos resultaram em relativamente baixas expansões da RAA.

Kuo e Shu (2015) investigaram, além do efeito do tamanho da partícula, a temperatura de cura na reação de expansão do concreto. Os prismas de concreto foram confeccionados com agregados grossos e finos de vários tamanhos. Os resultados revelaram que a baixa expansão foi observada para os tamanhos grossos e as mais finas, enquanto o maior potencial de expansão ficou com as partículas de tamanho médio.

O Gráfico 2.7 apresenta um resumo de uma pesquisa realizada por Dyer (2015), mostrando as expansões geradas através da RAA com os respectivos intervalos granulométricos p $\acute$ ssimos.

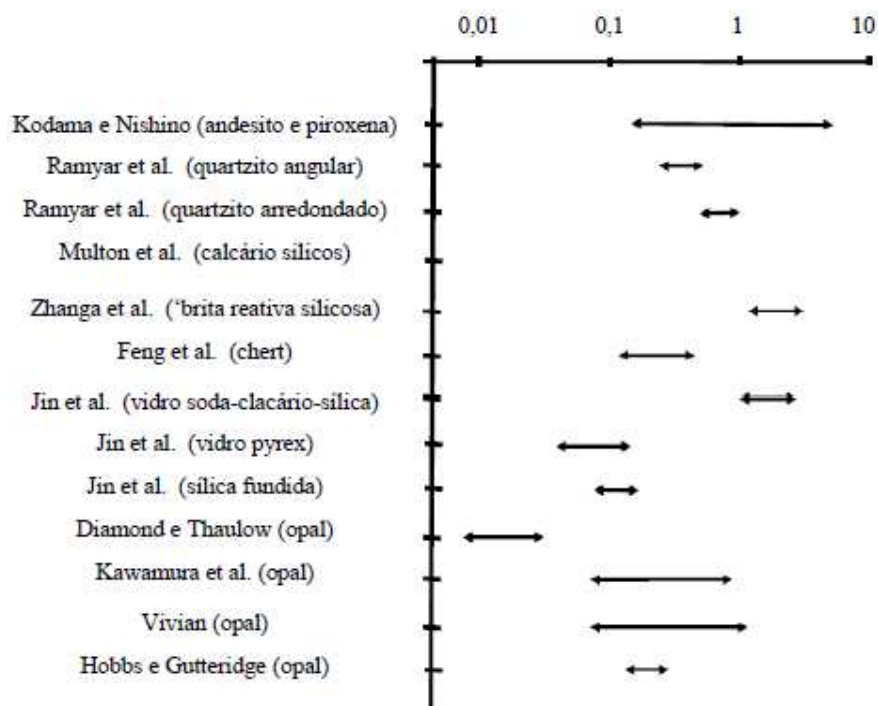


Gráfico 2.7 - Faixas granulométricas contendo o tamanho p $\acute$ ssimo de partícula versus expansão

Adaptado de DYER, 2015.

No Quadro 2.9 é apresentado um resumo, cronologicamente, de autores que estudaram a interferência da granulometria do agregado na reação álcali-agregado.

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Autor</b>	<b>Ano</b>
Stanto	1940	Suwito et al.	2002
Vivian	1950	Feng et al.	2002
Powers	1955	Poyet et al.	2004
Bredsdorff	1960	Ramyar	2005
Diamante e Thaulow	1974	Andriolo	2006
Hobbs	1979	Lu et al.	2006
Kawamura et al.	1983	Fournier	2006
Scanduzzi e Andriolo	1986	Multon et al.	2008
Kodama e Nishino	1986	Haha	2006
Baronio	1987	Multon et al.	2010
Hobbs	1988	Dunant e Scrivener	2012
Stark	1995	Du e Tan	2014
Thanga et al.	1999	Sekrane e Asroun	2014
Jin et al.	2000	Kuo e Shu	2015

Quadro 2.9 - Resumo de estudos sobre a influência da granulometria do agregado na RAA.

## 2.9 ENSAIOS

Farny e Kosmatka (1997) lembram que o histórico de desempenho de campo ajuda na avaliação da susceptibilidade de um agregado para RAA. Quando a história de campo não estiver disponível, ensaios de laboratório podem ser usados para avaliar a reatividade potencial de agregado.

Wigurn et al. (1997) ressaltam que há uma série de testes para avaliar o potencial de agregados para a reação álcali-agregado. Estes são listados, por exemplo, em ASTM C33-93. A maioria destes processos de ensaio tem sido amplamente utilizada na pesquisa de agregados, mas há sérias ressalvas quanto à aplicação de alguns deles para a seleção de materiais para estruturas. Quanto à ocorrência do fenômeno, muitas vezes exige investigação concreta da condição e avaliação do gel da RAA (Power, 1999).

Carles-Gibergues e Cyr (2002) citam que a análise de vários resultados de expansões em longo prazo, para concretos submetidos a testes acelerado com a intenção de verificar a reação álcali-agregado, mostra que, em alguns casos, a expansão continua por um longo período de tempo após o estacionamento da RAA.



Lindgård et al. (2012) alertam que vários parâmetros podem influenciar os resultados obtidos em laboratórios, principalmente em teste acelerado, em comparação com o desempenho e comportamento do material em campo.

Para esses casos, a expansão do concreto, certamente, não só é causada por RAA. A continuação da expansão provavelmente revela o comportamento do inchaço do agregado ou concreto quando ele é conservado em condições de umidade saturada. Considerando-se que esse inchaço não é insignificante em comparação com as expansões limite fixados por ensaios padrão para diagnóstico da RAA; torna-se importante avaliá-lo, a fim de evitar a rejeição inadequada de um agregado.

Luz e Almeida (2012) afirmam a importância de submeter os agregados a uma rigorosa caracterização petrográfica e mineralógica, além dos ensaios de reatividade. A seguir os métodos, defendidos pelos autores, para avaliar o potencial de reatividade alcalina de um agregado:

- Estudo completo da petrografia e mineralogia;
- Teste de barra de argamassa e teste de prisma de concreto;
- Tratamento com hidróxido de sódio.

Existem na literatura métodos de ensaios para investigação e mitigação da potencialidade reativa dos agregados. No Brasil, tem-se a NBR 15577 na qual é dividida em 6 partes. As partes de 3 a 6 são métodos de ensaios para a verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis: análise petrográfica (parte 3), a determinação da expansão através de barras de argamassa pelo método acelerado (parte 4), e a determinação da expansão em prismas de concreto (parte 6).

Quando o agregado é diagnosticado com potencial de reação acima do limite mínimo a mitigação da expansão em barras de argamassa pode ser analisada através da determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado (parte 5). Há ainda a literatura internacional como, por exemplo, método das barras ASTM C-227 e método acelerado das barras ASTM C-1260.

Para a avaliação do grau de reatividade potencial do agregado para a decisão de uso, a NBR 15577-1/08 fornece um fluxograma, apresentado na Figura 2.15, que estabelece uma sequência de procedimentos para essa verificação.

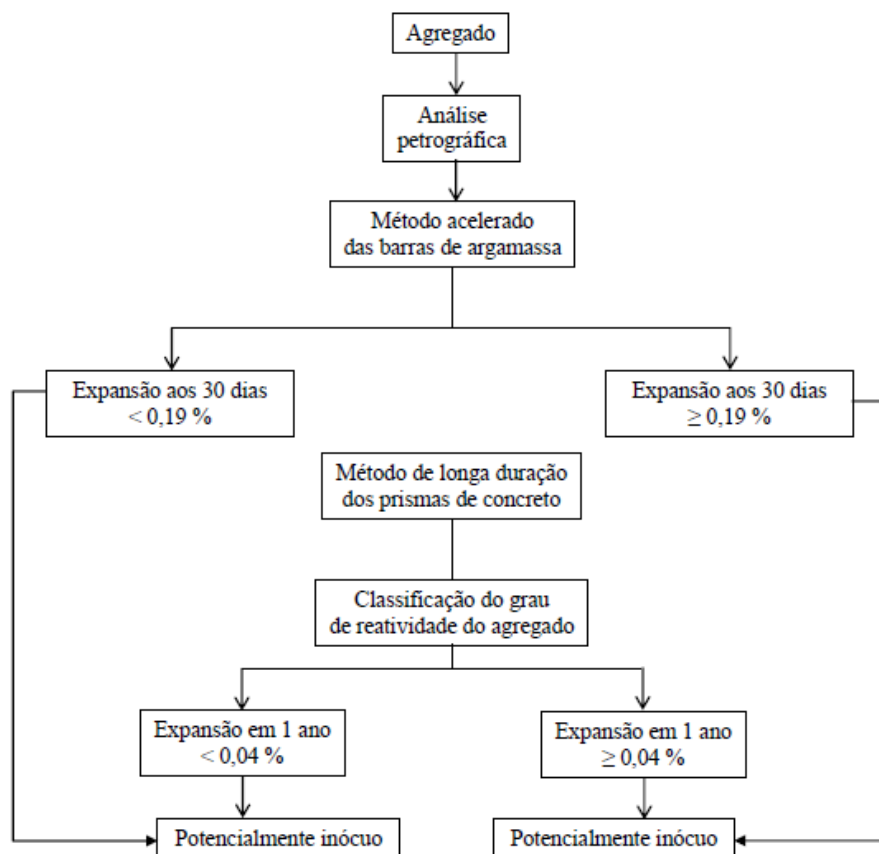


Figura 2.15 - Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à reação álcali-agregado adaptado da NBR 15577-1/08.

Sanchez (2008) realizou um estudo dos principais e mais utilizados métodos de ensaio utilizados na avaliação das reações álcali-agregados em concreto fazendo, ao final, uma análise crítica da eficiência e confiabilidade de cada um deles. O estudo propõe um fluxograma para a classificação em laboratório do agregado, (Figura 2.16).

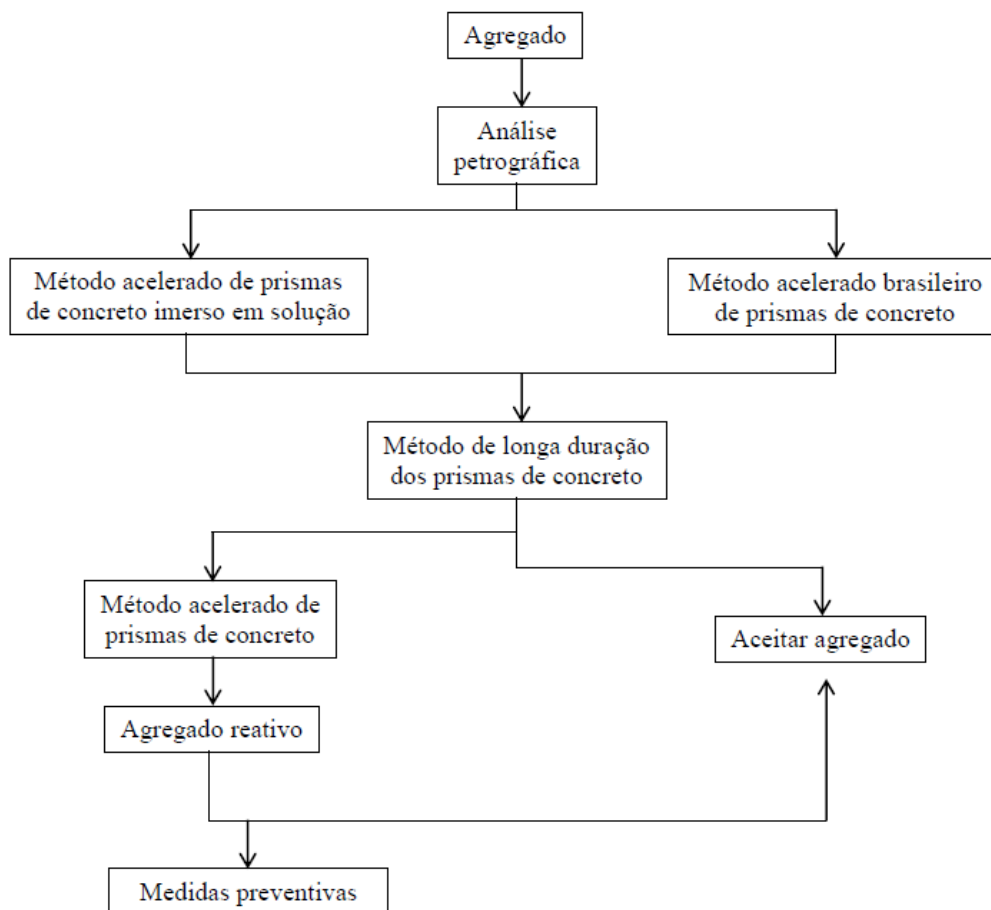


Figura 2.16 - Fluxograma de classificação de agregados. Adaptado de SANSHEZ, 2008.

### 2.9.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Este método caracteriza o agregado determinando a mineralogia e a textura (FIGUERÔA E ANDRADE, 2007).

Os métodos usuais de análise petrográfica devem seguir a NBR 15577-3/08:

- Examinar macroscopicamente a amostra e classifica-la quanto ao tipo se cascalho, pedrisco, fragmento de rocha, testemunho de sondagem ou pedra britada;
- Avaliar as propriedades físico-mecânicas, classificando se a rocha constituinte é muito coerente, coerente, pouco coerente ou friável;
- Examinar macroscopicamente a rocha constituinte e registra a cor e a estrutura (maciça, foliada, bandada ou outra);
- Examinar a seção delgada ao microscópico e registrar as seguintes características da rocha: textura, granulação, composição mineralógica, pre-

sença de minerais e fases deletérios quanto à RAA e estimativa da quantidade de quartzo microgranular.

Portanto, a análise Petrográfica tem de ser realizada por geólogos experientes (Wigum, 1995).

Como exemplo da importância desse ensaio, Lukschová, Prikryl e Pertold (2009) notaram fissuras nos revestimentos num certo número de pontes de concreto construídas durante o Século 20. Os fenômenos observados foram atribuídos à reação álcali-agregado, após exame macroscópico detalhado. Várias abordagens analíticas - microscopia óptica de secções finas, análise de imagem (petrografia), foram utilizadas a fim de:

- Quantificar a extensão dos danos (percentagem de volume de gel de álcali-sílica);
- Determinar as causas dos danos.

Os autores também afirmam que a presença do gel da RAA pode ser controlada pela petrografia dos agregados.

Já Fernandes (2009) usou a técnicas da análise Petrográfica em estruturas de concreto, três barragens e uma ponte em Portugal em que foram identificados sinais de deterioração.

A análise Petrográfica fornece informações importantes sobre a presença de minerais potencialmente (óptica e estereoscópica) (SANCHEZ; KUPERMAN; HELENE, 2011). É um dos principais ensaios para formalização do diagnóstico da presença de material reativo.

## **2.9.2 DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO**

De acordo com Andriolo (1992), o ensaio das barras de argamassa foi desenvolvido, entre 1942 e 1947, inicialmente por Stanton. Através desse ensaio é possível observar as expansões de “barrinhas” de argamassa, permitindo caracterizar o agregado quanto ao comportamento com os álcalis.

A NBR 15577-4/08 descreve o método.

O ensaio é realizado com cimento padrão (isento de álcalis), água destilada ou deionizada, para que a fonte de fornecimento dos álcalis seja basicamente o agregado. São moldados três barras de argamassa (25 mm x 25 mm x 285 mm), no traço de 1:

2,25 de relação cimento/agregado e relação água cimento igual a 0,47 (em massa). As barras são submetidas a uma cura úmida por 24h, na sequência são realizadas leituras no conjunto de barras e posteriormente são colocadas e mantidas por 24h em banho com água, onde a temperatura no banho é elevada, em aproximadamente 6 horas, a temperatura de 80 °C, em seguida as barras são transferidas para um recipiente com solução suficiente de NaOH ( $1 \pm 0,01$ ) N à ( $80 \pm 2$ ) °C e permanecem por um período de 28 dias. As leituras, para verificar a expansão, são efetuadas nas idades de 16 dias e 30 dias, contados a partir da moldagem.

### 2.9.3 DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO EM PRISMAS DE CONCRETO

Ainda, segundo Andriolo (1992) o ensaio do prisma de concreto foi desenvolvido entre 1946 e 1947, porém não é muito utilizado, no entanto, Lindgård et al. (2013) defendem o ensaio de prismas de concreto (CPT), desenvolvido para avaliação da reatividade dos agregados, onde, este teste pode ser adequado para verificar e avaliar o comportamento do concreto frente a RAA.

O método consiste em avaliar, por meio da variação do comprimento de prismas de concreto, a disposição de um agregado (gráudo ou miúdo) em participar ou não da reação deletéria,. Também pode ser utilizado na investigação de combinações de agregados miúdos e gráudos, assim como da combinação com o cimento e eventuais adições.

Para a aplicação, são moldados para cada avaliação, três prismas de concreto (Figura 3.12) com dimensões de (75 x 75 x 285) mm. Após a moldagem, são submetidos à cura, em câmara úmida ou tanque de cura, durante as primeiras 24 horas na desforma, fazem-se as primeiras leituras e na sequência os prismas são acondicionados em recipientes, herméticos, tronco-cônicos, revestidos com material absorvente, com volume entre 19 e 22 litros, com água até a altura de (20±5)mm acima do seu fundo, providos de grade ou prateleira de fundo em ambiente com temperatura de (38±2)°C e fluxo de ar no entorno do recipiente, durante todo o ensaio De acordo com Sanchez (2008), os recipientes não deverão ter contato com as paredes e piso (ou fundo) das áreas destinadas aos seus acondicionamentos.

As expansões dos prismas são avaliadas nas idades de 7, 28, 56 dias e posteriormente em períodos mensais dos 3 aos 12 meses. De acordo com as normas Brasileiras NBR 15577-6 (ABNT, 2008 é caracterizado como inócuo, sempre que a expansão após

1 (um) ano for inferior a 0,04% e potencialmente reativo, quando as expansões nessa mesma idade, forem superiores a 0,04%.

#### **2.9.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é um método que possibilita classificar os diversos tipos de géis formados pela RAA. Pode-se também identificar as bordas de reação na interface da pasta com o agregado e a existência de gel álcali-silicoso dispersas na argamassa, poros e fissuras do agregado.

Amostras de concreto ou argamassa que foram submetidas a ensaios para se avaliar a reatividade potencial do agregado ou as amostras oriundas de obras com indícios de expansão podem ser avaliadas por este método. Segundo Hasparyk (1999), as amostras são submetidas à análise visual através da lupa estereoscópica para identificação dos pontos que serão analisados.

Após análise visual, as amostras são analisadas através do microscópio eletrônico de varredura, utilizando-se, em conjunto, a técnica de espectrometria de energia dispersiva, que possibilita uma correlação entre as diversas morfologias características dos produtos encontrados e seus componentes químicos.

A microscopia eletrônica de varredura permite analisar o gel produto da reação, através de bordas nas interfaces da pasta/agregado em amostras polidas, dos poros das amostras, bem como dispersos na argamassa e depositados nas fissuras dos agregados. Com as amostras polidas é possível observar imagens com controle de tonalidades e obtenção da composição química (HASPARYK, 1999).

Esse método permite análises em grandes ampliações, possibilitando a identificação precisa da morfologia dos produtos de RAA, no qual pode-se verificar a deterioração da estrutura devida à concentração dos produtos e classificar-se os vários tipos de géis formados.

## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de agregados graúdos utilizados nesta pesquisa são provenientes de uma pedreira localizada na Região Metropolitana do Recife, em exploração há mais de 60 anos. Para a escolha da pedreira foi considerada como referência efetiva a potencialidade reativa do agregado, escolhido deliberadamente para o estudo. As amostras foram coletadas em vários pontos da pedreira. Considerando a essencialidade da caracterização do agregado quanto as suas propriedades mineralógicas foram priorizados os ensaios petrográficos e as imagens no MEV.

Analisou-se o potencial das faixas granulométricas realizando ensaios em barras de argamassas pelo método brasileiro, segundo a NBR 15577-4/08, fazendo uma análise comparativa das expansões, utilizando uma amostra padrão e cinco faixas granulométricas diferentes (A= 2,36 mm; B= 1,18 mm; C= 0,6 mm ; D= 0,3 mm e E= 0,15 mm).

A classificação das amostras foi considerada segundo a NBR 15577-1/08:

- Potencialmente inócuo: expansão menor que 0,19% aos 30 dias;
- Potencialmente reativo: Expansão maior ou igual que 0,19% aos 30 dias.

O agregado foi coletado, Figura 3.1, na pedreira e previamente triturado para se obter a faixa granulométrica específica para realização do ensaio. A dosagem dos prismas de argamassa foi feita como prescreve a NBR 15577-4/08, a trituração e separação das faixas granulométricas foram realizados no Laboratório de Ensaios e Materiais da Construção Civil – LETMACC do SENAI-PE. A moldagem, assim como a determinação da expansão pelo método acelerado em barras de argamassa foram realizadas no laboratório da empresa Tecnologia da Construção e Materiais (TECOMAT) em Recife-PE.



Figura 3.1 - Coleta das amostras.

Visando um maior entendimento dos resultados das expansões das barras de argamassa foram realizadas análises petrográficas do agregado e das barras de argamassas, no laboratório do Departamento de Engenharia de Minas – UFPE e a caracterização da microestrutura foi realizada no Centro de Tecnologia Estratégica do Nordeste – CETENE.

A Figura 3.2 apresenta o procedimento da realização dos ensaios.

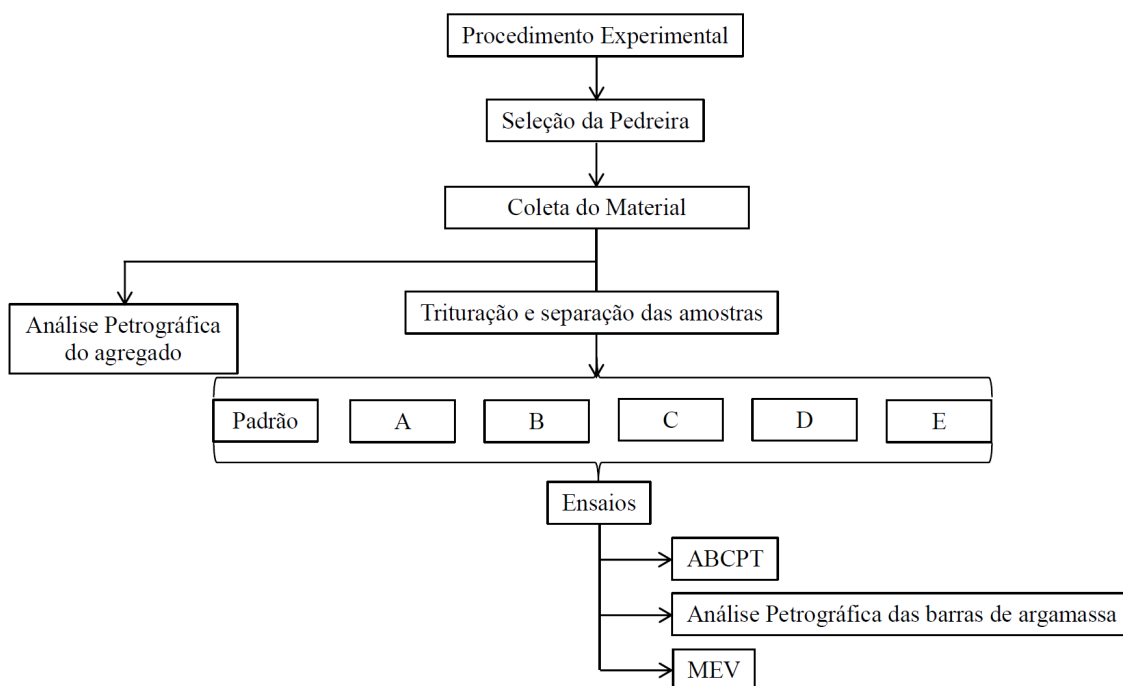


Figura 3.2 - Procedimento do programa experimental.



### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 CIMENTO

Devido a dificuldade da aquisição do cimento padrão foi utilizado na pesquisa o cimento CP V - ARI, fornecido pela concreteira POLIMIX Olinda-PE. A escolha do CP V – ARI justifica-se por possuir baixo teor de adições, em relação aos outros cimentos comercializados no Brasil, e também por apresentar maior velocidade de reação de hidratação, sendo esta característica muito importante para a realização de ensaios acelerados. A escolha deste cimento baseia-se nas normas brasileiras que determinam os respectivos teores de adições, Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Tipos de cimentos produzidos no Brasil e respectivos teores de adições.

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clinker + Gesso	Escoria de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Comum	CP I	100	0			NBR 5732
	CP I - S	99 - 95	1 - 5			
Composto	CP II - E	94 - 56	6 - 34	-	0 - 10	NBR 11578
	CP II - Z	94 - 76	-	6 - 14	0 - 10	
	CP III - F	94 - 90	-		0 - 10	
Alto-forno	CP III	65 - 25	-	35 - 70	0 - 5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
Alta Res. Inic.	CP V - ARI	100 - 95	*	*	0 - 5	NBR 5733

Nas Tabelas 3.2 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** encontram-se respectivamente os resultados obtidos da caracterização física e química do cimento, conforme ficha-técnica fornecida pela concreteira e constantes no Anexo A, utilizados nas confecções das barras de argamassa do ensaio acelerado.

Tabela 3.2 - Características físicas do cimento.

Características avaliadas		CPV ARI RS	
		Resultado fornecido	Exigências da NBR 5737/92
Resistência à compressão 1 dia		19,23	> 14
Resistência à compressão 3 dia		29,23	> 24
Resistência à compressão 7 dia		35,55	> 34
Resistência à compressão 28 dia		44,9	
Finura	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,14	
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4229	≥ 3000
	Resíduo na peneira N° 300 (%)	1,97	
	Resíduo na peneira N° 200 (%)	0,1	≤ 8,0
Expansibilidade a quente (mm)		1,09	< 5
Pega	Início	136	> 1
	Fim	197	< 10
Consistência normal (%)		29,63	

Tabela 3.3 - Característica química do cimento.

Características avaliadas		CPV ARI RS	
		Resultado fornecido	Exigências da NBR 5733/XX
Perda ao fogo (%)		3,55	≤ 4,5
RI (%)		0,99	≤ 1
SO <sub>3</sub> (%)		3,4	≤ 3,5
CaO livre (%)		2,98	≤ 3,5

### 3.1.2 ÁGUA E SOLUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO

Á água de amassamento utilizada na mistura da argamassa para confecção das barras pelo método acelerado e na solução de NaOH foi água destilada, (Figura 3.3), e mantida na temperatura de  $23 \pm 2$  °C, fornecida pelo Laboratório de Química da UNICAP, conforme a NBR 15577-4/08.

Para a preparação das soluções foi utilizado NaOH p.a com a concentração final de 1 N.



Figura 3.3 - Água destilada utilizada no amassamento da argamassa.

### 3.1.3 AGREGADO

O agregado retirado da pedreira foi selecionado tomando como referência os trabalhos realizados por Figuerôa e Andrade (2007) e Arrais e Melo (2012). Estes autores verificaram elevado potencial de reatividade álcali-agregado nos agregados das principais jazidas da RMR.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 DOSAGEM DA ARGAMASSA PARA MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Para realizar os ensaios, os agregados a serem ensaiados foram selecionados e amostrados conforme NBR 15577-2. Após esse procedimento foram britados, peneirados, classificados, lavados, secados em estufa conforme Tabela 3.4. A proporcionalidade dos materiais: cimento CP V, agregado miúdo e água destilada, seguir a prescrição da ABNT NBR 15577-4/08, a qual determina a preparação de três barras prismáticas de argamassa com dimensões de 2,5 cm de largura, 2,5 cm de espessura, e 28,5 cm de comprimento, contando com uma relação de água destilada/cimento CP V de 206,8:440,0, bem como uma proporção cimento CP V/agregado miúdo de 1:2,25.

Tabela 3.4 - Granulometria e quantidade do agregado miúdo para moldagem da amostra padrão.

Peneira com abertura de malha (mm)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75	2,36	10	99,0
2,36	1,18	25	247,5
1,18	0,6	25	247,5
0,6	0,3	25	247,5
0,3	0,15	15	148,5

A amostra padrão foi utilizada como referência. As amostras A, B, C, D e E foram confeccionadas com o agregado triturado de modo que, a massa de cada uma fosse composta por uma única granulometria ( Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Variação das expansões das amostras

Composição dos materiais			
Amostra	Abertura da peneira (mm)	Massa %	Massa (g)
A	2,34	100	990,0
B	1,18	100	990,0
C	0,6	100	990,0
D	0,3	100	990,0
E	0,15	100	990,0
Cimento CP V			440,0
Água Destilada			206,8

### 3.2.2 EXPANSÕES EM BARRAS DE ARGAMASSA CONFORME A NRB 15577-4:2008

A Foto 3.1 mostra o processo de trituração do agregado, tanto para a amostra padrão, quanto para as demais. Após a trituração do agregado, realizou-se o peneiramento para separação dos intervalos das frações. Já as Foto 3.2 e 3.3, representam o material dividido nas faixas granulométricas conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e a Tabela 3.5.



Foto 3.1 - Moagem do agregado.



Foto 3.2 - Frações granulométricas para confecção da barra padrão.



Foto 3.3 - Frações granulométricas das amostras A, B, C, D e E.

Os materiais constituintes: cimento, agregado e água foram pesados e adicionados na cuba e misturados com a argamassadeira, como mostra a (foto 3.4), formando a argamassa e foram moldados três corpos de prova, para a amostra padrão, e seis corpos de prova para cada uma das amostras A, B, C, D e E, (Foto 3.5).



Foto 3.4 - Mistura da argamassa.



Foto 3.5 - Moldagem das barras de argamassa.

Após a realização das moldagens, as barras tanto a padrão quanto as A, B, C, D e E foram colocadas em câmara úmida, (Foto 3.6), com umidade de 95% e temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  permanecendo por 24h. Depois de desformadas foram realizadas as leituras iniciais com auxílio do relógio comparador, (Figura 3.9).



Foto 3.6 - Barras de argamassa na câmara úmida.

Feitas as leituras iniciais, as barras de argamassas, moldadas a partir de todas as faixas granulométricas, foram colocadas em recipiente de armazenamento com água no tempo total de 24 h; o recipiente foi aquecido para a temperatura de até  $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ , (Foto 3.7).



Foto 3.7 - Tanque de imersão.

Posteriormente foram realizadas as leituras zero e a transferências das barras para um recipiente com solução suficiente de NaOH ( $1 \pm 0,01$ ) N à  $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$  onde permaneceram durante 28 dias, (Foto 3.8).



Foto 3.8 - Barras de argamassa em recipiente com solução de NaOH.

As leituras, para verificar a expansão, foram efetuadas na mesma idade, após o mesmo tempo de cura, no mesmo dia para manter as características iguais, mesmas condições, contados a partir da moldagem.



Foto 3.9 - Medições das expansões nas barras de argamassa.

Durante o processo de cura em solução foram realizadas leituras com o uso de relógio comparador; as medidas foram feitas comparando a expansão com o tamanho original com precisão de 0,001%. A expansão das barras foi acompanhada através de

realização de medições nas idades de 2, 4, 7, 9, 12, 16, 18, 21, 24, 28 e 30 dias, contados a partir da moldagem.

A variação do comprimento das barras de argamassa foi calculada de acordo com a equação a seguir:

$$E = \frac{L_1 - L_o}{L_n} \times 100$$

Onde:

E = Expansão longitudinal, em mm/m;

Ln = Comprimento nominal da barra, m;

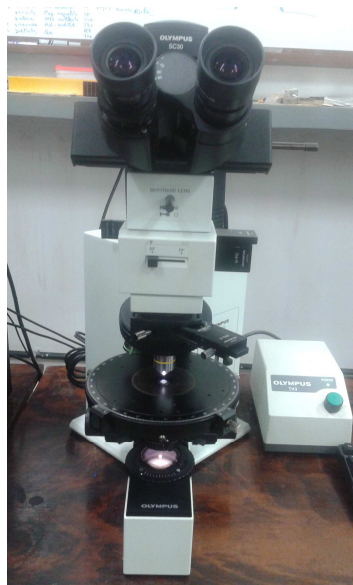
L1 = Leitura da barra na idade do ensaio, em mm;

Lo = Leitura inicial da barra após 24 horas de imersão em água, em mm.

### 3.2.3 ANÁLISE PETROGRÁFICA DO AGREGADO E DAS BARRAS DE ARGAMASSA

Embora se saiba do potencial reativo do agregado utilizado no experimento, a análise petrográfica foi utilizada no estudo para complementar a comprovação da potencialidade da influência da granulometria do agregado na expansão.

Os ensaios foram realizados em lâminas delgadas, com espessura aproximada de 30  $\mu\text{m}$ , preparadas com a rocha que constitui o agregado e com amostras das barras de argamassa observadas em microscópio ótico, (Figura 3.10).



A)



B)





C)



D)

Foto 3.10 - A) Microscópio óptico, B) lâmina, C) agregado D) barras de argamassa para o ensaio petrográfico.

De acordo com a norma da NBR 15577-3/08, as análises petrográficas da rocha e dos corpos-de-prova avaliados foram realizadas no Laboratório de Petrologia do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) utilizando microscópio óptico polarizador marca OLIMPUS BX 41.

### 3.2.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Para a microscopia eletrônica de varredura foi selecionado um fragmento de cada prisma de argamassa submetido ao ensaio acelerado de expansão após os 30 dias de idade em regiões previamente escolhidas sob suspeita de maior probabilidade de ocorrência do gel. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em dessecador para não adquirirem umidade do ambiente.

## CAPÍTULO 4

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados, bem como as suas discussões.

#### 4.1 ENSAIOS PETROGRÁFICOS

##### 4.1.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA DO AGREGADO

Nos estudos petrográficos das rochas constatou-se que é metamórfica denominada gnaisse-diorítico, apresentando coloração cinza, granulação fina e estrutura milonítica. A amostra é rica em minerais do tipo biotita. As análises microscópicas da rocha evidenciaram estrutura geral marcada por deformação frágil-dúctil e localizadamente a presença de fraturas, quartzo deformado com extinção ondulante  $22^\circ$  e as micas retratando melhor a forma sigmoidal. Presença de plagioclásio com relevo alterado, os minerais escuros coloridos mudando de cor, sendo esse comportamento típico das micas, Foto 4.1.

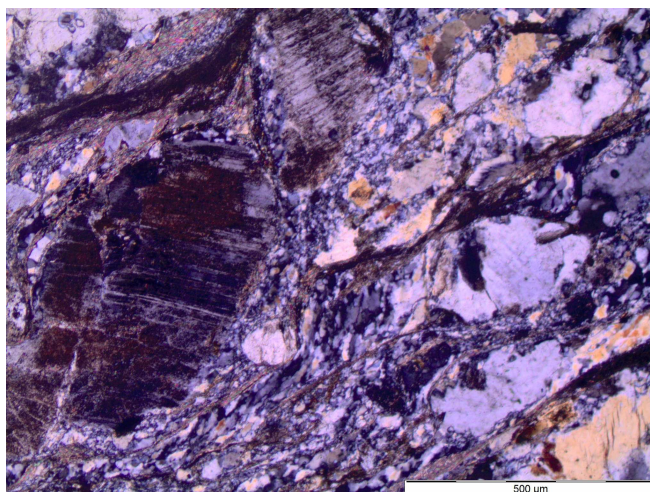


Foto 4.1 - Observação com Nicol Cruzado, aumento de 40 vezes, de cristais maiores de plagioclásio bordejado por quartzo.

Através da Foto 4.2, é possível observar a mudança de coloração da mica rica em óxido de ferro, tendo cores marrons escuras para marron claro.

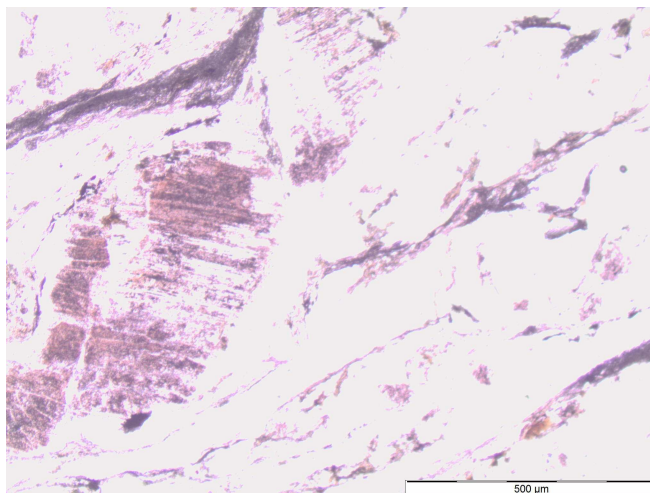
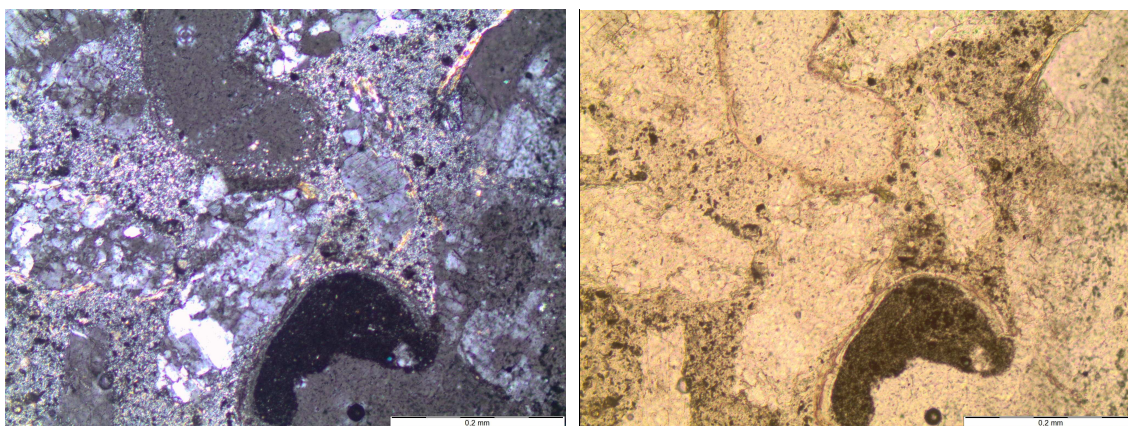


Foto 4.2 - Observação com Nicol Paralelo, aumento de 40 vezes, de feldspato plagioclásio.

#### 4.1.2 ANÁLISE PETROGRÁFICA DAS BARRAS DE ARGAMASSA

A amostra C possui não mais do que 6% a 10% de biotita: 42% de arnotita e 58% de albita, Foto 4.3. É notável a presença de feldspato (plagioclásio) de tamanho 0,3mm, existência no meio do material claro de material escuro e bordas de reação enriquecidas de ferro.



A)

B)

Foto 4.3 - A) Observações Nicol Cruzado, aumento de 100 vezes, bordas de reação enriquecidas em ferro; B) Observações Nicol Paralelo, aumento de 100 vezes, feldspato plagioclásio.

## 4.2 EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO

Os resultados obtidos com estes ensaios foram analisados através das tabelas e gráficos contidos no Apêndice A, ilustrando o comportamento expansivo médio dos corpos-de-prova, individuais de cada amostra, ao longo do tempo. Os valores das expansões foram calculados referenciando sempre à leitura inicial, ou seja, quando as barras não tinham sido expostas à solução de NaOH.

Através do Gráfico 4.1 é possível observar que todas as amostras iniciam a expansão ao mesmo tempo. As taxas de expansão, das amostras, entre 0 e 4 dias apresentam comportamentos semelhantes. A amostra padrão chegou ao limite de expansão mais rápido (16 dias), seguido pela amostra C. As amostras A e E se mantiveram conforme a Norma NBR 15577-1/08, inócuas até o período de 30 dias.

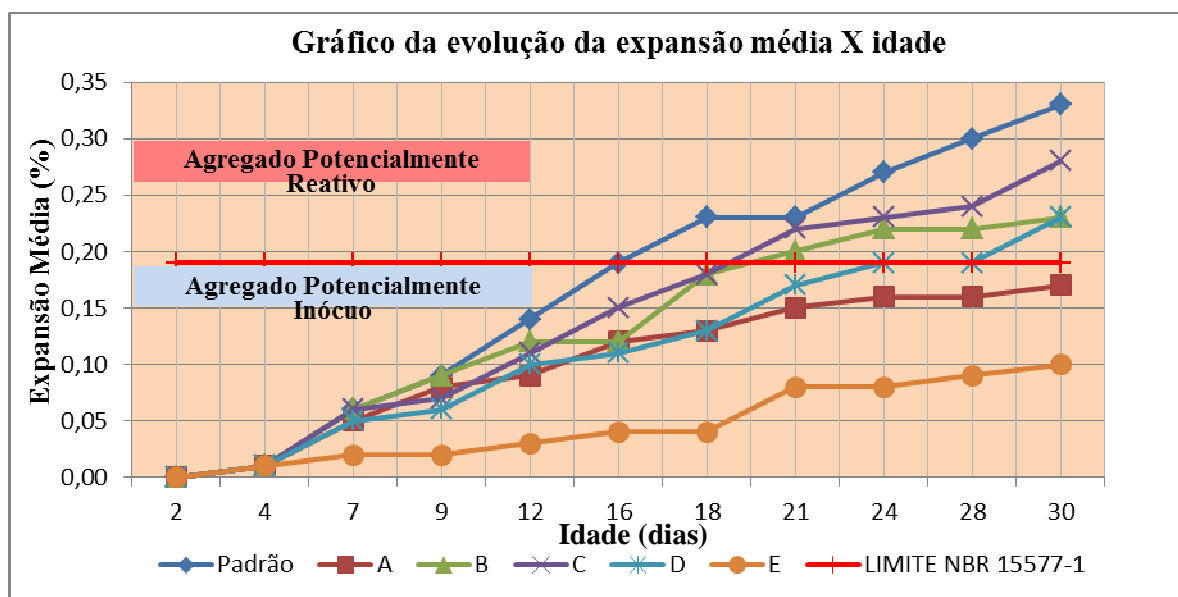


Gráfico 4.1- Comparação das evoluções da expansão média de cada amostra x idade.

Os resultados apresentados no Gráfico 4.1 e na Tabela 4.5 indicam que as amostras padrão, B, C, e D, foram classificadas como reativas.

Analisando o Gráfico 4.1, embora se perceba tendências divergentes do crescimento das expansões, percebe-se, também, o aumento das expansões para todas as amostras. Não existe sinalização de estabilização das expansões ao final dos 30 dias de ensaio: é provável que as expansões continuassem aumentando caso as leituras prosseguissem além do período de ensaio descrito na norma.

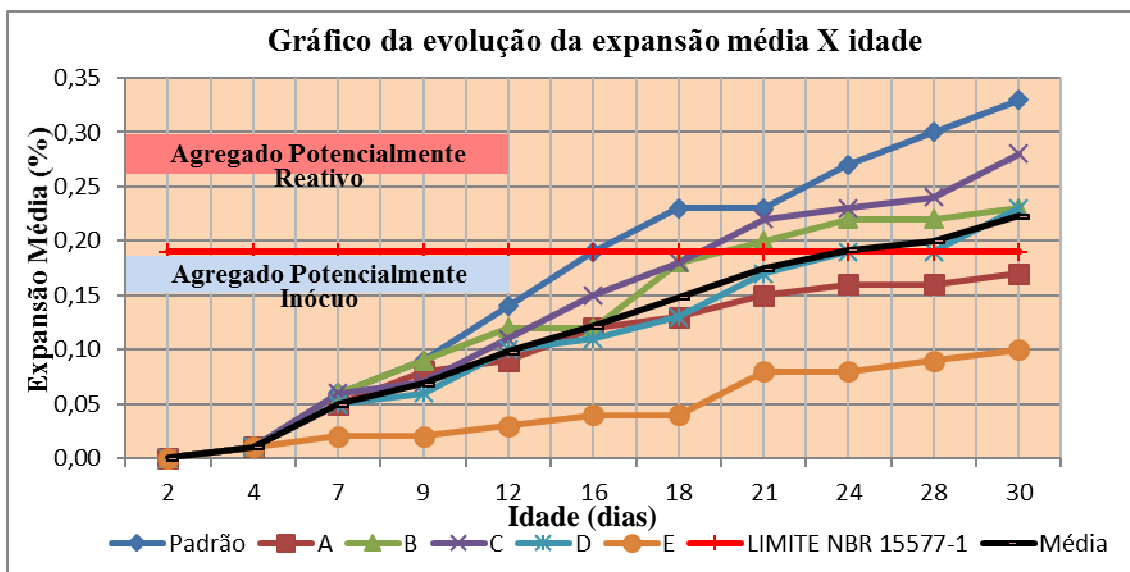


Gráfico 4.2 - Comparação entre as expansões médias x média das expansões.

Conforme o Gráfico 4.2, vê-se também que as amostras apresentaram dispersão elevada da média. A seguir os critérios utilizados na comparação da variação das médias das expansões:

- Através da revisão bibliográfica, observa-se que a expansão da RAA depende de uma série de fatores, inclusive da granulometria do agregado. O que se quer saber é se a granulometria é um fator tão importante ao ponto de determinar significativamente a probabilidade da expansão, Figura 4.1.

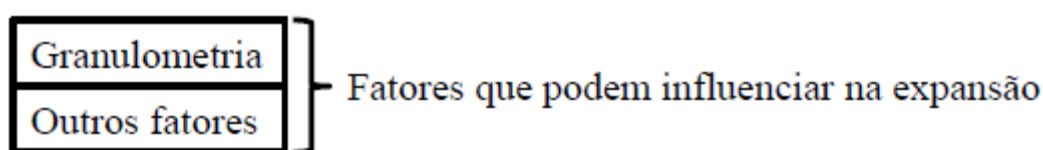


Figura 4.1 - Fatores possíveis para expansão.

- A caixa (Figura 4.1) representa todos os fatores possíveis;
- O fator “granulometria” seria responsável por uma parcela dessa caixa;
- O resto seria devido a outros fatores (Resíduo);
- A granulometria seria um fator importante? Figura 4.2.

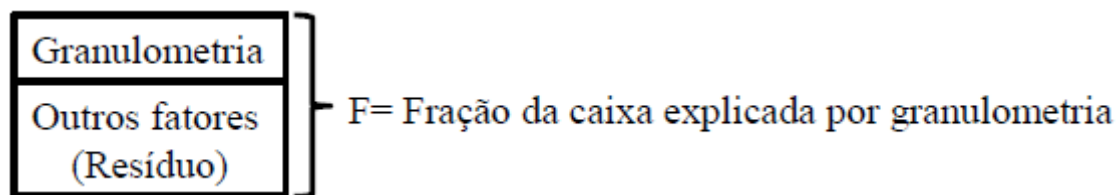


Figura 4.2 - Caixa dos fatores responsáveis possíveis por expansões: Granulometria x resíduo.

Com intenção de realizar comparação envolvendo mais de duas situações experimentais (o eixo y contínuo/expansão e eixo X categórico com mais de dois níveis /mais de duas faixas granulométricas, Gráfico 4.3) e objetivando verificar o quanto os valores se distanciaram da média, efeito da localidade das amostras (A, B, C, D e E), com base nas expansões aos 30 dias (Tabela 4.1), realizou-se a análise da variância (ANOVA) (Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3).

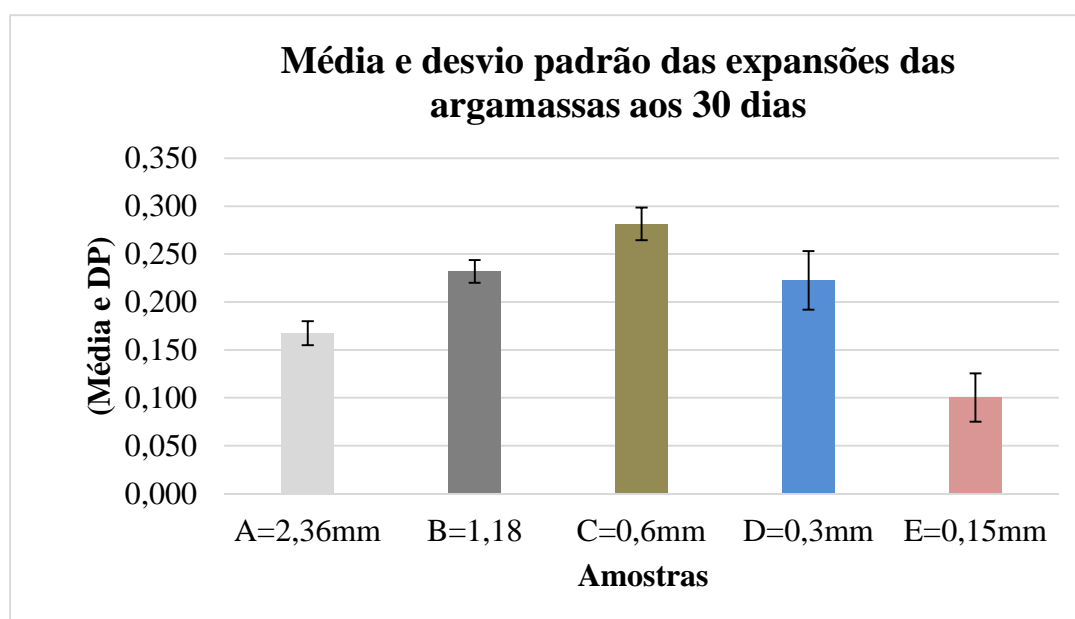


Gráfico 4.3 - Média e desvio padrão das expansões das argamassas aos 30 dias.

Tabela 4.1 – Expansões das amostras de argamassa aos 30 dias.

Nº Barra	A	B	C	D	E
1	0,155	0,212	0,272	0,176	0,088
2	0,178	0,229	0,306	0,214	0,131
3	0,157	0,227	0,300	0,259	0,131
4	0,160	0,246	0,268	0,245	0,074
5	0,186	0,238	0,278	0,237	0,078
6	0,169	0,239	0,265	0,204	0,100

Tabela 4.2 - Resumo (ANOVA: Fator único).

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
A	6	1,005	0,1675	0,00016
B	6	1,391	0,23183	0,00014
C	6	1,689	0,2815	0,0003
D	6	1,335	0,2225	0,00093
E	6	0,602	0,10033	0,00065

Tabela 4.3 - Análise de variância da influência da granulometria (A, B, C, D e E) nas expansões.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,11489	4	0,02872	66,2275	6,16816E-13	2,75871
Dentro dos grupos	0,01084	25	0,00043			
Total	0,12574	29				

Conclusão: O efeito das granulometrias é bastante significativo ( $F > F$  crítico)

A análise de variância reforça o efeito significativo da influência da granulometria na expansão.

Tabela 4.3 Percebe-se, na Tabela 4.3, que o Fator ( $F$ ) é muito maior que o Fator crítico ( $F$  crítico); com isso, pode-se afirmar que existe pelo menos uma diferença entre as amostras A, B, C, D e E. Quanto maior o valor de  $F$  significa que a hipótese da variável granulometria afeta todas as outras variáveis, Figura 4.3.

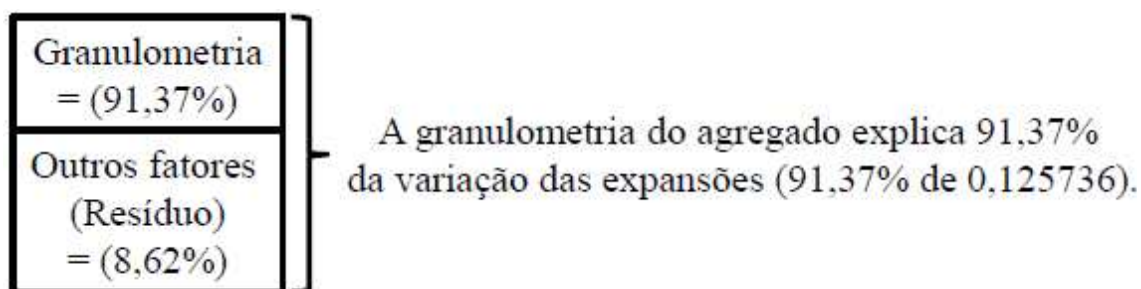


Figura 4.3 - Influência da granulometria x resíduo.

Com ANOVA é possível afirmar se existe ou não diferença entre as faixas granulométricas, mas não é possível concluir qual ou quais faixas granulométricas estão

diferindo das outras. Com isso, foi realizado Teste Tukey para saber qual ou quais granulometrias diferem.

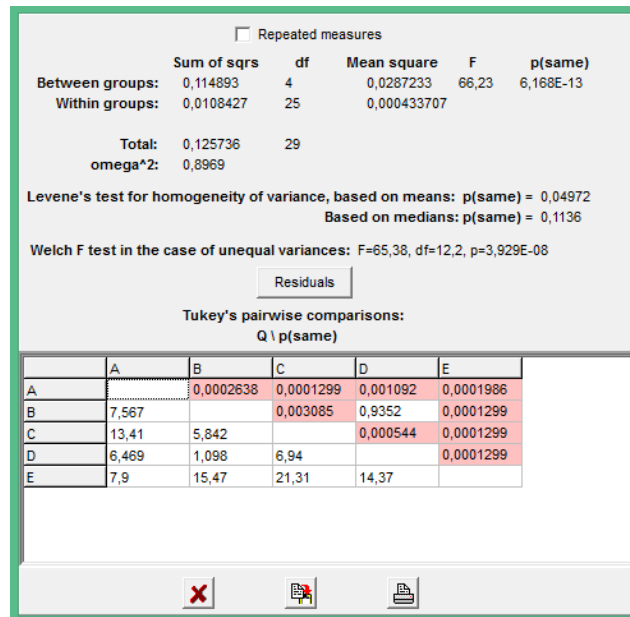


Figura 4.4 - Teste Tukey.

Analisando a Figura 4.4, nota-se que os valores que aparecem na cor mais escura são exatamente os valores que diferem entre si. Interpretando a Figura 4.5, com os resultados do Teste Tukey, e considerando a mostra E sendo o centro de todas as amostras, é possível observar que quanto mais as amostras se afastam do centro ficam mais vulneráveis à expansão. A amostra E, por possuir menor expansão, difere de todas as demais amostras, indicando ser a granulometria menos influente.

A = 2,36 mm  
B = 1,18 mm  
C = 0,6 mm  
D = 0,3 mm  
E = 0,15 mm

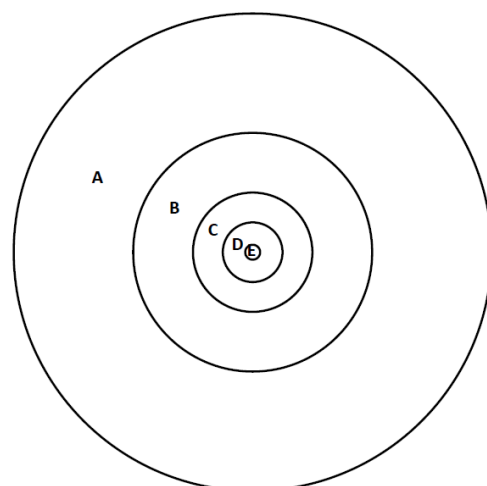


Figura 4.5 - Representação das amostras com seus respectivos tamanhos.



Tabela 4.4 - Variação das expansões das amostras.

Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina												
Idade (dias)	2	4	7	9	12	16	18	21	24	28	30	Amostra
<b>Variação dimensional média (%)</b>	0,00	0,01	0,06	0,09	0,14	0,19	0,23	0,23	0,27	0,30	0,33	Padrão
	0,00	0,01	0,05	0,08	0,09	0,12	0,13	0,15	0,16	0,16	0,17	A
	0,00	0,01	0,06	0,09	0,12	0,12	0,18	0,20	0,22	0,22	0,23	B
	0,00	0,01	0,06	0,07	0,11	0,15	0,18	0,22	0,23	0,24	0,28	C
	0,00	0,01	0,05	0,06	0,10	0,11	0,13	0,17	0,19	0,19	0,23	D
	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08	0,08	0,09	0,10	E

A Tabela 4.5 apresenta as expansões médias, aos 30 dias, e a classificação das amostras quanto ao potencial de reatividade.

Tabela 4.5 - Expansões médias aos 30 dias e classificação das amostras.

Amostras	Expansão (%) 30 dias	Classificação	
		Potencialmente inócuo	Potencialmente reativo
Padrão	0,33		X
A	0,17	X	
B	0,23		X
C	0,28		X
D	0,23		X
E	0,10	X	

No Gráfico 4.4 apresentam-se os comportamentos das expansões médias versus a granulometria, ao longo do tempo, das amostras A, B, C, D e E, das barras de argamassas.

O Gráfico 4.4 apresenta o comportamento da expansão das amostras, ao longo dos dias excluindo-se a amostra padrão. Nota-se que há semelhança entre todas as amostras ao longo do tempo no comportamento da expansão, todavia ligeiras diferenças aparecem nas idades de 12 e 16 dias, para a granulometria de 1,18 mm, o que se entende por uma possível região de transição. A granulometria 1,18mm, aos 16 dias, apresentar expansão (0,12%) igual aos 12 dia.

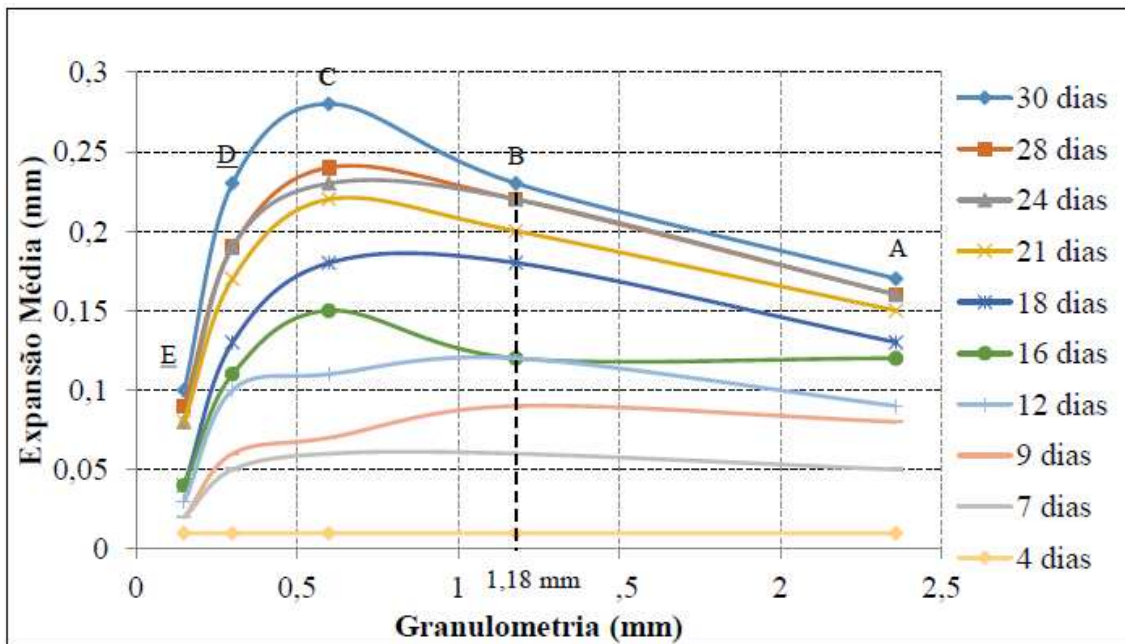


Gráfico 4.4 - Curva comportamento da expansão x granulometria.

No Gráfico 4.5 é observada a curva de comportamento, aos 12 dias, em relação à amostra padrão, onde a granulometria 1,18 obteve a maior expansão.

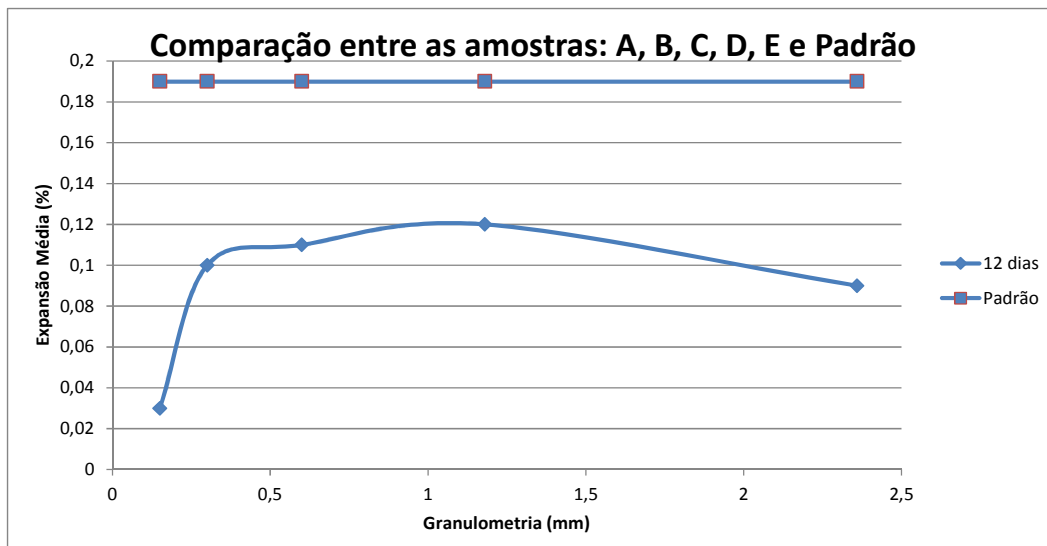


Gráfico 4.5 - Curva comportamento aos 12 dias das amostras em relação a padrão.

No Gráfico 4.6 é notável que as amostra de granulometrias 0,6mm e 1,18mm obtiveram maiores expansões em relação as demais amostras, comparadas aos 12 dias.

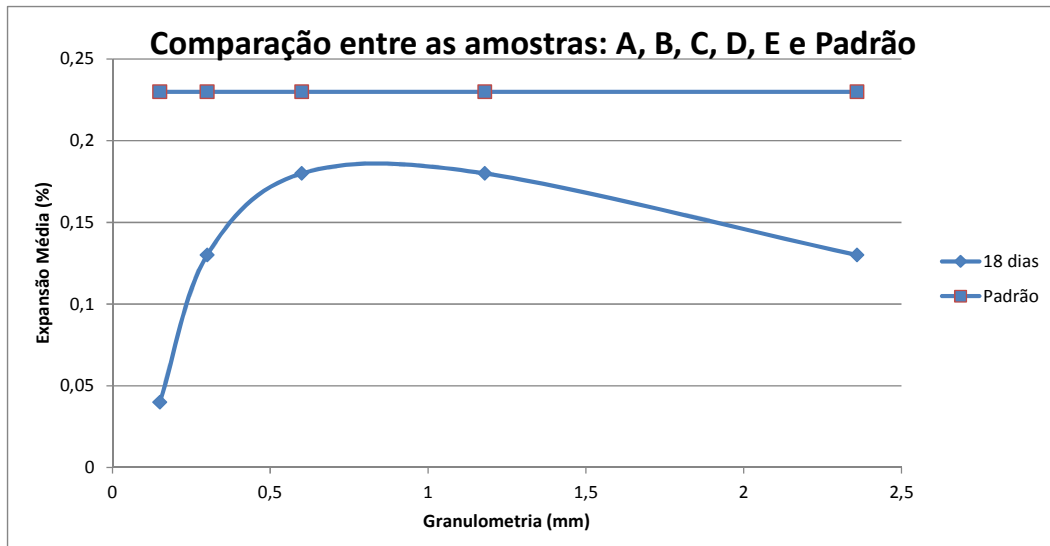


Gráfico 4.6 - Curva do comportamento aos 18 dias das amostras em relação a padrão.

No Gráfico 4.7 é notável que as amostras de granulometrias 0,6mm e 1,18mm obtiveram maiores expansões em relação às demais amostras, comparadas aos 18 dias.

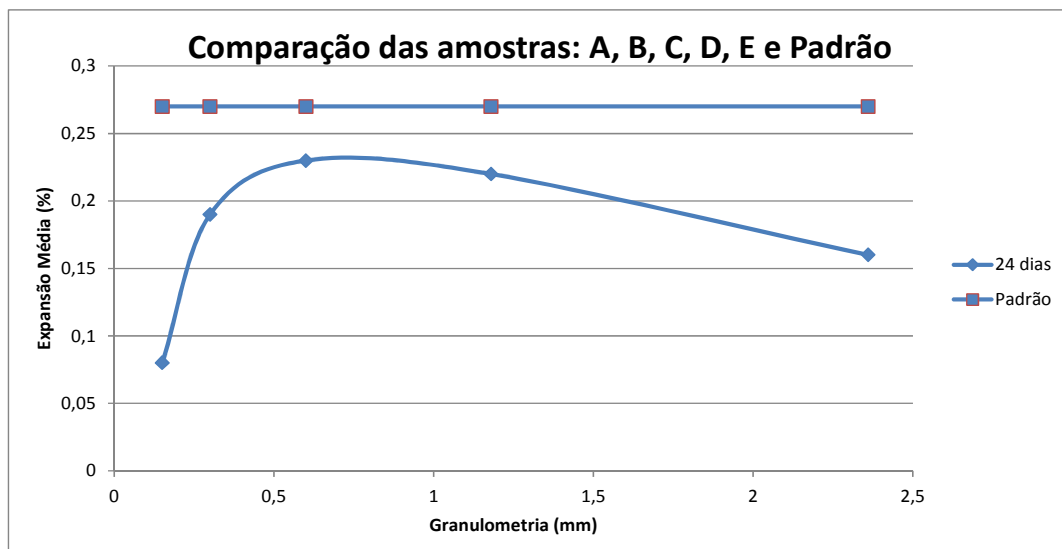


Gráfico 4.7 - Curva comportamento aos 24 dias das amostras em relação a padrão.

Já a amostra de granulometria 0,6mm obteve a maior expansão, em relação as demais amostras, s aos 24 dias (Gráfico 4.8).

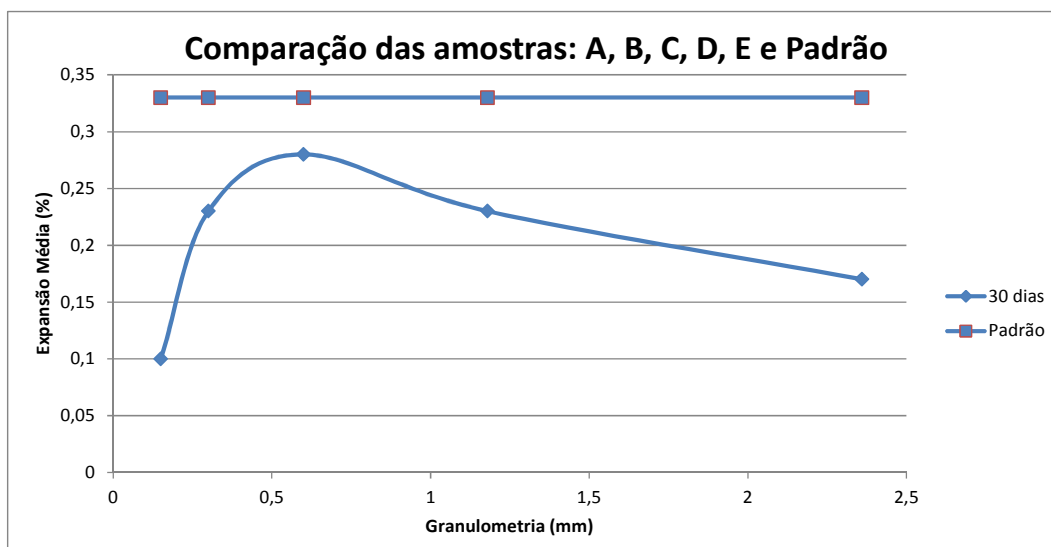


Gráfico 4.8 - Curva comportamento aos 30 dias das amostras em relação a padrão.

A comparação entre os resultados obtidos e a amostra padrão foi realizada a partir da normalização percentual, onde a soma das composições das amostras preparadas resulta em 100%, bem como a soma de todas as composições da amostra padrão também resulta em 100%.

O Gráfico 4.9 apresenta um teor ótimo de percentual de composição de cada faixa granulométrica para conferir a expansão, sendo constatada tendência de diminuição da expansão em granulometrias abaixo de 0,3mm.

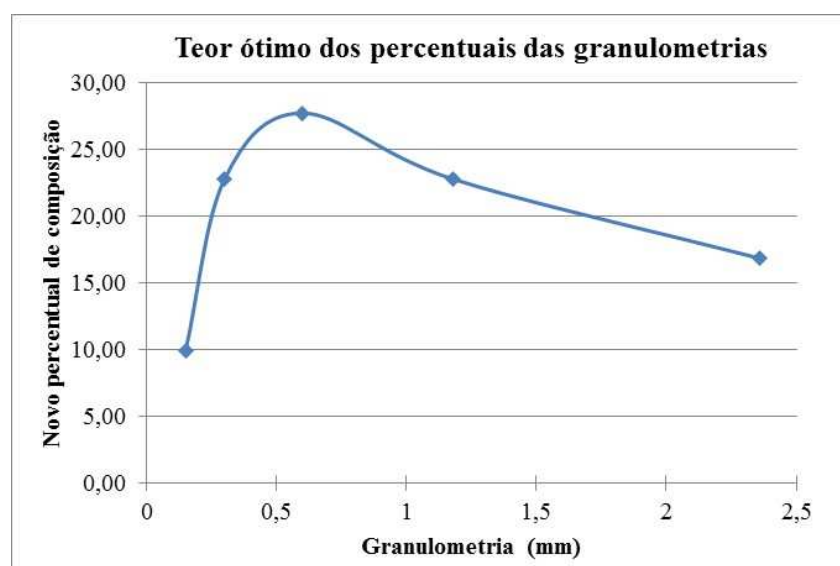


Gráfico 4.9 - Teor ótimo da granulometria para verificação da expansão causada pela RAA.

O resultado distribuído por cada granulometria é apresentado no Gráfico 4.10. Nesta comparação é possível afirmar que cada faixa granulométrica influencia de forma diferente na expansão da amostra padrão, sendo que todas as faixas granulométricas apresentaram valores divergentes da norma. Nota-se que na granulometria de 2,36 mm há uma diferença superior a 5%, sendo a maior entre as comparações, o que indica a maior influência desta composição na expansão da amostra padrão. Nota-se também que a granulometria de 0,15 mm apresenta valor discrepante da norma, porém, diferente da granulometria de 2,36 mm, ou seja, o valor encontrado foi aproximadamente 5 % menor do que sugerido pela norma.

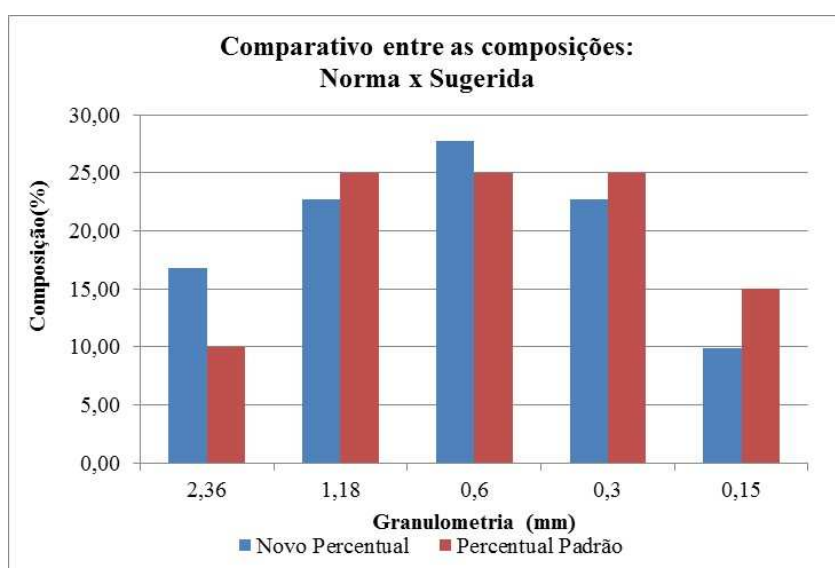


Gráfico 4.10 - Percentual sugerido x Percentual da amostra padrão.

### 4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Foram observadas ao MEV as amostras de barras de argamassas. As análises foram realizadas em fragmentos das barras em seu estado natural e não em lâminas delgadas com seção polida.

A seguir as imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Neste estudo, o MEV foi empregado satisfatoriamente, onde é possível atestar os resultados das expansões das barras de argamassa de todas as amostras contidos no Gráfico 4.1. Pode-se observa a amostra padrão, a B, a C e a D que foram classificadas como potencialmente reativas, nas figuras 4.6 (amostra padrão), 4.8 (amostra B), 4.9 (

amostra C) e 4.10 (amostra D) com quantidades significativas de produtos cristalizados da RAA.

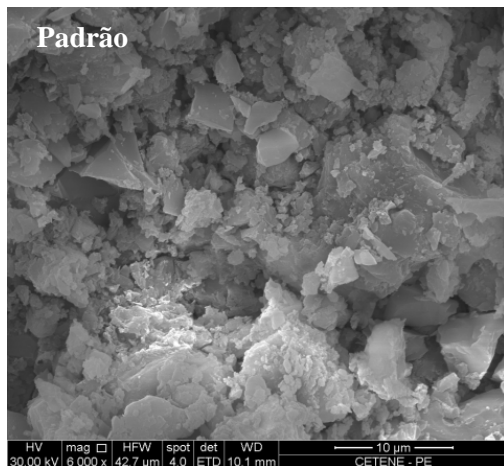


Figura 4.6 – Micrografia apresentando quantidades significativas de produtos cristalizados da RAA depositados em um poro.

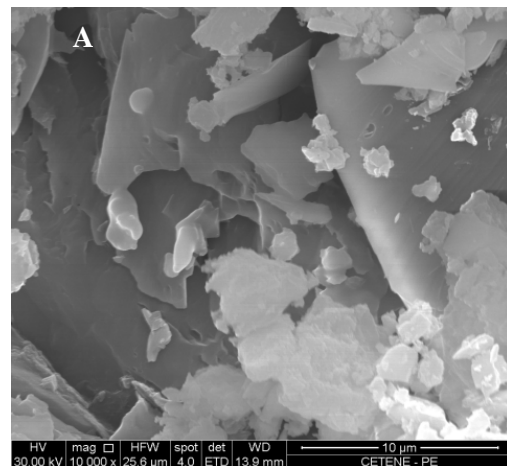


Figura 4.7 – Micrografia do gel maciço gretado.

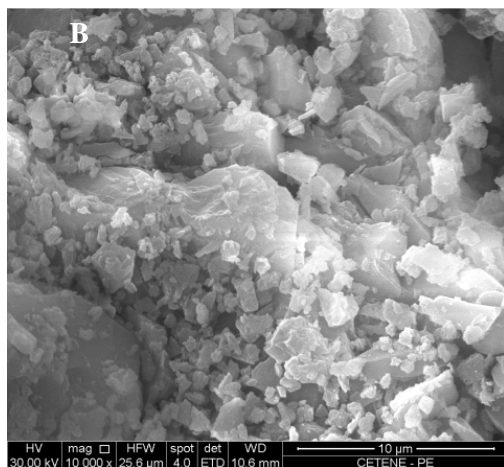


Figura 4.8 – Micrografia apresentando quantidades significativas de produtos cristalizados da RAA depositados em um poro.

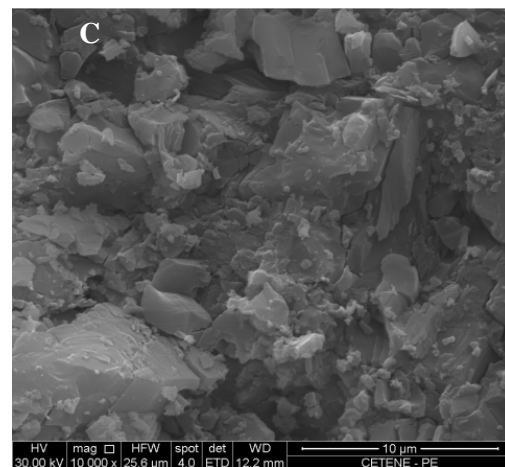


Figura 4.9 – Micrografia apresentando produtos cristalizados da RAA depositados em um poro.

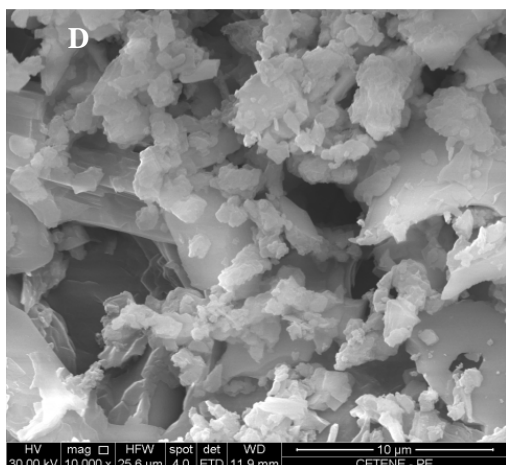


Figura 4.10 – Micrografia apresentando quantidades significativas de produtos cristalizados da RAA depositados em um poro.

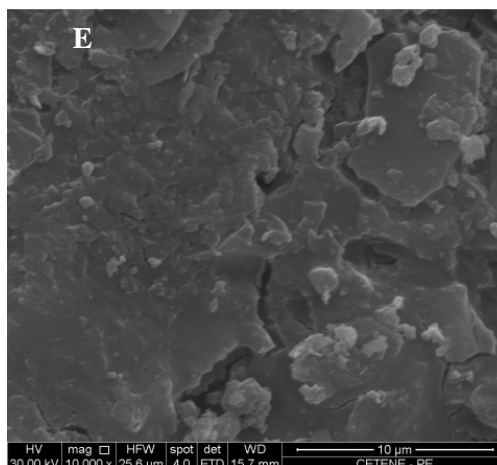


Figura 4.11 – Micrografia do gel maciço gretado.

Estas Figuras registram a porção interna de um gel, mostrando estrutura maciça predominante e certa porosidade, exceto a Figura 4.11 (amostra E) a qual obteve menor expansão conforme Gráfico 4.1, apresentando certa porosidade fechada. Esse tipo de gel também pode conter algumas fases cristalizadas representando carbonatos precipitados nos seus vazios e na sua superfície, relacionados ao sódio principalmente.

## CAPÍTULO 5

### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do resultado dos ensaios em barras de argamassa, pelo método acelerado pode-se observar que a amostra C obteve expansão de 0,28%, sendo a maior fazendo-se comparação com as demais, exceto em relação à amostra padrão, que obteve expansão de 0,33%. Nota-se que a fração granulométrica 150  $\mu\text{m}$ , amostra E, constituindo a maior área superficial específica real, teve expansão abaixo da amostra D, de área superficial específica menor.

Ressalta-se, também, a semelhança do resultado de maior expansão desta pesquisa com o valor encontrado no trabalho de Multon et al. (2010) citado no item 3, onde os experimentos com agregados reativos em argamassas resultaram expansões maiores em partículas com diâmetros de intervalos (0,63mm – 1,25mm) obtendo 0,33%. Estes dados diferem dos valores encontrados por Sekrane e Asroun (2014) os quais apresentam resultados que mostram ausência de expansão no intervalo granulométrico (0,5-1,0 mm), enquanto as partículas (1,0-2,0 mm) deram as maiores expansões (0,217%).

Portanto, dependendo da textura da rocha, o quebramento pode concentrar determinado mineral em uma fração específica. Por exemplo: grãos de mica, originalmente de pequena dimensão, podem se concentrar nas frações menores, resultando em uma expansão inferior àquela em que o quartzo reativo, originalmente maior, se concentrou.

Fica evidente que há necessidade de mais estudos para complementar o entendimento dos fatores que determinam expansões diferentes, de um mesmo agregado, em função de variação na granulometria, principalmente quando se trata de rocha triturada e não de sedimento. Os resultados sugerem que o ensaio de barra de argamassa talvez não seja realmente adequado para determinar reatividade de agregado graúdo.

Neste trabalho foi proposta uma nova ponderação para a amostra padrão.

#### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Propõem-se para pesquisas futuras um estudo aprofundado sobre o comportamento da curva expansão x granulometria no que se refere a:



- Repetir os ensaios realizando as medidas das expansões em maiores tempos (90 dias, 1ano, etc).
- Realizar o mesmo procedimento utilizando outros tipos de agregados.
- Analisar a influência de outros fatores (aglomerante, água, temperatura).

## 6 BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). ABNT NBR 15577- 1: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). ABNT NBR 15577- 2: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). ABNT NBR 15577- 3: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15577- 4: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ALMEIDA, Fernando do Couto Rosa; SALES, Almir. Efeitos da ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: RIBEIRO, Daniel Vêras. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 272.

ANDRADE, Tibério. - **“Histórico de Casos de RAA Ocorridos Recentemente em Fundações de Edifícios na Região Metropolitana do Recife”** II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto- Brasil- 2006.

ANDRIOLO, F.R.- **“Agregado Deletério - Possibilidade(s) Segura(s) de Uso”** Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto - Brasil- 2006.

ANDRIOLO, F.R.- **“Ensaio Para Avaliação da Potencialidade dos Materiais Quanto à Reação Álcali-Agregado e Ações Decorrentes”** Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto-Goiânia- Brasil- 1997.

ANDRIOLO, F.R.- **“Observação de Estruturas de Concreto: Validade Quanto a Ocorrência da Reação Álcali-Agregado”** Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto-Goiânia- Brasil- 1997.

ANDRIOLO, F.R.- **“Reação Álcali-Agregado: Observação de Âmbito Internacional”** Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto-Goiânia-Brasil- 1997.

ANDRIOLO, F.R.-**“AAR –Dams Affected in Brazil - Report on the Current Situation”** 11º International Conference-Québec-Canada-2000.

ARRAIS, Miguel Sebastião Maria Chaves. **Reação alcali agregado avaliação do comportamento de agregados graudos da região metropolitana do recife frente a diferentes tipos de cimento.** 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

ASTM C856-02: Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. West Conshohocken, 2002.

BERTOLINO, Luiz Carlos; PALERMO, Nely; BERTOLINO, Ana Valéria F. A.. Geologia. In: LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz M. de. **Manual de Agregados para a construção civil.** Rio de Janeiro: Cetem/mcti, 2012. p. 432.

BUEST NETO, Guilherme Teodoro. **ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS NATURAIS POR AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS EM CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND.** 2006. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CAPRA, B. e SELLIER, A. (2002): **Ortotropic Modelling of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Structures: Numerical Simulations.** Mechanics of Materials, Vol 35, pp. 817-830.

CAPRA, Bruno; SELLIER, Alain. Orthotropic modelling of alkali-aggregate reaction in concrete structures: numerical simulations. **MechanicsOfMaterials**. Cite Descartes, p. 817-830. mar. 2002.

CARLES-GIBERGUES, A.; HORMAIN, H. A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena. **Durabilidade do concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Ed. J.P Ollivier e A. Vichot. Ed. Tradução: O. Cascudo e H Carasek. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 615.

CARLES-GIBERGUES, Andre; CYR, Martin. Interpretation of expansion curves of concrete subjected to accelerated alkali–aggregate reaction (AAR) tests. **Cement And Concrete Research**, Recife, v. 32, n. 1, p.691-700, 2002.

COLLINS, C. L.; IDEKER, J. H.; WILLIS, G. S.; KURTIS, K. E. Examination of the effects of LiOH, LiCl and LiNO<sub>3</sub> on alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research, Elmsford**. v. 34, n. 13, p. 1403-1415, 2004.

COLLINS, C.; IDEKER, J.; WILLIS, G.; HURST, J. **Alkali-Silica Reaction: “The Cancer of Concrete**. Civil and Environmental Engineering. Georgia Institute of Technology. Disponível em: <http://www.ce.gatech.edu/~kkurtis/gwillis/learn4.htm> Acesso em: 04 setembro. 2015.

Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios / Luércio Scanduzzi, Francisco Rodrigues Andriolo. – São Paulo: Pini, 1986.

Construções de concreto: manual de práticas para controle e execução / Francisco Rodrigues Andriolo. – São Paulo: Pini, 1984.

COUTO, Tiago Andrade. **Reação Álcali Agregado - Estudo do Fenômeno em Rochas Silicas**. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. *The chemistry of alkali-aggregate reaction. Cement and Concrete Research*. v. 11, n. 3, p. 1-9, 1981.

**Developments in Alkali-Silica Gel Detection** Laura J. Powers Senior Microscopist, Construction Technology Laboratories, Inc. *Concrete Technology Today* / April 1999

**Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete** by James A. Farny and Steven H. Kosmatka\* Portland Cement Association 1997

Diamond S., Penko M., “**Alkali Silica Reaction Processes: The Conversion of Cement Alkalis to Alkali Hydroxide**” ,G. M. Idorn Inter. Symposium, Durability of Concrete ACI SP-131, 1992

Diamond, S. 1997. “**Alkali silica reactions - some paradoxes.**” *Cem.Concr. Compos.*, 19, 391–401.

DIAMOND, S.; THAULOW, N. A study of expansion due to alkali — silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. **Cement And Concrete Research**, v. 4, p.591-607, jul. 1974.

DIAMOND, Sidney. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. **Cement And Concrete Research**, v. 5, p.329-345, jul. 1975.

DU, Hongjian; TAN, Kiang Hwee. Effect of particle size on alkali–silica reaction in recycled glass mortars. **ConstructionAndBuildingMaterials**, v. 66, p.275-285, 2014.

DUNANT, Cyrille F.; SCRIVENER, Karen L. Effects of aggregate size on alkali–silica-reaction induced expansion. **Cement And Concrete Research**, v. 42, p.745-751, jun. 2012.

DUNANT, Cyrille F.; SCRIVENER, Karen L.. Effects of aggregate size on alkali–silica-reaction induced expansion. **Cement And Concrete Research**, v. 42, p.745-751, 2012.

DUNANT, Cyrille F.; SCRIVENER, Karen L.. Effects of uniaxial stress on alkali–silica reaction induced expansion of concrete. **Cement And Concrete Research, Recife**, v. 42, n. 1, p.567-576, 2012.

**Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** Ed. J.P. Olliver e A. Vichot. Ed. Tradução: O. Cascu-do e H. Carasek. São Paulo: IBRACON, 2014.

DYER, Thomas. **Durabilidade do concreto.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2015.

**EVOLUÇÃO MINERALÓGICA DE DOIS SOLOS DE REFERÊNCIA DO ESTADO DE PERNAMBUCO, BRASIL.** 2007: Revista de Biologia e Ciências da Terra, 2007.

FALCÃO BAUER, J. R., TOKADOME, S., TAKASHIMA, S. **Estudo do Uso de Agregados Reativos em Concretos Adicionando-se Materiais que Minimizem a Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto.** Anais. 42º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, 2000.

FARIAS, Márcio Muniz de; PALMEIRA, Ennio Marques. Agregados para a Construção Civil. In: ISAIA, Geraldo C..**MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência dos Materiais.** São Paulo: Ibracon, 2007. Cap. 16, p. 1712.

FERNANDES, Isabel. Composition of alkali–silica reaction products at different locations within concrete structures. **M A T E R I A L S C H A R A C T E R I Z A T I O N**, v. 60, p.655-668, 2009.

FIGUEROA, Jose do Patrocinio; ANDRADE, Tiberio. **O ataque da reação alcali-agregado sobre as estruturas de concreto.** Recife: Universitaria, 2007.

French, W.J. 1994: **Avoiding concrete aggregate problems.** In French, W.J. (Editor): **Improving Civil Engineering Structures - Old and New.** Geotechnical Publishing Ltd. 65-95.

FURNAS. *Equipe de Laboratório de Concreto. Concreto massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaios e propriedades*. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade, 1997.

GILLOTT, Je. Alkali-aggregate reactions in concrete. **Engineering Geology**, v. 9, p.303-326, dez. 1975.

Grattan-Bellew, P. E. (1992). "Chemistry of the alkali-aggregate reaction- Canadian experience, in: the alkali aggregate reaction in concrete." Ed.R.N Swamy,Blackie, **Van nostrand Reinhold**,: pp30-53.

HABA, Mohsen Ben. Mechanical effects of alkali silica reaction in concrete studied by sem-image analysis. 2006. 232 f. Tese (Doutorado) - École Polytechnique FÉDÉrale de Lausanne, 2006.

HANSEN, W.C.- "**Studies Relating to the Mechanism by Which the AlkaliAggregate Reaction Produces Expansion in Concrete**" - Journal of the American Concrete Institute-Detroit- Michigan- USA- 1944.

HASPARIK, Nicole Pagan. **Investigação dos mecanismo da reação álcali-agregado-Efeito da cinza da casca de arroz e da sílica ativa**. 1999. 281 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

HASPARYK, Nicole Pagan. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Hobbs, W. D. **Alkali-silica reaction in concrete**, Thomas Telford, London, 1988.

**Inspeção e controle de qualidade do concreto** / Francisco Rodrigues Andriolo e Bento Carlos Sgarboza. – São Paulo: NEWSWORK, 1993.

Islam, M.S.; Ghafoori, N. **Evaluation of alkali-silica reactivity using aggregate geology, mortar bars, concrete prisms and ASR kinetic model.** J. Mater. Sci. Res. 2013, 2(2), 103-117.

Islam, M.S.; Ghafoori, N. **Evaluation of alkali-silica reactivity using ASR kinetic Model,** J. Construct.Building Mater. 2013, 45, 270-274.

JENSEN, A.d. et al. Studies of alkali-silica reaction — part II effect of air-entrainment on expansion. **Cement And Concrete Research**, v. 14, p.311-314, maio 1984.

KUO, Wen-ten; SHU, Chun-ya. Effect of particle size and curing temperature on expansion reaction in electric arc furnace oxidizing slag aggregate concrete. **Construction And Building Materials**, v. 94, p.488-493, set. 2015.

LEEMANN, Andreas; LOTHENBACH, Barbara; THALMANN, Cédric. Influence of superplasticizers on pore solution composition and on expansion of concrete due to alkali-silica reaction. **Construction And Building Materials**, v. 25, p.344-350, jan. 2011.

LINDGÅRD, Jan et al. Alkali–silica reaction (ASR)—performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on concrete porosity, moisture state and transport properties. **Cement And Concrete Research**. Kidlington, p. 145-167. 2013.

LINDGÅRD, Jan et al. Alkali–silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. **Cement And Concrete Research**, v. 42, p.223-243, jan. 2012.

*Load test analyze and strengthening methodology in pile cap building affected by AAR.*

LOPES, Anne Neiry de Mendonça et al. **INVESTIGAÇÃO DA RAA EM TESTE-MUNHOS DE CONCRETO PROCEDENTES DAS UHE's PAULO AFONSO I, II, III E IV.** 2001. Disponível em: <[http://www.cbdb.org.br/documentos/site/12 - Trabalho 4\\_Investigação da RAA.pdf](http://www.cbdb.org.br/documentos/site/12 - Trabalho 4_Investigação da RAA.pdf)>. Acesso em: 21 ago. 2014.



LU, Duyou et al. Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete. **CementAnd Concrete Research**, v. 36, p.1157-1165, 2006.

LU, Duyou; FOURNIER, B.; GRATTAN-BELLEW. Evaluation of accelerated test methods for determining alkali-silica reactivity of concrete aggregates. **Cement& Concrete Composites**, v. 28, p.546-554, 2006.

LUCENA, Mario SÉrgio Pereira de; GALGOUL, Nelson Szilard. **SUBSTITUIÇÃO EM SERVIÇOS DA FUNDAÇÃO DE UMA TORRE AVARIADA POR REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**. In: CUNHA, Albino Joaquim Pimenta da; LIMA, Nelson

LUKŠCHOVÁ, Šárka; PRIKRYL, Richard; PERTOLD, Zdenek. Petrographic identification of alkali-silica reactive aggregates in concrete from 20th century bridges. **Construction And Building Materials**, v. 23, p.734-741, 2009.

LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. Normas Técnicas e Caracterização Tecnológico dos Agregados. In: LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIRA, Salvador Luiz M. de. **Manual de Agregados para a construção civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. p. 432.

Materiais de construção / Paulo Henrique Laporte Ambrozewiz, -- São Paulo: PINI, 2012.

**Materiais de construção: Patologia, reabilitação, prevenção** / Luca Bertolini; tradução Leda Maria Marques Dias Beck -- São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MEASHAM, Frederick. **LEA'S CHEMISTRY OF CEMENT AND CONCRETE**.4. ed. Washington: Elsevier, 2007. 1057 p.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014.

MULTON, S. et al. Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. **Cement And Concrete Research**, v. 38, p.350-359, mar. 2008.

MULTON, Stéphane; TOUTLEMONDE, François. Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p.912-920, 2006.

MULTON, Stéphen et al. Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. **CementAnd Concrete Research**, v. 40, p.508-516, 2010.

NEVILLE, A.m.; BROOKS, J.j. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

P. BREDSDORFF; G, M.IDORN; A. KJAER; NIELS M. P.; E. POULSEN- “**Chemical Reactions Involving Aggregate**” - IV International Symposium –Chemistry of CementWashington-1960.

**Patologia e terapia do concreto armado** / Manuel Fernández Cánovas; coordenação técnica L.A Falcão Bauer; ‘tradução de M. Celeste Marcondes, Carlos Wagner Fernandes dos Santos, Beatriz Cannabrava’. – São Paulo; Pini, 1988.

PECCHIO, Marcelo et al. **Produtos da Reação Álcali-Silicato em Concretos de Edificações da Região do Grande Recife – PE**. II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto - Brasil- 2006.

Poole, A. B. (1992). "**Introduction to alkali aggregate reaction in concrete, in the alkali-silica reaction in concrete.**" Ed. R. N. Swamy, Blackie Van Nostrand Reinhold. Portland Cement Association, 5420 Old Orchard Road, Skokie, IL 60077-1083 [www.cement.org](http://www.cement.org) 847.966.6200.

POWERS T.C.; STEINOUR H.H. - “**An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction- Part 2- A Hypothesis Concerning Safe and Unsafe Reactions with Reactive Silica in Concrete**” - Journal of the American Concrete Institute- Detroit- Michigan- USA -1955.

POYET, S. et al. **An homogenization theory to study the aggregate size range effect on ASR swelling**: numerical implementation and experimental fitting, proceedings of the 6 CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, pp. 369-388, 2003.

POYTE, Stéphane et al. **MODELLING OF ALKALI-SILICA REACTION IN CONCRETE, PARTE I: INFLUENCE OF AGGREGATE SIZE RANGE ON CHEMICAL MODELING OF ASR**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12, 2004. **Anais**. Beijing, 2004.

**RAA 2006 – II Simpósio sobre Reação Álcali-Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto 1. Análise de prova de carga e metodologia de reforço em bloco de fundação de edifício afetado por RAA.**

RAMACHANDRAN, VangipuramSeshachar. **Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology**. 2. ed. New Jersey: Noyes Publications, 1995. 1153 p.

RAMYAR, K.. **Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction**. Cement And Concrete Research, v. 35, p.2165-2169, 2005.

RIBEIRO, Daniel Vêras; CUNHA, Manuel Paulo Teixeira. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: RIBEIRO, Daniel Vêras. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 272.

SANCHEZ, L.; KUPERMAN, S. C.; HELENE, P.. **Using the accelerated Brazilian concrete prism test (ABCPT) to evaluate alkali aggregate reaction (AAR)**. Ibracon Structures And Materials Journal, Recife, v. 4, n. 4, p.575-581, out. 2011.

SANCHEZ, Leandro Francisco Moretti. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações alcali-agregado em concretos**. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SBRIGHI NETO, Claudio. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: ISAIA, Geraldo C. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1946.

SEKRANE, NawalZahira; ASROUN, Aissa. Modelling The Effects of Aggregate Size on Alkali Aggregate Reaction Expansion. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 4, n. 3, p.656-661, 2014.

STANTON, T. E. **Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate**. Proceeding of American Society of Civil Engineers, Dec. 1940, P. 1781-1811. Swamy, R. N. Eds., The alkali-silica reaction in concrete, Blackie and Son Ltd., Glasgow, London, 1992.

TENÓRIO, Jonathas Judá Lima. **AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO VISANDO APLICAÇÕES ESTRUTURAIS** Dissertação. 2007. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

TORRES, Ary F. **Dosagem dos concretos**. 3. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Technologicas de S. Paulo, 1936.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado - mapeamento de agregados reativo do Estado de São Paulo**. Campinas, 2002. 213p. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Campinas.

VERÇOZA, Enio José. **Materiais de Construção I**. 3. ed. Porto Alegre: Sagra, 1987.

VIVIAN, H. E. – “**Studies in Cement-Aggregate Reaction: The effect on mortar expansion of the particle size the reactive component in the aggregate**”, Australia Journal of Applied Sci. 1951, vol. 2, n° 108, pág. 488.

WIGUM, B. J. et al. **Accelerated Test for Assessing the Potential Exhibited by Concrete Aggregates for Alkali-aggregate Reaction**. *Cement And Concrete Composites*, v. 19, p.451-476, 1997.

Wigum, B.J., 1995: **Alkali-Aggregate Reactions in Concrete. Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks**. NTH - University of Trondheim, Dr.Ing. Thesis.

WIGURN, B. J. et al. Accelerated Tests for Assessing the Potential Exhibited by Concrete Aggregates for Alkali-aggregate Reaction. **CementAnd Concrete Composite**, v. 19, p.451-476, 1997.

ZHANGA, Chengzhi et al. Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion. **CementAnd Concrete Research**, v. 29, p.1393-1396, 1999.

**APÊNDICE A – Ficha técnica do cimento.**

Janeiro



Certificado da Qualidade - Satisfação do Cliente

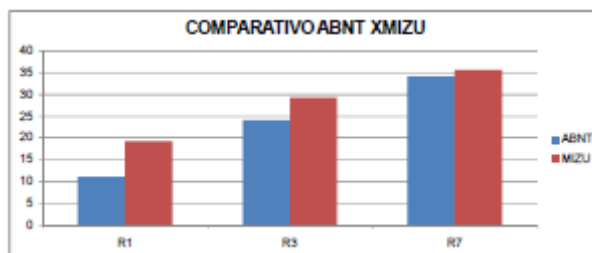
ENSAIOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO CIMENTO CP V ARI R\$ (ABNT NBR 5733 E ABNT NBR 5737)

Janeiro-15

Dia	Composição Química				Resistência a Compressão				Finura				Expansibilidade	Pega		Consist.
	P. Fogo (%)	RI (%)	SO3 (%)	CaO Livre (%)	01 Dia MPa	03 Dias MPa	07 Dias MPa	28 Dias MPa	Massa Espec. (g/cm3)	Blaine (cm2/g)	# 325 (%)	# 200 (%)	Quente (mm)	Início (min)	Fim (min)	Normal (%)
1																
2	3,21	0,98	3,34	2,88	19,32	29,35	38,28	45,51	3,12	4,200	1,90	0,10	0,83	140	195	30,00
3																
4																
5																
6	4,03	1,18	3,47	2,82	19,98	29,94	34,88	44,23	3,12	4,080	1,80	0,08	1,00	135	165	30,00
7	2,92	0,91	3,48	3,00	19,98	29,88	35,21	44,89	3,12	4,200	1,70	0,10	0,83	135	200	30,00
8	3,78	1,13	3,28	2,84	19,12	29,28	35,69	45,59	3,12	4,480	1,50	0,05	1,00	130	190	30,00
9	3,48	1,17	3,50	3,30	19,43	29,80	38,40	45,42	3,17	4,390	2,00	0,10	1,33	135	195	29,80
10																
11																
12	1,31	0,34	3,23	3,18	19,50	29,65	38,38	45,28	3,17	3,870	2,00	0,10	0,87	135	200	30,00
13	2,67	0,70	3,51	3,82	19,98	30,28	38,12	48,25	3,17	4,220	1,70	0,10	3,33	135	200	29,20
14	3,77	1,09	3,37	3,30	19,58	29,38	37,08	47,83	3,17	4,280	2,20	0,15	1,33	140	200	29,40
15	4,28	1,31	3,59	3,58	19,83	29,75	35,20	44,22	3,17	4,480	2,50	0,15	2,00	140	200	29,20
16	4,70	0,83	3,45	3,00	18,20	28,41	34,48	44,31	3,17	3,880	2,40	0,15	1,33	145	200	29,20
17																
18	3,75	0,89	3,38	2,42	18,58	27,81	34,20	44,35	3,11	4,290	1,60	0,10	0,59	135	200	29,80
20	3,91	1,17	3,48	3,78	19,73	28,58	34,30	44,17	3,11	4,380	2,00	0,10	1,33	140	200	29,80
21	3,52	0,91	3,34	2,58	19,58	29,98	38,23	44,21	3,11	4,230	1,50	0,05	0,50	140	200	29,80
22	3,83	0,93	3,34	2,18	19,45	29,73	35,73	44,15	3,11	4,180	1,70	0,10	0,33	140	200	29,80
23	4,03	1,46	3,48	3,48	19,13	29,58	38,84	44,27	3,14	4,230	2,30	0,10	1,00	135	195	29,80
24																
25																
26	3,87	1,11	3,45	3,00	19,58	29,03	35,31	44,19	3,14	4,510	1,90	0,10	1,33	135	185	29,80
27	3,50	1,07	3,28	2,84	18,53	28,14	34,89	44,37	3,14	4,320	2,30	0,10	0,50	130	190	29,80
28	3,38	0,89	3,38	2,34	19,45	29,18	34,25	44,32	3,14	4,190	2,20	0,10	0,50	130	190	29,80
29	3,97	0,93	3,34	2,88	18,05	29,18	38,21	44,70	3,14	4,050	2,00	0,10	1,00	135	190	29,80
30	3,34	1,03	3,33	2,93	18,02	28,25	35,48	44,82	3,14	4,180	2,00	0,10	1,00	135	185	29,80
31																

Controle Estatístico

	R1	R3	R7	R28												
MÉDIA	3,55	0,99	3,40	2,98	19,23	29,23	35,95	44,90	3,14	4,229	1,97	0,10	1,09	138	197	29,83
DESVIO	0,70	0,25	0,09	0,44	0,80	0,70	0,89	0,98	0,02	194,18	0,29	0,03	0,88	3,93	4,01	0,28
ABNT	≤ 4,5	≤ 1,0	≤ 3,5	≤ 3,5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0			≥ 3.000		≤ 8,0	≤ 5	≥ 60		



*Sidney Clay Santos*  
 Responsável Técnico  
 Eng. Quím. Sidney Clay Santos  
 CRC: 0830056  
 CPF: 091137

**APÊNDICE B – Tabelas contendo a evolução das expansões médias percentuais das barras de argamassa.**



## Leituras das expansões das barras da amostra padrão

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	250,0	249,9	250,0
<i>Leitura Orientativa</i>	13/01/2015	-0,005	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>-0,424</b>	<b>-0,301</b>	<b>-0,136</b>
$I_0$	14/01/2015	0,002	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>-0,309</b>	<b>-0,173</b>	<b>-0,011</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>-0,311</b>	<b>-0,175</b>	<b>-0,013</b>
4	16/01/2015	-0,002	LEITURA (mm)	-0,289	-0,162	0,002
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,287	-0,160	0,004
			VARIAÇÃO (%)	0,010	0,006	0,007
7	19/01/2015	-0,002	LEITURA (mm)	-0,172	-0,008	0,156
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,170	-0,006	0,158
			VARIAÇÃO (%)	0,056	0,068	0,068
9	21/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	-0,093	0,079	0,196
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,093	0,079	0,196
			VARIAÇÃO (%)	0,087	0,102	0,084
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,080	0,190	0,251
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,080	0,190	0,251
			VARIAÇÃO (%)	0,156	0,146	0,106
16 DIAS	28/01/2015	0,004	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,128</b>	<b>0,350</b>	<b>0,451</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>0,124</b>	<b>0,346</b>	<b>0,447</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,174</b>	<b>0,208</b>	<b>0,184</b>
18	30/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,211	0,445	0,534
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,211	0,445	0,534
			VARIAÇÃO (%)	0,209	0,248	0,219
21	02/02/2015	-0,005	LEITURA (mm)	0,280	0,335	0,601
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,285	0,340	0,606
			VARIAÇÃO (%)	0,238	0,206	0,248
24	05/02/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,315	0,545	0,671
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,315	0,545	0,671
			VARIAÇÃO (%)	0,250	0,288	0,274
28	09/02/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,396	0,628	0,737
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,396	0,628	0,737
			VARIAÇÃO (%)	0,283	0,321	0,300
30 DIAS	11/02/2015	-0,002	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,483</b>	<b>0,697</b>	<b>0,826</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>0,485</b>	<b>0,699</b>	<b>0,828</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,318</b>	<b>0,350</b>	<b>0,336</b>

## Variação dimensional por idade em dias da amostra padrão

VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS BARRAS DE ARGAMASSA EM SOLUÇÃO ALCALINA											
Idade (dias)	2	4	7	9	12	16	18	21	24	28	30
Variação dimensional média (%)	0,00	0,01	0,06	0,09	0,14	0,19	0,23	0,23	0,27	0,30	0,33

## Leituras das expansões das barras da amostra A

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	250,2	250,2	249,3
<i>Leitura Orientativa</i>	13/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	-0,122	-0,115	-0,123
$l_0$	14/01/2015	0,002	LEITURA (mm)	0,019	0,025	0,013
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,017	0,023	0,011
4	16/01/2015	-0,002	LEITURA (mm)	0,031	0,055	0,026
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,033	0,057	0,028
			VARIAÇÃO (%)	0,006	0,014	0,007
7	19/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,161	0,163	0,140
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,161	0,163	0,140
			VARIAÇÃO (%)	0,058	0,056	0,052
9	21/01/2015	0,004	LEITURA (mm)	0,219	0,238	0,205
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,215	0,234	0,201
			VARIAÇÃO (%)	0,079	0,084	0,076
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,257	0,284	0,263
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,257	0,284	0,263
			VARIAÇÃO (%)	0,096	0,104	0,101
16 DIAS	28/01/2015	0,004	LEITURA (mm)	0,318	0,362	0,323
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,314	0,358	0,319
			VARIAÇÃO (%)	0,119	0,134	0,124
18	30/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,350	0,395	0,346
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,350	0,395	0,346
			VARIAÇÃO (%)	0,133	0,149	0,134
21	02/02/2015	-0,005	LEITURA (mm)	0,368	0,411	0,350
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,373	0,416	0,355
			VARIAÇÃO (%)	0,142	0,157	0,138
24	05/02/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,385	0,437	0,375
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,385	0,437	0,375
			VARIAÇÃO (%)	0,147	0,165	0,146
28	09/02/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,389	0,449	0,385
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,389	0,449	0,385
			VARIAÇÃO (%)	0,149	0,170	0,150
30 DIAS	11/02/2015	-0,001	LEITURA (mm)	0,404	0,467	0,401
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,405	0,468	0,402
			VARIAÇÃO (%)	0,155	0,178	0,157

## Leituras das expansões das barras da amostra A

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	249,4	250,0	250,3
<i>Leitura Orientativa</i>	13/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	-0,287	0,358	-0,108
$I_0$	14/01/2015	0,002	LEITURA (mm)	-0,175	0,424	-0,020
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,177	0,422	-0,022
4	16/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	-0,158	0,447	-0,013
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,153	0,452	-0,008
			VARIAÇÃO (%)	0,010	0,012	0,006
7	19/01/2015	0,002	LEITURA (mm)	-0,044	0,567	0,103
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,046	0,565	0,101
			VARIAÇÃO (%)	0,053	0,057	0,049
9	21/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,005	0,637	0,173
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,005	0,637	0,173
			VARIAÇÃO (%)	0,073	0,086	0,078
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,048	0,701	0,157
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,048	0,701	0,157
			VARIAÇÃO (%)	0,090	0,112	0,072
16 DIAS	28/01/2015	0,004	LEITURA (mm)	0,128	0,748	0,274
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,124	0,744	0,270
			VARIAÇÃO (%)	0,121	0,129	0,117
18	30/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,146	0,751	0,308
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,146	0,751	0,308
			VARIAÇÃO (%)	0,130	0,132	0,132
21	02/02/2015	-0,005	LEITURA (mm)	0,172	0,801	0,330
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,177	0,806	0,335
			VARIAÇÃO (%)	0,142	0,154	0,143
24	05/02/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,192	0,854	0,351
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,192	0,854	0,351
			VARIAÇÃO (%)	0,148	0,173	0,149
28	09/02/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,206	0,868	0,360
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,206	0,868	0,360
			VARIAÇÃO (%)	0,154	0,178	0,153
30 DIAS	11/02/2015	-0,002	LEITURA (mm)	0,220	0,886	0,400
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,222	0,888	0,402
			VARIAÇÃO (%)	0,160	0,186	0,169

## Variação dimensional por idade em dias da amostra A

VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS BARRAS DE ARGAMASSA EM SOLUÇÃO ALCALINA											
Idade (dias)	2	4	7	9	12	16	18	21	24	28	30
Variação dimensional média (%)	0,00	0,01	0,05	0,09	0,09	0,12	0,13	0,15	0,16	0,16	0,17

## Leituras das expansões das barras da amostra B

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	252,4	251,8	252,1
<i>Leitura Orientativa</i>	<b>13/01/2015</b>	<b>-0,005</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,044</b>	<b>0,531</b>	<b>0,734</b>
$l_0$	<b>14/01/2015</b>	<b>0,002</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,192</b>	<b>0,639</b>	<b>0,856</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>1,190</b>	<b>0,637</b>	<b>0,854</b>
4	16/01/2015	-0,002	LEITURA (mm)	1,219	0,665	0,850
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,221	0,667	0,852
			VARIAÇÃO (%)	0,012	0,012	-0,001
7	19/01/2015	0,002	LEITURA (mm)	1,331	0,783	0,980
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,329	0,781	0,978
			VARIAÇÃO (%)	0,055	0,057	0,049
9	21/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	1,396	0,851	1,074
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,396	0,851	1,074
			VARIAÇÃO (%)	0,082	0,085	0,087
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	1,435	0,962	1,145
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,435	0,962	1,145
			VARIAÇÃO (%)	0,097	0,129	0,115
<b>16 DIAS</b>	<b>28/01/2015</b>	<b>0,004</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,550</b>	<b>1,025</b>	<b>1,237</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>1,546</b>	<b>1,021</b>	<b>1,233</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,141</b>	<b>0,152</b>	<b>0,150</b>
18	30/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	1,599	1,071	1,283
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,599	1,071	1,283
			VARIAÇÃO (%)	0,162	0,172	0,170
21	02/02/2015	-0,005	LEITURA (mm)	1,630	1,110	1,322
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,635	1,115	1,327
			VARIAÇÃO (%)	0,176	0,190	0,188
24	<b>05/02/2015</b>	0,000	LEITURA (mm)	1,671	1,146	1,363
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,671	1,146	1,363
			VARIAÇÃO (%)	0,191	0,202	0,202
28	09/02/2015	0,000	LEITURA (mm)	1,695	1,184	1,400
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,695	1,184	1,400
			VARIAÇÃO (%)	0,200	0,217	0,217
<b>30 DIAS</b>	<b>11/02/2015</b>	<b>0,007</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,733</b>	<b>1,220</b>	<b>1,433</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>1,726</b>	<b>1,213</b>	<b>1,426</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,212</b>	<b>0,229</b>	<b>0,227</b>

## Leituras das expansões das barras da amostra B

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	252,7	252,3	251,4
<i>Leitura Orientativa</i>	<b>13/01/2015</b>	<b>-0,005</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,436</b>	<b>1,866</b>	<b>-0,341</b>
$l_0$	<b>14/01/2015</b>	<b>0,002</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,552</b>	<b>1,081</b>	<b>-0,278</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>1,550</b>	<b>1,079</b>	<b>-0,280</b>
4	16/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	1,589	1,095	-0,250
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,594	1,100	-0,245
			VARIAÇÃO (%)	0,017	0,008	0,014
7	19/01/2015	0,002	LEITURA (mm)	1,709	1,228	-0,127
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,707	1,226	-0,129
			VARIAÇÃO (%)	0,062	0,058	0,060
9	21/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	1,782	1,304	-0,056
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,782	1,304	-0,056
			VARIAÇÃO (%)	0,092	0,089	0,089
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	1,811	1,401	0,044
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,811	1,401	0,044
			VARIAÇÃO (%)	0,103	0,128	0,129
<b>16 DIAS</b>	<b>28/01/2015</b>	<b>0,004</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,970</b>	<b>1,485</b>	<b>0,128</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>1,966</b>	<b>1,481</b>	<b>0,124</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,165</b>	<b>0,159</b>	<b>0,161</b>
18	30/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	2,019	1,533	0,128
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,019	1,533	0,128
			VARIAÇÃO (%)	0,186	0,180	0,162
21	02/02/2015	-0,005	LEITURA (mm)	2,067	1,581	0,222
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,072	1,586	0,227
			VARIAÇÃO (%)	0,207	0,201	0,202
24	<b>05/02/2015</b>	0,000	LEITURA (mm)	2,106	1,620	0,253
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,106	1,620	0,253
			VARIAÇÃO (%)	0,220	0,214	0,212
28	09/02/2015	0,000	LEITURA (mm)	2,144	1,657	0,298
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,144	1,657	0,298
			VARIAÇÃO (%)	0,235	0,229	0,230
<b>30 DIAS</b>	<b>11/02/2015</b>	<b>0,006</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>2,177</b>	<b>1,685</b>	<b>0,326</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>2,171</b>	<b>1,679</b>	<b>0,320</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,246</b>	<b>0,238</b>	<b>0,239</b>

## Variação dimensional por idade em dias da amostra B

VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS BARRAS DE ARGAMASSA EM SOLUÇÃO ALCALINA											
Idade (dias)	2	4	7	9	12	16	18	21	24	28	30
Variação dimensional média (%)	<b>0,00</b>	0,01	0,06	0,09	0,12	0,12	0,18	0,2	0,22	0,22	0,23

## Leituras das expansões das barras da amostra C

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	251,9	251,9	252,4
<i>Leitura Orientativa</i>	<b>13/01/2015</b>	<b>0,000</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,726</b>	<b>0,388</b>	<b>0,846</b>
$l_0$	<b>14/01/2015</b>	<b>-0,002</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,802</b>	<b>0,523</b>	<b>1,005</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>0,804</b>	<b>0,525</b>	<b>1,007</b>
4	16/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,788	0,542	1,022
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,788	0,542	1,022
			VARIAÇÃO (%)	-0,006	0,007	0,006
7	19/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	0,895	0,656	1,132
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,900	0,661	1,137
			VARIAÇÃO (%)	0,038	0,054	0,052
9	21/01/2015	-0,001	LEITURA (mm)	0,930	0,680	1,140
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,931	0,681	1,141
			VARIAÇÃO (%)	0,050	0,062	0,053
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	1,003	0,846	1,233
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,003	0,846	1,233
			VARIAÇÃO (%)	0,079	0,127	0,090
<b>16 DIAS</b>	<b>28/01/2015</b>	<b>0,003</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,135</b>	<b>0,921</b>	<b>1,401</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>1,132</b>	<b>0,918</b>	<b>1,398</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,130</b>	<b>0,156</b>	<b>0,155</b>
18	30/01/2015	0,003	LEITURA (mm)	1,237	0,980	1,482
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,234	0,977	1,479
			VARIAÇÃO (%)	0,171	0,179	0,187
21	02/02/2015	-0,001	LEITURA (mm)	1,315	1,060	1,526
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,316	1,061	1,527
			VARIAÇÃO (%)	0,203	0,213	0,206
24	<b>05/02/2015</b>	-0,001	LEITURA (mm)	1,400	1,100	1,600
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,401	1,101	1,601
			VARIAÇÃO (%)	0,237	0,229	0,235
28	09/02/2015	0,002	LEITURA (mm)	1,491	1,240	1,645
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,489	1,238	1,643
			VARIAÇÃO (%)	0,272	0,283	0,252
<b>30 DIAS</b>	<b>11/02/2015</b>	<b>0,007</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,495</b>	<b>1,302</b>	<b>1,772</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>1,488</b>	<b>1,295</b>	<b>1,765</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,272</b>	<b>0,306</b>	<b>0,300</b>

## Leituras das expansões das barras da amostra C

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	252,5	252,0	252,4
<i>Leitura Orientativa</i>	<b>13/01/2015</b>	<b>0,000</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,206</b>	<b>0,836</b>	<b>0,777</b>
$l_0$	<b>14/01/2015</b>	<b>-0,002</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,346</b>	<b>0,982</b>	<b>0,927</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>1,348</b>	<b>0,984</b>	<b>0,929</b>
4	16/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	1,374	1,003	0,950
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,374	1,003	0,950
			VARIAÇÃO (%)	0,010	0,008	0,008
7	19/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	1,484	1,116	1,060
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,489	1,121	1,065
			VARIAÇÃO (%)	0,056	0,054	0,054
9	21/01/2015	-0,001	LEITURA (mm)	1,540	1,162	1,140
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,541	1,163	1,141
			VARIAÇÃO (%)	0,076	0,071	0,084
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	1,656	1,273	1,208
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,656	1,273	1,208
			VARIAÇÃO (%)	0,122	0,115	0,111
<b>16 DIAS</b>	<b>28/01/2015</b>	<b>0,003</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>1,708</b>	<b>1,355</b>	<b>1,281</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>1,705</b>	<b>1,352</b>	<b>1,278</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,141</b>	<b>0,146</b>	<b>0,138</b>
18	30/01/2015	0,001	LEITURA (mm)	1,840	1,410	1,340
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,839	1,409	1,339
			VARIAÇÃO (%)	0,194	0,169	0,162
21	02/02/2015	0,003	LEITURA (mm)	1,910	1,555	1,440
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,907	1,552	1,437
			VARIAÇÃO (%)	0,221	0,225	0,201
24	<b>05/02/2015</b>	0,001	LEITURA (mm)	1,950	1,580	1,450
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,949	1,579	1,449
			VARIAÇÃO (%)	0,238	0,236	0,206
28	09/02/2015	-0,001	LEITURA (mm)	1,980	1,604	1,510
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,981	1,605	1,511
			VARIAÇÃO (%)	0,251	0,246	0,231
<b>30 DIAS</b>	<b>11/02/2015</b>	<b>0,007</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>2,031</b>	<b>1,692</b>	<b>1,606</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>2,024</b>	<b>1,685</b>	<b>1,599</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,268</b>	<b>0,278</b>	<b>0,265</b>

## Variação dimensional por idade em dias da amostra C

VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS BARRAS DE ARGAMASSA EM SOLUÇÃO ALCALINA											
Idade (dias)	2	4	7	9	12	16	18	21	24	28	30
Variação dimensional média (%)	<b>0,00</b>	0,01	0,06	0,07	0,11	0,15	0,18	0,22	0,23	0,24	0,28

## Leituras das expansões das barras da amostra D

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	249,7	248,9	250,3
<i>Leitura Orientativa</i>	<b>13/01/2015</b>	<b>-0,001</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>-0,640</b>	<b>-0,415</b>	<b>-0,615</b>
$l_0$	<b>14/01/2015</b>	<b>-0,002</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>-0,665</b>	<b>-0,463</b>	<b>-0,662</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>-0,663</b>	<b>-0,461</b>	<b>-0,660</b>
4	16/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	-0,647	-0,668	-0,640
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,647	-0,668	-0,640
			VARIAÇÃO (%)	0,006	-0,083	0,008
7	19/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	-0,551	-0,380	-0,554
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,546	-0,375	-0,549
			VARIAÇÃO (%)	0,047	0,035	0,044
9	21/01/2015	0,001	LEITURA (mm)	-0,510	-0,300	-0,510
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,511	-0,301	-0,511
			VARIAÇÃO (%)	0,061	0,064	0,060
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	-0,430	-0,221	-0,451
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,430	-0,221	-0,451
			VARIAÇÃO (%)	0,093	0,096	0,083
<b>16 DIAS</b>	<b>28/01/2015</b>	<b>0,001</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>-0,410</b>	<b>-0,210</b>	<b>-0,380</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>-0,411</b>	<b>-0,211</b>	<b>-0,381</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,101</b>	<b>0,100</b>	<b>0,111</b>
18	30/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	-0,390	-0,160	-0,340
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,385	-0,155	-0,335
			VARIAÇÃO (%)	0,111	0,123	0,130
21	02/02/2015	-0,005	LEITURA (mm)	-0,380	-0,100	-0,250
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,375	-0,095	-0,245
			VARIAÇÃO (%)	0,115	0,147	0,166
24	<b>05/02/2015</b>	0,004	LEITURA (mm)	-0,360	-0,090	-0,200
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,364	-0,094	-0,204
			VARIAÇÃO (%)	0,120	0,147	0,182
28	09/02/2015	0,001	LEITURA (mm)	-0,310	-0,081	-0,080
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,311	-0,082	-0,081
			VARIAÇÃO (%)	0,141	0,152	0,231
<b>30 DIAS</b>	<b>11/02/2015</b>	<b>0,004</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>-0,219</b>	<b>0,075</b>	<b>-0,007</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>-0,223</b>	<b>0,071</b>	<b>-0,011</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,176</b>	<b>0,214</b>	<b>0,259</b>



Leituras das expansões das barras da amostra D

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	248,1	247,9	243,0
<i>Leitura Orientativa</i>	13/01/2015	-0,001	LEITURA (mm)	-0,630	-0,810	-0,800
$l_0$	14/01/2015	-0,002	LEITURA (mm)	-0,616	-0,797	-0,772
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,614	-0,795	-0,770
4	16/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	-0,597	-0,767	-0,741
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,597	-0,767	-0,741
			VARIAÇÃO (%)	0,007	0,011	0,012
7	19/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	-0,511	-0,678	-0,643
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,506	-0,673	-0,638
			VARIAÇÃO (%)	0,044	0,049	0,054
9	21/01/2015	0,001	LEITURA (mm)	-0,490	-0,660	-0,610
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,491	-0,661	-0,611
			VARIAÇÃO (%)	0,050	0,054	0,065
12	24/01/2015	0,002	LEITURA (mm)	-0,411	-0,501	-0,555
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,413	-0,503	-0,557
			VARIAÇÃO (%)	0,081	0,118	0,088
16 DIAS	28/01/2015	0,001	LEITURA (mm)	-0,380	-0,430	-0,510
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,381	-0,431	-0,511
			VARIAÇÃO (%)	0,094	0,147	0,107
18	30/01/2015	0,001	LEITURA (mm)	-0,310	-0,390	-0,450
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,311	-0,391	-0,451
			VARIAÇÃO (%)	0,122	0,163	0,131
21	02/02/2015	-0,002	LEITURA (mm)	-0,200	-0,250	-0,320
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,198	-0,248	-0,318
			VARIAÇÃO (%)	0,168	0,221	0,186
24	05/02/2015	0,004	LEITURA (mm)	-0,100	-0,200	-0,200
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,104	-0,204	-0,204
			VARIAÇÃO (%)	0,206	0,238	0,233
28	09/02/2015	0,001	LEITURA (mm)	-0,050	-0,280	-0,200
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,051	-0,281	-0,201
			VARIAÇÃO (%)	0,227	0,207	0,234
30 DIAS	11/02/2015	0,004	LEITURA (mm)	-0,001	-0,203	-0,271
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	-0,005	-0,207	-0,275
			VARIAÇÃO (%)	0,245	0,237	0,204

Tabela 6.1 - Variação dimensional por idade em dias da amostra D

VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS BARRAS DE ARGAMASSA EM SOLUÇÃO ALCALINA											
Idade (dias)	2	4	7	9	12	16	18	21	24	28	30
Variação dimensional média (%)	0,00	0,01	0,05	0,06	0,1	0,11	0,13	0,17	0,19	0,19	0,23

## Leituras das expansões das barras da amostra E

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	251,5	251,3	251,9
<i>Leitura Orientativa</i>	<b>13/01/2015</b>	<b>0,000</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,242</b>	<b>0,246</b>	<b>0,246</b>
$l_0$	<b>14/01/2015</b>	<b>-0,002</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,406</b>	<b>0,388</b>	<b>0,388</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>0,408</b>	<b>0,390</b>	<b>0,390</b>
4	16/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,412	0,460	0,460
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,412	0,460	0,460
			VARIAÇÃO (%)	0,002	0,028	0,028
7	19/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	0,393	0,456	0,456
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,398	0,461	0,461
			VARIAÇÃO (%)	-0,004	0,028	0,028
9	21/01/2015	0,001	LEITURA (mm)	0,415	0,462	0,462
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,414	0,461	0,461
			VARIAÇÃO (%)	0,002	0,028	0,028
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,499	0,487	0,502
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,499	0,487	0,502
			VARIAÇÃO (%)	0,036	0,039	0,044
<b>16 DIAS</b>	<b>28/01/2015</b>	<b>-0,002</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,543</b>	<b>0,557</b>	<b>0,571</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>0,545</b>	<b>0,559</b>	<b>0,573</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,054</b>	<b>0,067</b>	<b>0,073</b>
18	30/01/2015	0,002	LEITURA (mm)	0,570	0,584	0,584
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,568	0,582	0,582
			VARIAÇÃO (%)	0,064	0,076	0,076
21	02/02/2015	-0,001	LEITURA (mm)	0,585	0,641	0,641
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,586	0,642	0,642
			VARIAÇÃO (%)	0,071	0,100	0,100
24	<b>05/02/2015</b>	0,001	LEITURA (mm)	0,593	0,651	0,600
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,592	0,650	0,599
			VARIAÇÃO (%)	0,073	0,103	0,083
28	09/02/2015	0,007	LEITURA (mm)	0,610	0,684	0,684
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,603	0,677	0,677
			VARIAÇÃO (%)	0,078	0,114	0,114
<b>30 DIAS</b>	<b>11/02/2015</b>	<b>0,004</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,633</b>	<b>0,723</b>	<b>0,723</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>0,629</b>	<b>0,719</b>	<b>0,719</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,088</b>	<b>0,131</b>	<b>0,131</b>

## Leitura das expansões amostra E

LEITURAS						
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	250,9	251,9	252,8
<i>Leitura Orientativa</i>	<b>13/01/2015</b>	<b>0,000</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>-0,079</b>	<b>0,738</b>	<b>1,298</b>
$l_0$	<b>14/01/2015</b>	<b>-0,002</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,052</b>	<b>0,846</b>	<b>1,471</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>0,054</b>	<b>0,848</b>	<b>1,473</b>
4	16/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,051	0,764	1,483
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,051	0,764	1,483
			VARIAÇÃO (%)	-0,001	-0,033	0,004
7	19/01/2015	-0,005	LEITURA (mm)	0,107	0,817	1,539
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,112	0,822	1,544
			VARIAÇÃO (%)	0,023	-0,010	0,028
9	21/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,108	0,840	1,550
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,108	0,840	1,550
			VARIAÇÃO (%)	0,022	-0,003	0,030
12	24/01/2015	0,000	LEITURA (mm)	0,110	0,861	1,575
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,110	0,861	1,575
			VARIAÇÃO (%)	0,022	0,005	0,040
<b>16 DIAS</b>	<b>28/01/2015</b>	<b>0,008</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,113</b>	<b>0,911</b>	<b>1,620</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>0,105</b>	<b>0,903</b>	<b>1,612</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,020</b>	<b>0,022</b>	<b>0,055</b>
18	30/01/2015	-0,001	LEITURA (mm)	0,135	0,920	1,645
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,136	0,921	1,646
			VARIAÇÃO (%)	0,033	0,029	0,068
21	02/02/2015	0,001	LEITURA (mm)	0,180	0,990	1,685
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,179	0,989	1,684
			VARIAÇÃO (%)	0,050	0,056	0,083
24	<b>05/02/2015</b>	0,001	LEITURA (mm)	0,190	0,995	1,690
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,189	0,994	1,689
			VARIAÇÃO (%)	0,054	0,058	0,085
28	09/02/2015	0,007	LEITURA (mm)	0,198	1,018	1,695
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,191	1,011	1,688
			VARIAÇÃO (%)	0,055	0,065	0,085
<b>30 DIAS</b>	<b>11/02/2015</b>	<b>0,004</b>	<b>LEITURA (mm)</b>	<b>0,243</b>	<b>1,049</b>	<b>1,730</b>
			<b>LEITURA CORRIGIDA (mm)</b>	<b>0,239</b>	<b>1,045</b>	<b>1,726</b>
			<b>VARIAÇÃO (%)</b>	<b>0,074</b>	<b>0,078</b>	<b>0,100</b>

## Variação dimensional por idade em dias da amostra E

VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS BARRAS DE ARGAMASSA EM SOLUÇÃO ALCALINA											
Idade (dias)	2	4	7	9	12	16	18	21	24	28	30
Variação dimensional média (%)	<b>0,00</b>	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08	0,08	0,09	0,1

**APÊNDICE C – Gráficos contendo a evolução das expansões médias percentuais das barras de argamassa, ao longo de 30 dias.**

