

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANA CAROLINA CURVINA UBALDO  
RENATA KARINA DE MORAES**

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO EM FORTRAN PARA A ANÁLISE  
DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2014**

ANA CAROLINA CURVINA UBALDO  
RENATA KARINA DE MORAES

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO EM FORTRAN PARA A  
ANÁLISE DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE  
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil, da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Campus Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Carrazedo.

Coorientador: Prof<sup>a</sup>.Dra. Paôla Regina Dalcanal.

PATO BRANCO

2014

**TERMO DE APROVAÇÃO**  
**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO EM FORTRAN PARA**  
**ANÁLISE DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE**  
**CONCRETO**

**ANA CAROLINA CURVINA UBALDO**

**e**

**RENATA KARINA DE MORAES**

Aos 5 dias do mês de dezembro do ano de 2014, às 15:30 horas, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 47-TCC/2014.

Orientador: Prof. Dr. ROGÉRIO CARRAZEDO (DACOC/UTFPR-PB)

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. PAÔLA REGINA DALCANAL (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Dr. GUSTAVO LACERDA DIAS (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. FRANCISCO AUGUSTO APARECIDO GOMES  
(DAMEC/UTFPR-PB)

## DEDICATÓRIA

À Deus, sem o qual não teríamos forças para essa longa jornada; e aos nossos pais, professores e amigos que nos ajudaram na conclusão deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus pelo dom da vida e por iluminar nossos caminhos durante toda esta longa caminhada, com força e coragem.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Rogério Carrazedo e a nossa coorientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Paôla R. Dalcanal, pela disponibilidade, conhecimento compartilhado, sabedoria, paciência na orientação, incentivo e amizade que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Aos professores que contribuíram para nossa formação acadêmica.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

A Instituição pelos recursos fornecidos.

Aos nossos pais que nos apoiaram e motivaram a perseguir nossos sonhos e ideais, sem desanimar diante dos obstáculos.

Aos nossos amigos pela convivência e companheirismo que fizeram parte de nossa formação, e que continuarão certamente presentes em nossas vidas.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desse trabalho, o nosso agradecimento.

## EPÍGRAFE

“Que os vossos esforços desafiem as  
impossibilidades, lembrai-vos de que as  
grandes coisas do homem foram  
conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

## RESUMO

MORAES, Renata K.; UBALDO, Ana C. C. **Desenvolvimento de aplicativo em fortran para a análise da reação álcali-agregado em estruturas de concreto.** 2014. 55 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química que ocorre entre os álcalis do cimento e os elementos químicos presentes na composição mineralógica de alguns tipos de agregados. A RAA é complexa e há muitos parâmetros interagindo e interdependentes que influenciam sua ocorrência, que pode resultar no surgimento de expansões, podendo originar fissuras, aumento de permeabilidade, diminuição da resistência à tração e compressão, bem como do módulo de elasticidade do material, reduzindo a vida útil da estrutura. Para prever as modificações em estruturas de concreto, o emprego da modelagem numérica através de um modelo paramétrico apresenta resultados com bom grau de aproximação a uma estrutura real. Essa modelagem é empregada no presente trabalho, juntamente com o Método de Elementos Finitos para os problemas de elasticidade.

O aplicativo desenvolvido faz a análise elástico-linear de uma estrutura em concreto e, após a inclusão das modificações estruturais decorrentes da reação álcali-agregado, calcula as deformações, deslocamentos e tensões nessa estrutura que está sobre ação da RAA. Esse aplicativo foi desenvolvido na linguagem Fortran utilizando elementos finitos tridimensionais. A validação do programa foi feita pela variação do deslocamento ao longo do tempo em relação aos resultados apresentados pelo software ANSYS® e pelo método analítico. Nota-se que o aplicativo desenvolvido conseguiu descrever adequadamente o comportamento de uma estrutura de concreto sujeito à reação álcali-agregado.

**Palavras-chave:** Reação álcali-agregado. Modelo paramétrico. Concreto. Método de elementos finitos.

## ABSTRACT

MORAES, Renata K.; UBALDO, Ana C. C. **Development of an application using fortran for the analysis of alkali-aggregate reaction in concrete structures**, 2014. 55 pages. Completion of course work in Civil Engineering - Federal Technological University of Parana. Pato Branco, 2014.

The Alkali-Aggregate Reaction (AAR) is a chemical reaction that occurs between the cement's alkali ions and some chemical elements present in the mineral composition of some types of aggregates. The Alkali-Aggregate Reaction is complex and there are many interacting and interdependent parameters, which influence its occurrence, and it can lead to expansions, which cause cracking, increase permeability, decrease the traction and compression's resistance, as well as the young modulus, reducing the lifespan of concrete structures.

To predict changes in the concrete structure, use of numerical modeling through parametric model presents results with a good degree of approximation to real structures, which is used in this work, along with the Finite Element Method for elasticity problems.

The application developed analysis a linear elastic solid, and after inclusion of structural changes due to the AAR, it can calculate the deformations, displacements and stresses of a concrete structure. This application was developed in Fortran language using three-dimensional finite elements. The validation of the program was done by varying the displacement over time in relation to the results presented by ANSYS® and the analytical method. It can be noticed that the developed application can describe properly the behavior of a concrete structure subjected to alkali-aggregate reaction.

**Keywords:** Alkali-Aggregate Reaction. Parametric model. Concrete. Finite Element Method.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução da livre expansão, $\epsilon_1$ e $\epsilon_2$ , em um caso de compressão uniaxial. ....	18
Figura 2- Relação entre quantidade de cimento no concreto, quantidade de álcalis no cimento e potencial resultante a RAA. ....	20
Figura 3 - Sistema de coordenadas locais .....	23
Figura 4- Fatores de influência ( $F_M$ , $F_P$ , $F_C$ , $F_T$ ) e calibração ( $k_p$ , $k_c$ , $k_m$ , $k_t$ ).....	30
Figura 5- Modelo tridimensional do corpo de prova, em elementos finitos sólidos cúbicos. ....	36
Figura 6- Corpo de prova com desocamento em Z - ANSYS®.....	37
Figura 7- Corpo de prova com desocamento em Z – Programa RAA.....	37
Figura 8- Deslocamento em Z.....	38
Figura 9- Deslocamento em Z – Programa RAA.....	39
Figura 10- Deslocamento em Y. ....	40
Figura 11- Deslocamento em Y – Programa RAA. ....	40
Figura 12- Malha distorcida, com carregamento e restrição de apoio. ....	41
Figura 13- Deslocamento em Z em malha distorcida.....	42
Figura 14- Deslocamento em Z – Programa RAA.....	42
Figura 15- Deslocamento em Y com malha distorcida.....	43
Figura 16– Deslocamento em Y – Programa RAA.....	44
Figura 17- Modelo de corpo de prova deformado e seus deslocamentos no eixo Z, para diferentes espaços de tempo.....	47
Figura 18- Deformação do corpo de prova ao longo de 300 passos de tempo...	49

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS .....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos .....	12
1.2	JUSTIFICATIVA .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	13
2.1	REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (RAS).....	13
2.2	REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO (RASS) .....	14
2.3	REAÇÃO ÁLCALI- CARBONATO (RAC) .....	14
3	FATORES QUE INFLUENCIAM A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO .....	16
3.1	UMIDADE.....	16
3.2	POROSIDADE.....	16
3.3	TEMPERATURA .....	17
3.4	TENSÕES CONFINANTES.....	17
3.5	REATIVIDADE DO AGREGADO.....	18
3.6	CONTEÚDO DE ÁLCALIS NO CONCRETO .....	19
4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	21
4.1	PRINCÍPIO DOS TRABALHOS VIRTUAIS .....	21
5	MODELO NUMÉRICO DE MODELAGEM DA RAA.....	29
5.1	FATORES DE INFLUÊNCIA E NORMALIZAÇÃO .....	29
5.2	EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DA RAA.....	31
5.3	IMPLEMENTAÇÃO .....	31
6	RESULTADOS.....	35
6.1	VALIDAÇÃO .....	35
6.1.1	Malha regular e Poisson nulo .....	36
6.1.2	Malha regular e Poisson igual a 0,2 .....	38

6.1.3	Malha Distorcida.....	41
6.2	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	45
7	CONCLUSÃO.....	50
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
8	REFERÊNCIAS.....	52

## 1 INTRODUÇÃO

Desde que Thomas Edison Stanton em 1940 observou e diagnosticou a reação álcali-agregado (RAA), o fenômeno tem sido assunto de muitas pesquisas. Os estudos têm progredido rapidamente em uma série de direções, por exemplo que vão desde a identificação dos componentes minerais dos agregados às características mineralógicas que estão envolvidas na reação, para diagnóstico, teste e avaliação da reação nas propriedades do concreto. No entanto, o fenômeno da RAA é complexo e há muitos parâmetros interagindo e interdependentes que influenciam sua ocorrência, o que ainda deixa muitas perguntas sem respostas (WIGUM, 1995).

A RAA é uma reação química entre íons de sódio e potássio numa solução e certos tipos de agregados. Alguns dos fatores que influenciam nesta reação são: temperatura, umidade, porosidade, as tensões confinantes, a reatividade do agregado e o conteúdo de álcali no concreto.

O estudo da Reação Álcali Agregado (RAA) e seus fatores de influência é fundamental para prevenir futuros danos à estrutura de obras de grande porte, principalmente as hidráulicas, que podem vir a comprometer a sua vida útil, assim como para analisar os danos já existentes para que então possam ser realizados os devidos reparos. Para tanto, a RAA é alvo dos mais variados estudos envolvendo ensaios experimentais, a aplicação de modelos matemáticos e o desenvolvimento de aplicativos para a modelagem de estruturas de concreto sujeitas à essa reação.

Sabe-se que grandes estruturas de concreto armado, como pontes, barragens e túneis, estão sujeitas a fenômenos deletérios, entre eles a RAA, que pode resultar no surgimento de expansões, com ou sem formação de gel, podendo originar fissuras, aumento de permeabilidade, diminuição da resistência física e química, reduzindo a vida útil da estrutura e até mesmo levando-a à ruptura.

Este trabalho se baseia na continuação da pesquisa realizada em Carrazedo (2004), em que um modelo paramétrico foi proposto para simular a expansão volumétrica isotrópica do concreto devido à reação álcali-agregado, empregando um aplicativo comercial, o ANSYS®. Os principais pontos abordados foram publicados nos artigos de Carrazedo e Lacerda (2004) e Carrazedo e Lacerda (2008). Alguns pontos de aprimoramento foram apresentados em Carrazedo, Sanches e Lacerda (2012), em que

foi proposto um modelo paramétrico simulando a expansão ortotrópica do gel da RAA, decorrente dos diferentes estados de tensão. Ademais, na dissertação de Oliveira (2013) foi introduzido ao referido modelo paramétrico a redução do módulo de elasticidade, conforme o desenvolvimento do fenômeno. As últimas publicações referentes ao desenvolvimento desta pesquisa foram apresentadas no Cilamce 2013 e Cilamce 2014 (Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia) (OLIVEIRA, CARRAZEDO e LACERDA, 2013; CARRAZEDO et. al, 2014).

No último trabalho foi percebida uma limitação no ANSYS®, relacionada à implementação da redução do módulo de elasticidade, que ampliava em muito o custo computacional. Neste trabalho foi desenvolvido um aplicativo para a análise de estruturas sujeitas a RAA, utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF), o qual foi implementado na linguagem computacional Fortran 90.

Na sequência é descrita a organização deste trabalho. O item 2 aborda a reação álcali-agregado e os três principais tipos da reação, já o item 3 traz os fatores que influenciam a reação álcali-agregado. O item 4 apresenta uma introdução ao Método de Elementos Finitos (MEF) e ao princípio dos trabalhos virtuais. Já o item 5 traz o modelo numérico de modelagem da RAA, os fatores de influência e normalização, a equação constitutiva da RAA e a implementação do aplicativo desenvolvido com o emprego da linguagem computacional Fortran. O item 6 apresenta os resultados obtidos, bem como a validação do programa e, o item 7 descreve a conclusão deste trabalho.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um aplicativo em método de elementos finitos para a modelagem de estruturas de concreto sujeitas à reação álcali-agregado considerando lei constitutiva elástico-linear.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Aplicar o MEF (Método de Elementos Finitos) para problemas de elasticidade.
- Desenvolver, em Fortran, um aplicativo para análise elástico-linear.
- Incluir no aplicativo as modificações estruturais decorrentes da RAA.

## 2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado é uma reação química que ocorre entre os álcalis do cimento (íons de sódio e potássio) e elementos químicos presentes na composição mineralógica de alguns tipos de agregados. Esta reação pode ser dividida em:

- Reação Álcali-Sílica (RAS);
- Reação Álcali-Silicato (RASS);
- Reação Álcali-Carbonato (RAC).

Os três tipos de reação são deletérias, ou seja, são prejudiciais ao concreto. Na tabela 1 são relacionados os componentes minerais reativos mais comuns, que juntamente aos álcalis liberados na hidratação do cimento, provocam as reações citadas acima, resultando em mecanismos de expansão diferentes para cada uma.

Tabela 1 – Composição dos Minerais Relacionados com o RAA

MINERAL REATIVO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA REATIVA	NATUREZA DA REAÇÃO
Quartzo Deformado	$SiO_2$	Álcali-Silicato
Opala	$SiO_2 \cdot H_2O$	Álcali-Sílica
Calcedônia	$SiO_2$	Álcali-Sílica
Tridimita / Cristobalita	$SiO_2$	Álcali-Sílica
Vidros	Silicosos com $Al_2O_3$ e $Fe_2O_3$	Álcali-Sílica
Calcita e Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	Álcali-Carbonato

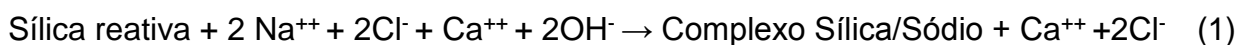
Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

### 2.1 REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (RAS)

A reação álcali-silica (RAS) ocorre entre certas formas de sílica, estruturalmente distorcidas ou amorfas, e soluções de hidróxido alcalino, durante a hidratação do concreto. Os íons hidroxila ( $OH^-$ ) ficam dissociados e modificam a estrutura da sílica do agregado ( $SiO_2$ ), possibilitando a associação de íons metálicos alcalinos como sódio, potássio e lítio (Na, K e Li, respectivamente). Porém a associação do lítio cria um gel que dificulta a absorção de água pelo gel, mas não é comumente encontrado após a hidratação do cimento. O produto da RAS é um gel de silicato e álcalis, susceptível de expansão pela absorção de água.

A expansão do gel pela absorção de água por osmose, gera uma pressão hidráulica que pode causar microfissuras no concreto se a resistência à tração do concreto

for superada. Com a absorção de água o gel pode se mover e penetrar no agregado e em outros pontos no concreto, absorvendo mais água e criando fissuras ao longo do concreto, até a superfície. Chatterji, Jensen e Thaulow(1989) descrevem esse processo como:



Chatterjiet et al. (1984) mostraram que uma solução saturada de NaCl acelera a reação álcali-sílica, e a presença de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é pré-requisito para a expansão devido à reação, assim como a expansão ocorre quando a penetração de íons hidroxila, sódio e potássio nos cristais de sílica é maior do que a saída de íons de sílica para os poros do concreto.

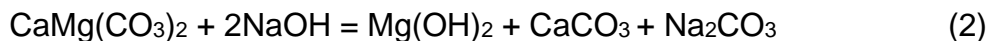
## 2.2 REAÇÃO ÁLCALI-SILICATO (RASS)

A reação álcali-silicato ocorre de maneira muito semelhante a reação álcali-sílica, acontecendo entre os íons alcalinos liberados na hidratação do concreto e os minerais que possuem estrutura denominada pela ligação entre o silício e o oxigênio. Alguns pesquisadores não fazem distinção entre a RAS e a RASS, porém, nesta o processo se dá mais lentamente devido aos minerais reativos apresentarem-se de forma mais disseminada na matriz do agregado, além da presença de quartzo deformado.

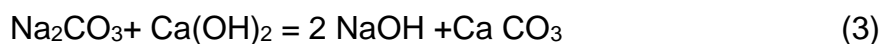
A liberação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na hidratação do concreto pode reagir com o agregado, e quando isto ocorre provoca a liberação de álcalis na forma KOH e NaOH, silicato de potássio e sódio. A partir de certo ponto de concentração de álcalis a tendência é que os silicatos de cálcio se dissolvam em silicatos de potássio e sódio, formando, assim, um gel que contém cálcio, potássio, sódio e sílica. O gel apresenta propriedades expansivas quando em presença de água e é parcialmente solúvel, o que concede ao gel mobilidade dentro do agregado e do cimento.

## 2.3 REAÇÃO ÁLCALI- CARBONATO (RAC)

A reação álcali-carbonato ocorre em pelo menos duas etapas. Uma consiste na desdolomitização, e a outra consiste na regeneração dos íons alcalinos. A reação que ocorre entre os íons alcalinos e o calcário dolomítico é o processo de desdolomitização, de acordo com a seguinte expressão (LIANG e MINGSHU, 1995):



Sendo que na expressão anterior pode-se ter no lugar de sódio (Na), potássio (K) ou lítio (Li). Como resultado da reação, tem-se brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Porém, o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento reagirá com o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , como expresso a seguir:



Esta reação libera mais íons alcalinos e mais calcita, mantendo o PH e fazendo com que o álcali funcione como um catalisador da reação, disponível para iniciar novo processo. A desdolomitização continuará até que a dolomita tenha reagido por completo, ou a fonte de álcalis se esgote, uma vez que a reação regenera os hidróxidos alcalinos.

Relacionado à expansão desta reação, os autores possuem teorias diferentes. Gillot (1986) sugeriu que a absorção de água por argilas recém expostas a rochas carbonáticas reativas são a principal razão da expansão, e futuramente foi proposto que a formação e crescimento da brucita devido à desdolomitização é expansível. Já Liang e Mingshu (1995) fizeram estudos microestruturais que mostraram que a expansão é devida à formação e crescimento dos produtos cristalinos da reação em espaço confinado.



### 3 FATORES QUE INFLUENCIAM A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

De acordo com Léger, Côté e Tinawi (1996) os principais fatores que influenciam na reação álcali-agregado são provindos da umidade, porosidade, temperatura, tensões confinantes, reatividade do agregado e do conteúdo de álcalis no concreto.

Podem ser tomadas providências quanto ao aparecimento da RAA, ou de forma a prevenir sua futura ocorrência. Para tanto devem-se relacionar os fatores que estimulam e influenciam o surgimento e desenvolvimento desta reação com a forma de influência de cada fator, bem como a interação entre esses.

#### 3.1 UMIDADE

A presença de água é essencial para a ocorrência da reação álcali-agregado, pois ela contém os íons hidroxila que solubilizam os álcalis, além de ser necessária no processo de expansão da reação álcali-sílica e álcali-silicato. Sem água, a RAA pode não ocorrer, mesmo na presença de agregados reativos e álcalis no concreto.

No interior do concreto, o deslocamento dos fluidos dependerá da sua permeabilidade, da relação água-cimento, da compactidade e da continuidade dos poros no concreto.

Para Bazant e Steffens (2000) quando a umidade relativa na capilaridade dos poros do concreto passar de 85% há formação de gel. Já para Léger, Côté e Tinawi (1996) uma umidade relativa do concreto de aproximadamente 75% é necessária para iniciar uma expansão significativa, embora o gel possa ser formado com umidades relativas mais baixas.

#### 3.2 POROSIDADE

A composição do concreto pode refletir na intensidade dos efeitos da RAA, sendo também muito importantes os fatores associados à sua porosidade e permeabilidade. Uma relação água/cimento mais baixa produz um concreto com melhores propriedades mecânicas, com uma permeabilidade menor, logo, menor percolação de água, menor entrada de água do meio externo, menor teor de água interna livre. Desta forma pode-se dizer que uma redução na relação água cimento resultará na redução da expansão da RAA.

A porosidade do concreto interfere muito na expansão do concreto, de acordo com o tipo de reação desenvolvida no concreto. Para a reação álcali-sílica e álcali-silicato, há duas formas da porosidade interferir. O concreto com uma porosidade baixa pode impedir a percolação da água em seu interior, evitando a formação do gel expansivo pela falta de água (íons hidroxila). Já o concreto muito poroso permite a formação livre do gel expansivo, e tendo espaço para esse se desenvolver não haverá danos à estrutura do concreto.

Já para a reação álcali-carbonato, são os mesmos efeitos, mas o mecanismo com o qual a porosidade interfere depende do que o pesquisador adota. Para Liang e Mingshu (1995) a formação de cristais não é influenciada pela presença de água, desta forma, a baixa porosidade somente impediria o espaço para formação desses cristais, causando tensões internas de tração e consequente fissuração. Para Gillot (1986) uma baixa umidade relativa gera baixa ou nenhuma expansão, logo, uma baixa porosidade pode impedir a expansão através da redução da percolação de água no concreto. Com alta porosidade, a formação de cristais nos poros do concreto é livre, não ocorrendo então a expansão do concreto.

### 3.3 TEMPERATURA

A elevação da temperatura no concreto funciona como um catalisador da reação álcali-agregado, pois provoca a aceleração das reações químicas, assim como o gel flui mais facilmente pelos vazios do concreto. Na medida em que se eleva a temperatura, aumentam as expansões provenientes da reação álcali-agregado.

Segundo Collins e Bareham (1987) há um acréscimo na solubilidade da sílica e uma redução na solubilidade do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) quando ocorre um aumento na temperatura. Tal fato resulta em uma maior velocidade da reação, pois a sílica se torna mais propensa a reagir e reduz a capacidade do  $\text{Ca(OH)}_2$  de se combinar com o gel e reduzir a capacidade expansiva da reação.

### 3.4 TENSÕES CONFINANTES

As tensões confinantes tendem a limitar a livre expansão do concreto, podendo até suprimi-la, pois o gel alcalino formado absorve água e não pode se expandir livremente, porque está contido pela pasta de cimento. As tensões confinantes influenciam

substancialmente a expansão por RAA. Uma tensão de compressão reduz as expansões em sua direção, porém, uma tensão de tração não contribui significativamente para o aumento das deformações por RAA.

Por sua vez, uma carga de compressão aplicada em uma direção qualquer à direção ortogonal ao carregamento pode ter um acréscimo referente a expansão restringida na outra direção, além da expansão que sofreria naturalmente. Numa simulação numérica da reação álcali-agregado, Capra e Bournazel (1998) obtiveram o gráfico apresentado na Figura 1, que exemplifica o que foi citado anteriormente. O carregamento é aplicado na direção 2 e, a curva de expansão livre foi obtida pela soma das expansões nas direções 1 e 2, quando não existiam tensões aplicadas.

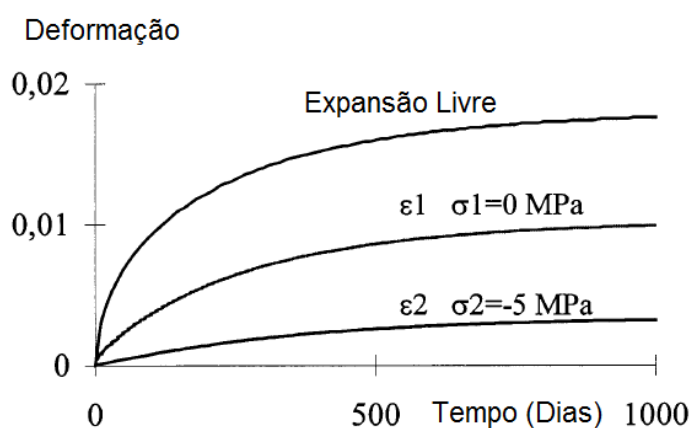


Figura 1- Evolução da livre expansão,  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , em um caso de compressão uniaxial.

Fonte: Capra e Bournazel (1998).

No concreto armado, as armaduras de aço desempenham a função de contenção das deformações impostas à massa do concreto, induzindo tensões de confinamento, que contribuem para a redução das expansões por RAA. Por outro lado alguns autores defendem que, quando há perda de aderência entre a barra de aço e o concreto, devida a ciclos de gelo e degelo, por exemplo, ocorre uma redistribuição de tensões, que produzirá fissuras, aumentando a permeabilidade e favorecendo a RAA.

### 3.5 REATIVIDADE DO AGREGADO

O grau de reatividade do agregado está ligado à velocidade que ocorrem as reações, bem como ao tipo de reação que ocorrerá. Algumas características do agregado

como seu tipo, forma, tamanho, composição e área específica, afetam a intensidade da reação álcali-agregado.

Os agregados reativos, por possuírem fases mineralógicas silicosas em sua composição, são susceptíveis à reação com os álcalis solúveis do concreto. Para Zhang et al. (1999) quando o agregado é reativo devido à sílica, quanto menor for o tamanho do agregado, maior a taxa de expansão da reação, analisando dimensões do agregado entre 0,15 e 10 mm.

### 3.6 CONTEÚDO DE ÁLCALIS NO CONCRETO

O cimento Portland constitui a principal fonte de álcalis no concreto, sendo os álcalis por sua vez expressos na forma de óxido de potássio ( $K_2O$ ) e óxido de sódio ( $Na_2O$ ). Mehta e Monteiro (2004) afirmam que, se o conteúdo alcalino do cimento for menor que 0,6%, não ocorrem danos provenientes de RAA, independentemente dos agregados reativos. Entretanto, em concretos contendo um consumo muito alto de cimento há possibilidade de ocorrência de danos até para conteúdo de álcalis menor que 0,6%. Então, cimentos com um teor de álcalis, maior que 0,6% de  $Na_2O$ , em exposição a um tipo de agregado reativo geram o gel expansivo das reações álcali-sílica e álcali-silicato.

Em geral os álcalis solúveis são fornecidos principalmente pelo cimento, mas segundo Berubé et al. (2002), também podem ser fornecidos por aditivos químicos ou adições minerais, por agregados ou por fontes secundárias, como a água do mar, sais de degelo e resíduos industriais. Ainda existe a possibilidade de alguns componentes do agregado liberarem álcalis diretamente na solução dos poros de concreto, e, de acordo com Constantiner e Diamond (2003), tal liberação pode permitir a ocorrência da RAS mesmo com cimentos de baixa alcalinidade.

É importante estabelecer quantidades limites de álcalis no cimento, mas também é muito importante estabelecer a quantidade de cimento no concreto, de modo que a potencialidade reativa destas combinações sejam controladas. A Figura 2 traz a relação entre os fatores citados anteriormente.

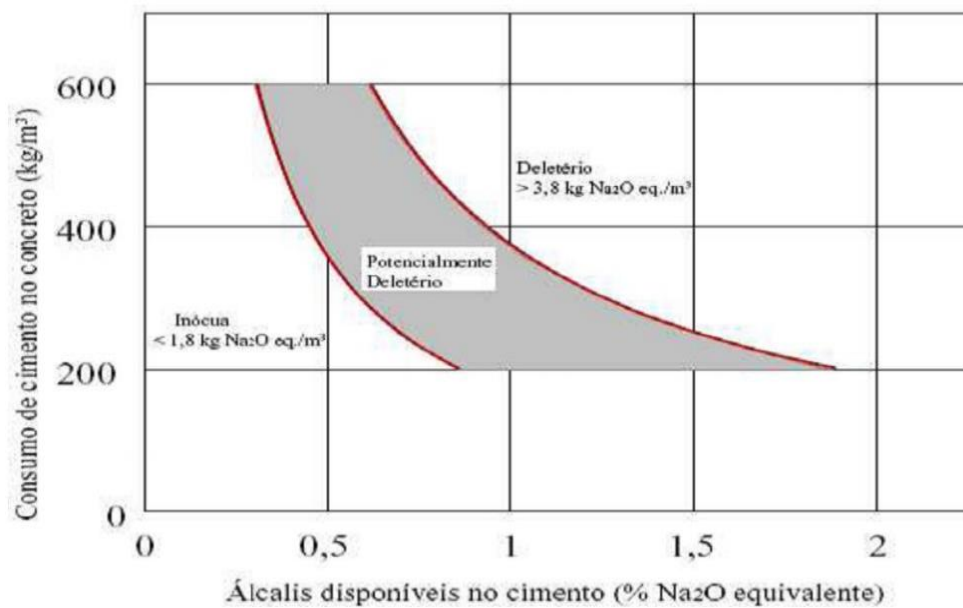


Figura 2- Relação entre quantidade de cimento no concreto, quantidade de álcalis no cimento e potencial resultante a RAA.

Fonte: Nogueira, K.A (2010).

## 4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica baseada na discretização do domínio em subdomínios de geometria simples, com o objetivo de resolver equações diferenciais parciais que descrevem fenômenos físicos. Em problemas de elasticidade, objetiva determinar o estado de tensão e de deformação de um sólido com uma geometria qualquer sujeito a ações exteriores (AZEVEDO, 2003). Para a resolução de problemas com este método, faz-se a divisão do contínuo em diversos subdomínios de dimensão finita, os quais são denominados elementos finitos, o que torna o meio contínuo em discreto, que diferencia a solução empregada no cálculo diferencial e integral, que emprega elementos infinitesimais.

Com relação a discretização no tempo, como a RAA se dá de forma lenta, usualmente considera-se quase-estática, ou seja, desconsidera-se o efeito da inércia na análise, fator adotado neste trabalho.

### 4.1 PRINCÍPIO DOS TRABALHOS VIRTUAIS

O P.T.V. (Princípio dos Trabalhos Virtuais) é a condição necessária para que uma partícula em equilíbrio apresente trabalho virtual nulo para todas as forças que nela atuarem independente de seu deslocamento virtual.

O princípio dos trabalhos virtuais ou princípio dos deslocamentos virtuais estabelece que o trabalho realizado pelas tensões internas na deformação virtual do corpo é igual ao trabalho realizado pelas forças exteriores nos deslocamentos virtuais dos seus pontos de aplicação. De um modo mais simplista é comum afirmar que o trabalho interno de deformação é igual ao trabalho externo das forças aplicadas.

$$\textit{Trabalho Interno} = \textit{Trabalho Externo} \quad (4)$$

AZEVEDO (2003) trata do P.T.V. considerando um corpo sujeito a um conjunto de forças de volume e de superfície que lhe provocam uma deformação. Com base no seu estado de equilíbrio estático, a configuração do corpo é modificada por um conjunto de deslocamentos muito pequenos e compatíveis com as condições de contorno, que se designam deslocamentos virtuais, conforme a equação (5).

$$\int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int_S \delta u^T p dS \quad (5)$$

em que  $\varepsilon$  são as deformações do corpo,  $\sigma$  são as tensões,  $u$  são os deslocamentos e  $p$  as forças aplicadas.

A primeira parcela representa a variação de energia de deformação referente ao processo virtual, e a segunda, após a igualdade, representa o trabalho das forças aplicadas na superfície do corpo relacionadas ao deslocamento virtual. Assim, o prefixo  $\delta$  indica que os deslocamentos ou deformações são virtuais.

Esta equação pode ser aproximada empregando-se o método de elementos finitos, que consiste na divisão do domínio em elementos definidos por seus nós. Considerando um sólido tridimensional, com geometria arbitrária, tendo três graus de liberdade de deslocamento e oito nós, conforme a Figura 3, o campo de deslocamento pode ser aproximado pela equação (6):

$$\underline{u} = N \underline{a} \quad (6)$$

em que  $\underline{u}$  é o campo de deslocamentos aproximado pelas funções de forma  $N$  relacionado ao deslocamento nodal  $\underline{a}$ . Em (7) são apresentados os vetores dos deslocamentos nodais ( $\underline{a}$ ) e das forças equivalentes das ações ( $\underline{F}$ ):

$$\underline{a} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ \vdots \\ a_{81} \\ a_{82} \\ a_{83} \end{bmatrix} \quad \underline{F} = \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \\ \vdots \\ F_{81} \\ F_{82} \\ F_{83} \end{bmatrix} \quad (7)$$

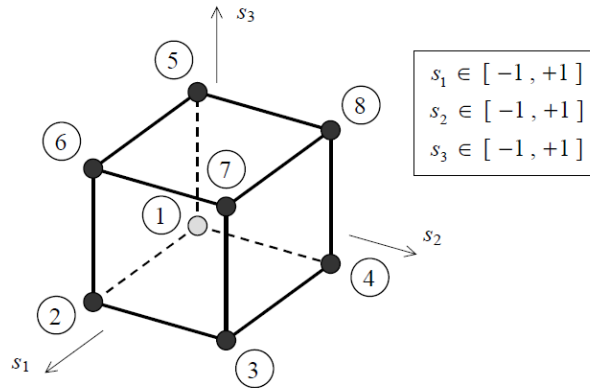


Figura 3 - Sistema de coordenadas locais

Fonte: AZEVEDO, (2003).

Escrito por meio das componentes, a interpolação do campo de deslocamentos (equação 6) fica sendo:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{81} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{82} \\ a_{13} & a_{23} & \dots & a_{83} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_8 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Não apenas o campo de deslocamentos pode ser aproximado pelas funções de forma, mas também as coordenadas do corpo em questão. Ou seja:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{81} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{82} \\ x_{13} & x_{23} & \dots & x_{83} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_8 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para realizar as operações algébricas necessárias, dentre elas a integração numérica, emprega-se uma substituição de variáveis, ou uma transformação de coordenadas para um espaço por vezes chamado de adimensional, em que, suprimindo-se o segundo índice:

$$\begin{aligned} x_1 &\rightarrow x_1(s_1, s_2, s_3) \\ x_2 &\rightarrow x_2(s_1, s_2, s_3) \\ x_3 &\rightarrow x_3(s_1, s_2, s_3) \end{aligned} \quad (10)$$

Os valores das coordenadas  $s_1$ ,  $s_2$ , e  $s_3$  são dados por (vide Figura 3):



$$\underline{s} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} \\ s_{71} & s_{72} & s_{73} \\ s_{81} & s_{82} & s_{83} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Uma vez que o elemento adotado é da família Lagrangeana, as funções de forma são as apresentadas em (11):

$$\begin{aligned} N_1(s_1, s_2, s_3) &= (1 - s_1)(1 - s_2)(1 - s_3)/8 \\ N_2(s_1, s_2, s_3) &= (1 + s_1)(1 - s_2)(1 - s_3)/8 \\ N_3(s_1, s_2, s_3) &= (1 + s_1)(1 + s_2)(1 - s_3)/8 \\ N_4(s_1, s_2, s_3) &= (1 - s_1)(1 + s_2)(1 - s_3)/8 \\ N_5(s_1, s_2, s_3) &= (1 - s_1)(1 - s_2)(1 + s_3)/8 \\ N_6(s_1, s_2, s_3) &= (1 + s_1)(1 - s_2)(1 + s_3)/8 \\ N_7(s_1, s_2, s_3) &= (1 + s_1)(1 + s_2)(1 + s_3)/8 \\ N_8(s_1, s_2, s_3) &= (1 - s_1)(1 + s_2)(1 + s_3)/8 \end{aligned} \quad (11)$$

Tendo definido o campo de deslocamentos, o campo de deformações para um ponto de um sólido é dado pela equação (12) (AZEVEDO, 2003):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

em que  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  são as deformações nas respectivas direções, e  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  e  $\gamma_3$  são as distorções em  $\gamma_{23}$ ,  $\gamma_{13}$  e  $\gamma_{12}$ , respectivamente, formando o vetor de deformações  $\varepsilon$ . Após a igualdade, define-se o operador  $L$ , sobre os deslocamentos  $\underline{u}$ . Ou ainda:

$$\varepsilon = L\underline{u} \quad (13)$$

Realizando a substituição de (6) em (13):

$$\varepsilon = LN \underline{a} \quad (14)$$

Adotando-se:

$$B = LN \quad (15)$$

A equação (15) escrita em função das componentes fica sendo:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix} \left[ \begin{array}{ccc|ccc|ccc} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_8 \end{array} \right] \quad (16)$$

Ou seja:

$$B = \left[ \begin{array}{ccc|ccc|ccc} \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x_2} & 0 & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x_3} & 0 & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x_3} & \frac{\partial N_2}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} \\ \frac{\partial N_1}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & \frac{\partial N_2}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x_1} & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} \\ \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x_2} & \frac{\partial N_2}{\partial x_1} & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} & \frac{\partial N_8}{\partial x_1} & 0 \end{array} \right] \quad (17)$$

As funções de formas estão escritas no espaço adimensional definido por ( $s_1$ ,  $s_2$ , e  $s_3$ ), enquanto que o operador diferencial  $L$  é escrito no espaço euclidiano. Pode-se relacioná-los da forma apresentada na equação (18):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x_1} & \frac{\partial N_1}{\partial x_2} & \frac{\partial N_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x_1} & \frac{\partial N_2}{\partial x_2} & \frac{\partial N_2}{\partial x_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial N_8}{\partial x_1} & \frac{\partial N_8}{\partial x_2} & \frac{\partial N_8}{\partial x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial s_1} & \frac{\partial N_1}{\partial s_2} & \frac{\partial N_1}{\partial s_3} \\ \frac{\partial N_2}{\partial s_1} & \frac{\partial N_2}{\partial s_2} & \frac{\partial N_2}{\partial s_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial N_8}{\partial s_1} & \frac{\partial N_8}{\partial s_2} & \frac{\partial N_8}{\partial s_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial s_1} & \frac{\partial x_1}{\partial s_2} & \frac{\partial x_1}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial s_1} & \frac{\partial x_2}{\partial s_2} & \frac{\partial x_2}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial s_1} & \frac{\partial x_3}{\partial s_2} & \frac{\partial x_3}{\partial s_3} \end{bmatrix}^{-1} \quad (18)$$

E, em notação matricial como na equação (19):

$$\frac{\partial N}{\partial x} = \frac{\partial N}{\partial s} J^{-1} \quad (19)$$

Onde  $J^{-1}$  é a inversa da matriz Jacobiana, que é a matriz formada pelas derivadas parciais de primeira ordem, que relaciona a mudança de variáveis. Em casos tridimensionais essa matriz é dada por:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial s_1} & \frac{\partial x_1}{\partial s_2} & \frac{\partial x_1}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial s_1} & \frac{\partial x_2}{\partial s_2} & \frac{\partial x_2}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial s_1} & \frac{\partial x_3}{\partial s_2} & \frac{\partial x_3}{\partial s_3} \end{bmatrix} \quad (20)$$

A matriz Jacobiana pode ser obtida a partir da matriz de coordenadas cartesianas, substituindo-se (19) em (20):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial s_1} & \frac{\partial x_1}{\partial s_2} & \frac{\partial x_1}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial s_1} & \frac{\partial x_2}{\partial s_2} & \frac{\partial x_2}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial s_1} & \frac{\partial x_3}{\partial s_2} & \frac{\partial x_3}{\partial s_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{81} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{82} \\ x_{13} & x_{23} & \dots & x_{83} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial s_1} & \frac{\partial N_1}{\partial s_2} & \frac{\partial N_1}{\partial s_3} \\ \frac{\partial N_2}{\partial s_1} & \frac{\partial N_2}{\partial s_2} & \frac{\partial N_2}{\partial s_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial N_8}{\partial s_1} & \frac{\partial N_8}{\partial s_2} & \frac{\partial N_8}{\partial s_3} \end{bmatrix} \quad (21)$$

De modo compacto:

$$J = x^T \frac{\partial N}{\partial s} \quad (22)$$

Tendo-se definido o campo de deslocamentos e deformações, quando o material é isotrópico, pode-se relacionar tensões e deformações como apresentado na equação (23):

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_2 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (23)$$

em que:

$$C_1 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$C_2 = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (24)$$

$$C_3 = \frac{E}{2(1+2\nu)}$$

O número de componentes de  $\sigma$  e  $\varepsilon$  é seis, podendo ser escrito como na equação (25):

$$\sigma = D\varepsilon \quad (25)$$

A matriz de elasticidade  $D$  depende do módulo de Young ou de Elasticidade ( $E$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Voltando-se ao P.T.V., considerando as aproximações realizadas pelas equações (14) e (15), a equação (5) pode ser reescrita na forma:

$$\int_V \delta u^T B^T \sigma dV = \int_S \delta u^T p dS \quad (26)$$

Considerando a decomposição aditiva do campo de deformações, dada por

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{RAA} \quad (27)$$

em que  $\varepsilon_e$  são as deformações elásticas, e  $\varepsilon_{RAA}$  são as deformações decorrentes da reação álcali-agregado, assim como a aproximação do vetor de forças  $p$  e a relação constitutiva linear dada na equação (21), a equação (22) fica sendo:

$$\int_V \delta u^T [B^T D B a + B^T D \varepsilon_{RAA}] dV = \int_S \delta u^T N^T p dS \quad (28)$$

Como os deslocamentos nodais não dependem das variáveis  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ ,  $\delta u^T$  e  $a$  podem passar para fora da integral.

$$\delta u^T \left[ \int_V B^T D B dV \right] a + \delta u^T \int_V B^T D \varepsilon_{RAA} dV = \delta u^T \int_S N^T p dS \quad (29)$$

Segundo o P.T.V., a equação (29) é válida para qualquer conjunto de deslocamentos virtuais, concluindo-se que:

$$\left[ \int_V B^T D B dV \right] a + \int_V B^T D \varepsilon_{RAA} dV = \int_S N^T p dS \quad (30)$$

Chama-se a primeira parcela de matriz de rigidez  $K$ , a segunda pode ser vista como uma força de corpo, atuando no volume, decorrente da expansão promovida pela reação álcali-agregado ( $F_{RAA}$ ), e a última são as forças aplicadas no contorno do corpo ( $F_E$ ).

De forma resumida:

$$K = \int_V B^T D B dV \quad (31)$$

$$F_{RAA} = \int_V B^T D \varepsilon_{RAA} dV \quad (32)$$

$$F_E = \int_S N^T p dS \quad (33)$$

Após substituição de variáveis, obtém-se:

$$K = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} B^T D B J ds_1 ds_2 ds_3 \quad (34)$$

$$F_{RAA} = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} B^T D \varepsilon_{RAA} J ds_1 ds_2 ds_3 \quad (35)$$

$$F_{RAA} = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} N^T p ds_a ds_b \quad (36)$$

Levando ao sistema de equações:

$$Ka = F_E - F_{RAA} \quad (37)$$

em que  $a$  é o vetor de deslocamentos nodais a ser determinado, única incógnita do sistema.

## 5 MODELAGEM NUMÉRICA DA RAA

Para realizar a modelagem numérica foi utilizado um modelo paramétrico que se resume na distribuição espacial dos fatores que influenciam a reação álcali-agregado, normalizando-os, para que se aplique uma equação constitutiva de modo a obter a taxa de expansão volumétrica devido à RAA onde evidencia-se a influência da umidade, temperatura, tensões e reatividade dos materiais na taxa de expansão da mesma. Maiores detalhes podem ser obtidos em Carrazedo (2004).

Os dados obtidos pelo monitoramento da estrutura são comparados aos resultados obtidos pelo modelo paramétrico, servindo assim como base para calibrar as variáveis em um processo de otimização, que neste trabalho não foi empregado.

Não obstante, neste processo, ocorre a alteração das variáveis tornando possível uma nova distribuição dessas expansões. Finaliza-se este ciclo quando a comparação entre os resultados da análise numérica e os dados de monitoramento estiver dentro de limites aceitáveis.

### 5.1 FATORES DE INFLUÊNCIA E NORMALIZAÇÃO

Consideram-se fatores de influência preponderantes: a umidade, a temperatura, o estado de tensões, a reatividade dos minerais e a quantidade de íons alcalinos disponíveis, os quais são utilizados na modelagem da expansão. Esses fatores agem de maneira distinta ao influenciar a RAA.

Relativo aos materiais constituintes e sua reatividade, em alguns casos onde se utilizam diferentes fontes de obtenção dos agregados, como na construção de obras de grande porte, podem ser encontrados agregados reativos. Em contrapartida também são utilizados agregados não reativos, o que origina uma distribuição não uniforme e possibilita a ocorrência de locais onde há maior concentração de agregados reativos. Em

geral simplifica-se esta distribuição com duas constantes de reatividade dos constituintes. A primeira constante do material tem como função definir a máxima deformação volumétrica que o concreto pode ter e a segunda constante tem como função definir a velocidade com que as deformações vão ocorrer.

A temperatura modifica a velocidade com que o gel é gerado e afeta assim a velocidade que a estrutura se expande, não influenciando na expansão final do material. No caso da umidade, ela é preponderante, pois sem ela não ocorre a formação de gel. Na metodologia determinam-se dois campos, da própria umidade e da porosidade.

Quanto ao estado de tensões, primeiramente realiza-se uma análise sem considerar as deformações causadas pela RAA, sob as ações previstas em projeto ou observadas na estrutura real. Em seguida são acrescentadas as deformações devido à RAA sobre esta análise (que geram pressões internas e tensões confinantes quando restringidas), fazendo com que o modelo mecânico necessite ser recalculado.

Na sequência da determinação dos campos de influência normaliza-se os mesmos em fatores de influência através de leis lineares, que podem ser visualizadas na figura 4, que são regidas por valores de calibração  $k_p$ ,  $k_c$ ,  $k_m$ ,  $k_t$  (porosidade, confinamento, umidade e temperatura, respectivamente). Cada fator de influência possui uma lei de conversão que rege seu papel na expansão.

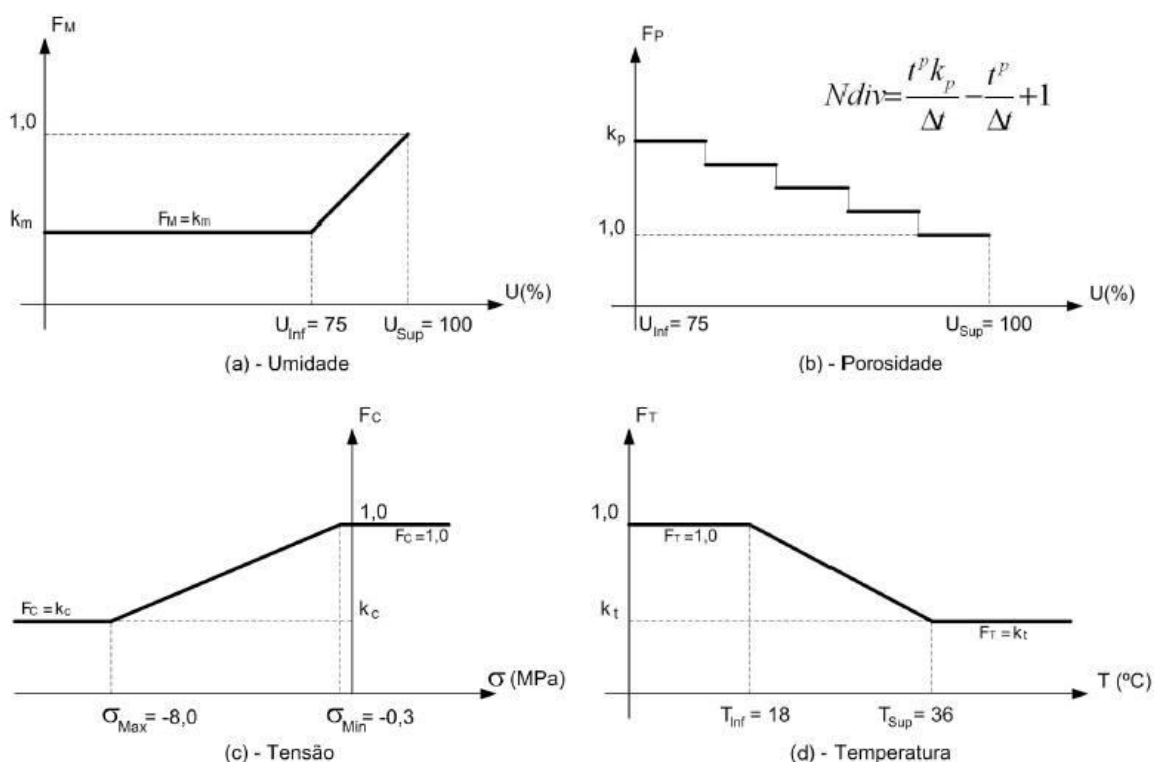


Figura 4- Fatores de influência ( $F_M$ ,  $F_P$ ,  $F_C$ ,  $F_T$ ) e calibração ( $k_p$ ,  $k_c$ ,  $k_m$ ,  $k_t$ ).

Fonte: (a), (c) e (d) Leger et. al (1996); (b) Carrazedo (2004).

## 5.2 EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DA RAA

Uma equação exponencial capaz de representar as características básicas da expansão decorrente da RAA foi proposta por Carrazedo (2004), equação (38), baseada nas equações apresentadas por Pietruszczak (1996) e Pappalardo Jr (1999).

$$\dot{\epsilon}_{RAA} = H(t - t^p F_p) \frac{\epsilon_{vol}^{max} A_1 F_T}{(A_1 F_T + t - t^p F_p)^2 \sqrt{F_C F_M}} \quad (38)$$

em que H é a função Heaviside,  $\epsilon_{vol}^{max}$  é o valor assintótico de deformação volumétrica livre por RAA,  $A_1$  é o índice de reatividade,  $F_T, F_p, F_C, F_M$  são os fatores normalizados de influência devido à temperatura, porosidade, tensões e umidade, respectivamente, e  $t^p$  é a idade em que ocorreu o preenchimento dos poros do concreto pelo gel, formado pela reação.

## 5.3 IMPLEMENTAÇÃO

Para o desenvolvimento do aplicativo para a modelagem de estruturas de concreto sujeitas à RAA, objetivo deste trabalho, empregou-se a linguagem computacional *Fortran*. Esta, derivada do inglês, Formula Translating System, é de uso geral, uma linguagem de programação imperativa que é especialmente adequada para computação numérica e computação científica.

Originalmente, desenvolvido pela IBM em Nova Iorque, em 1950 para aplicações científicas e de engenharia, o Fortran passou a dominar a área de programação desde o início e tem apresentado uso contínuo por mais de meio século nas áreas de computação intensiva, como a previsão numérica de tempo, análise de elementos finitos, dinâmica de fluidos computacional, física computacional e química computacional (GAELZER, 2012).

Fortran engloba uma linhagem de versões, cada uma das quais evoluíram para adicionar extensões à linguagem, geralmente mantendo a compatibilidade com versões anteriores. No presente trabalho foi utilizada a versão de Fortran 90. Na sequência é apresentada uma das rotinas programadas no aplicativo desenvolvido.



```

*****
!
! ROTINA:      MatrizRigElement
!
! PROPÓSITO:  Calculo da matriz de rigidez elementar para a solução do
!problema de RAA, através do cálculo das funções de forma, da matriz
!constitutiva e de deformação, bem como o cálculo do Jacobiano
! para a mudança de variáveis na resolução da integral tripla.
!
*****
subroutine MatrizRigElement

! Não permite a existência de variáveis não-declaradas
implicit none

! Variáveis Locais
integer :: i, j, k, l, m, n, iGauss
real*8  :: dbAux, dbWg, dbXsi(3), dbDetJacob, dbJacob(3,3), dbInvJacob(3,3)
real*8  :: dbPsi(iNoEl), dbDPsiDXsi(iNoEl,3), dbDPsiDX(iNoEl,3), dbB(6,24),
dbD(6,6), dbCdEl(iNoEl,3)

! Loop nos elementos
do i = 1,iEl

    ! Coordenadas dos nós do elemento
    do j = 1,iNoElm(i)
        do k = 1,3
            dbCdEl(j,k) = dbPos(iInc(i,j),k)
        end do
    end do

    ! Gera a matriz D (de rigidez do elemento)
    dbD = 0.
    dbAux = dbYoung(iMat(i))/(1.+dbNu(iMat(i)))
    dbD(1,1) = dbAux * (1.-dbNu(iMat(i)))/(1.-2*dbNu(iMat(i)))
    dbD(2,2) = dbD(1,1)
    dbD(3,3) = dbD(1,1)

    dbD(1,2) = dbAux * dbNu(iMat(i)) / (1.-2*dbNu(iMat(i)))
    dbD(1,3) = dbD(1,2)
    dbD(2,1) = dbD(1,2)
    dbD(2,3) = dbD(1,2)
    dbD(3,1) = dbD(1,2)
    dbD(3,2) = dbD(1,2)

    dbD(4,4) = dbAux/ 2.
    dbD(5,5) = dbD(4,4)
    dbD(6,6) = dbD(4,4)

    ! Será adotado o mesmo número de pontos de Gauss que nós do elemento
    iGauss = iNoElm(i)

    ! Loop nos pontos de Gauss
    do j = 1,iGauss

        ! Aquisição das coordenadas e pesos de Gauss
        call PtoGauss_8(j, dbWg, dbXsi)

        ! Conhecido os pontos de Gauss
        ! chama rotina para gerar as funções de forma e derivadas
        call formaederivada(dbXsi, dbDPsiDXsi, dbPsi)
    end do
end do

```

```

! chama rotina para calcular o jacobiano da transformação
! dbJacob - matriz jacobiana (dX/dPhi)
! dbDetJacob - determinante da matriz jacobiana
! dbInvJacob - inversa da jacobiana (dPhi/dX)
call jacobiano(i, dbDPsiDXsi, dbCdEl, dbDetJacob, dbJacob, dbInvJacob)

! Agora preciso calcular a derivada em função de X
dbDPsiDX = 0.

do k = 1, iNoElm(i)
  do l = 1, 3
    do m = 1, 3
      dbDPsiDX(k, l) = dbDPsiDX(k, l) + dbDPsiDXsi(k, m) * dbInvJacob(m, l)
    end do
  end do
end do

! Gera a matriz B a partir de dPsi/dX
dbB = 0.

do k = 1, iNoElm(i)
  dbB(1, k*3-2) = dbDPsiDX(k, 1)
  dbB(2, k*3-1) = dbDPsiDX(k, 2)
  dbB(3, k*3 ) = dbDPsiDX(k, 3)
  dbB(4, k*3-1) = dbDPsiDX(k, 3)
  dbB(4, k*3 ) = dbDPsiDX(k, 2)
  dbB(5, k*3-2) = dbDPsiDX(k, 3)
  dbB(5, k*3 ) = dbDPsiDX(k, 1)
  dbB(6, k*3-2) = dbDPsiDX(k, 2)
  dbB(6, k*3-1) = dbDPsiDX(k, 1)
end do

! Calcula dbKel = Bt.D.B.J.Wi
do k = 1, iNoElm(i)*3
  do l = 1, iNoElm(i)*3
    do m = 1, 6
      do n = 1, 6
        dbKEl(i, k, l) = dbKEl(i, k, l) + dbB(m, k) * dbD(m, n) * dbB(n, l) *
dbDetJacob * dbWg
      end do
    end do
  end do
end do
end do! Loop de Gauss
end do! Loop de Elementos

return

end subroutine MatrizRigElement

```

Para o cálculo da matriz de rigidez elementar utilizou-se as equações do item 4, bem como a sequência de cálculo apresentada.

Na parte principal do programa, é feita a chamada da subrotina apresentada. Primeiramente, dá-se o comando “*subroutine*”, indicando que é uma subrotina do programa principal RAA, que será usada à partir do comando de chamada “*call*”. Então o

comando “*USE*” inclui a biblioteca chamada “*VARIAVEIS*” que contém as variáveis globais, faz a alocação e define o tipo destas variáveis (inteiro, caracter, real, lógica).

Com o comando “*implicit none*” impede-se a existência de variáveis que não foram declaradas. Na sequência com o comando “*include*” incluiu-se o arquivo em que os blocos de variáveis globais foram registrados. Então faz-se a declaração das variáveis locais que serão utilizadas nesta rotina e sua devida alocação.

Faz-se então três loops com o comando “*do*” para o cálculo da matriz das coordenadas dos nós dos elementos. Para gerar a matriz constitutiva  $dbD$  (de rigidez do elemento) deve-se primeiramente zerar a matriz, para que não ocorra a acumulação de valores residuais na matriz. Então, calcula-se a variável auxiliar  $dbAux$  com os valores inseridos na entrada de dados do programa e faz-se o cálculo dos elementos da matriz que diferem de zero, sendo esta matriz a mesma que foi apresentada anteriormente na equação (23).

Adota-se o número de Gauss igual ao número de nós do elemento, e faz-se então a chamada das subrotinas: “*PtoGauss*” - que especifica os pesos e pontos de Gauss usados para realizar a integração numérica, “*formaederivada*” - onde as funções de forma são geradas e “*jacobiano*” - que calcula o jacobiano da transformação de um espaço para outro.

Zera-se a matriz  $dbDPsiDx$  que é a matriz que representa a transformação da substituição da variável “*s*” existente nas funções de forma pela variável “*x*”, que se dá através do cálculo da equação (19), realizado na subrotina em questão com três loops de comandos “*do*”, para que se possam calcular as derivadas das funções de forma em função de “*x*”. Essa transformação é necessária pra que possa integrar as funções de forma em um domínio conhecido, “*x*”.

A próxima matriz a ser calculada é a  $dbB$ , que é a matriz de deformação, é inicialmente zerada, então é feito um loop que vai de 1 a 8 (número de nós do elemento), calculando-se os elementos da matriz com as equações montadas para gerar a matriz  $dbB$ , que é igual a da equação (17).

Para o cálculo da matriz  $dbKEI$ , que é a matriz de rigidez elementar dos elementos, foram empregados quatro loops de comando “*do*”. Efetua-se o cálculo da equação (15) através da multiplicação dos elementos que a compõem e que foram anteriormente calculados ( $dbB$ ,  $dbD$ ,  $dbB$ (transposta),  $dbDetJacob$  e  $dbWg$ ).

## 6 RESULTADOS

### 6.1 VALIDAÇÃO

Visando a certificação de que o aplicativo desenvolvido atende as necessidades e objetivos deste trabalho foi realizado um teste de validação simples, para verificar se o programa estava apresentando corretamente os valores e dados referente à malha do elemento em estudo, elaborada através da aplicação do método de elementos finitos (MEF). São expostas a seguir figuras que representam este processo para diferentes exemplos.

Os cálculos realizados foram posteriormente conferidos com os valores obtidos analiticamente para fins de verificação, utilizando-se as equações (39) e (40).

$$U_z = \frac{F \times L_z}{A \times E} \quad (39)$$

$$U_y = - \frac{\nu \times F \times L_y}{A \times E} \quad (40)$$

em que  $U_z$  é o deslocamento no eixo “z”;  $U_y$  é o deslocamento no eixo “y”;  $F$  é a força aplicada;  $L_i$  é o comprimento do corpo de prova na direção “i”;  $A$  é a área onde está sendo aplicada a força;  $\nu$  é o coeficiente de Poisson; e  $E$  é o módulo de elasticidade.

Utilizaram-se malhas simples para validar o programa, geradas através do programa de simulação para engenharia, ANSYS®.

A variação entre os resultados fornecidos pelo programa desenvolvido RAA,  $u_a$ , com os obtidos analiticamente e utilizando-se o programa ANSYS®,  $u_b$  foi avaliada pela norma, equação (41).

$$er = \sqrt{|u_a^2 - u_b^2|} \times 100 \quad (41)$$

Ressalta-se que, como a RAA se dá de forma lenta, foi considerada discretização temporal quase-estática, ou seja, desconsidera-se o efeito da inércia na análise.

### 6.1.1 Malha regular e Poisson nulo

Para o primeiro teste realizado utilizou-se um corpo de prova prismático de dimensões 7,5 x 7,5 x 30 centímetros, discretizado por 500 elementos hexaédricos de 8 nós, resultando em 756 nós, restringido na base quanto ao deslocamento vertical. Este foi submetido a uma força de compressão de 50.000 kN, distribuída sobre a face superior, com coeficiente de Poisson igual a zero e módulo de elasticidade de  $29 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup>. É interessante observar que essa quantidade de nós foi determinada levando-se em consideração a limitação do programa de pós-processamento, o GID 11.0.8, não do aplicativo desenvolvido. O modelo da malha é apresentado na figura 5.

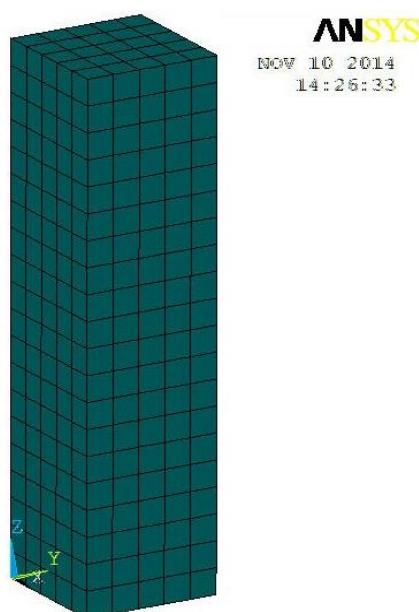


Figura 5- Modelo tridimensional do corpo de prova, em elementos finitos sólidos cúbicos.

Fonte: Autoria própria utilizando-se o programa ANSYS®.

Com os valores referentes ao corpo de prova apresentado na figura 5, empregando-se a equação (39) é possível calcular o deslocamento em “z”, que neste caso é de 0,091954 m. Comparando-se esse resultado com o obtido pelo programa desenvolvido, RAA, 0,091954 m, figura 7, observa-se a plena concordância. O mesmo pode ser observado ao se comparar os resultados do programa RAA com os obtidos utilizando-se o ANSYS®, 0,091954 m, figura 6.

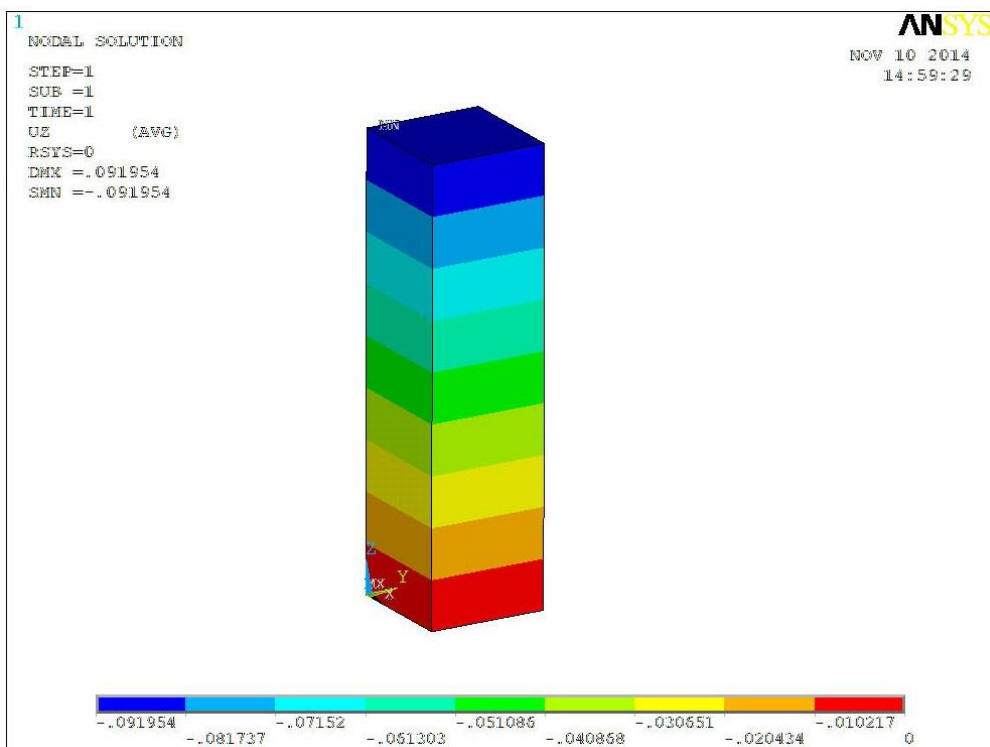


Figura 6- Corpo de prova com deslocamento em Z - ANSYS®.

Fonte: Autoria própria utilizando-se o programa ANSYS®.

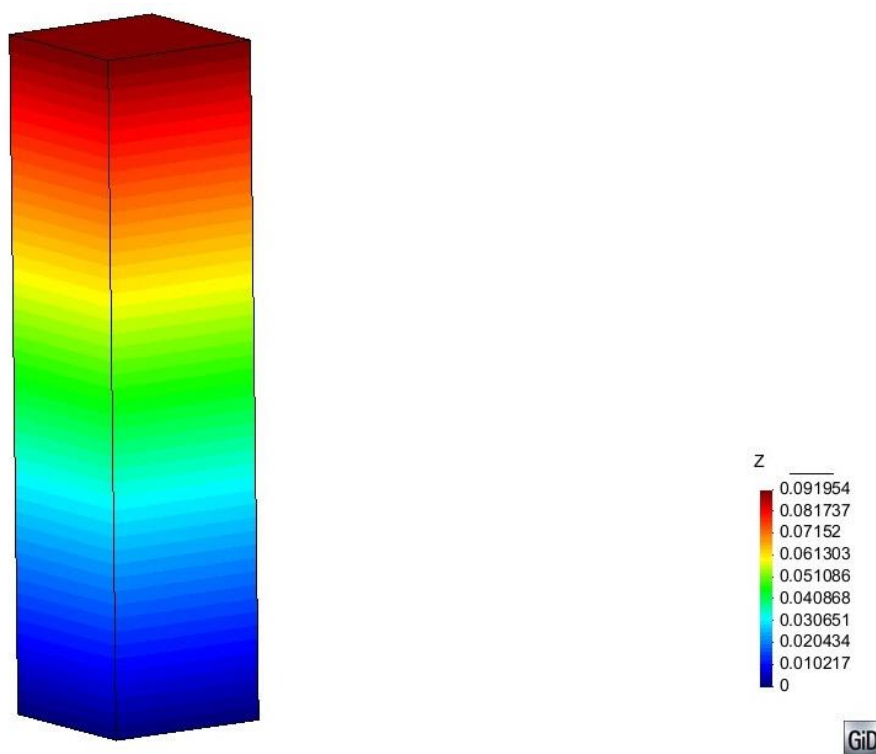


Figura 7- Corpo de prova com deslocamento em Z – Programa RAA.

Fonte: Autoria própria utilizando o programa GiD.

### 6.1.2 Malha regular e Poisson igual a 0,2

Neste teste de validação, foi empregada a mesma malha que o teste anterior, porém, foi adotado coeficiente de Poisson igual a 0,2 e módulo de elasticidade de  $20 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup>.

Para este corpo de prova o valor de deslocamento em “z”, calculado utilizando a equação (39), é de 0,13333 m, que, como pode-se observar é próximo ao valor de deslocamento obtido pelo programa desenvolvido (RAA), que é de 0,13321 m, figura 9, variando em 0,573%.

Ao se comparar o resultado do programa RAA com o do ANSYS®, figura 8, que é de 0,133237 m, observa-se uma variação ainda menor, nesse caso de 0,268%.

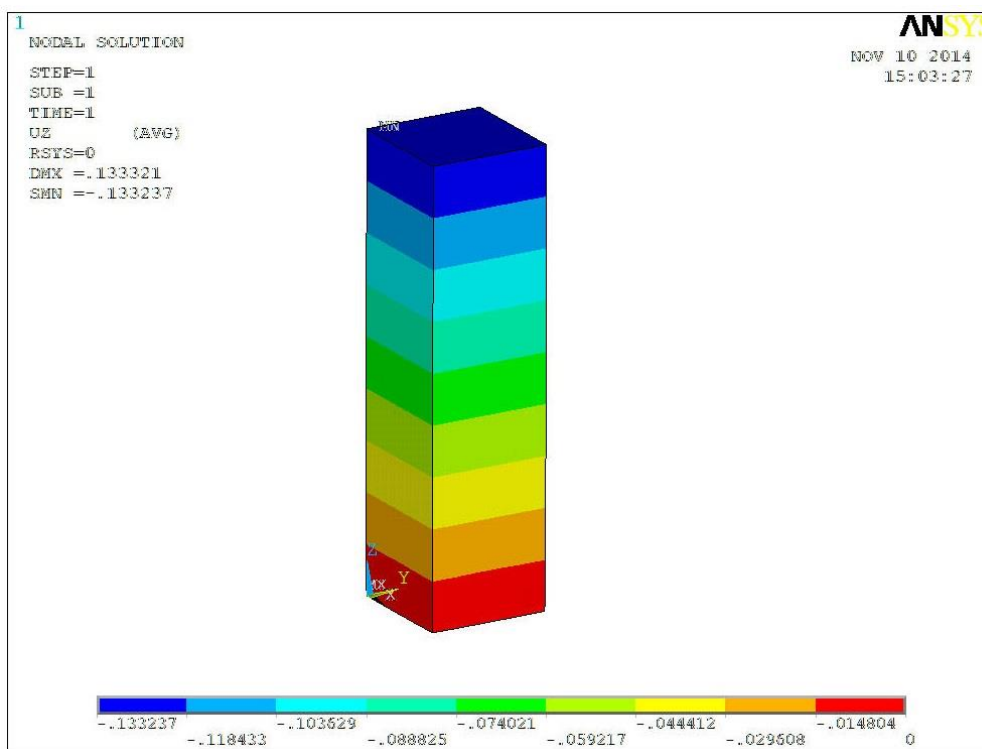


Figura 8- Deslocamento em Z - ANSYS®.

Fonte: Autoria própria utilizando-se o programa ANSYS®.

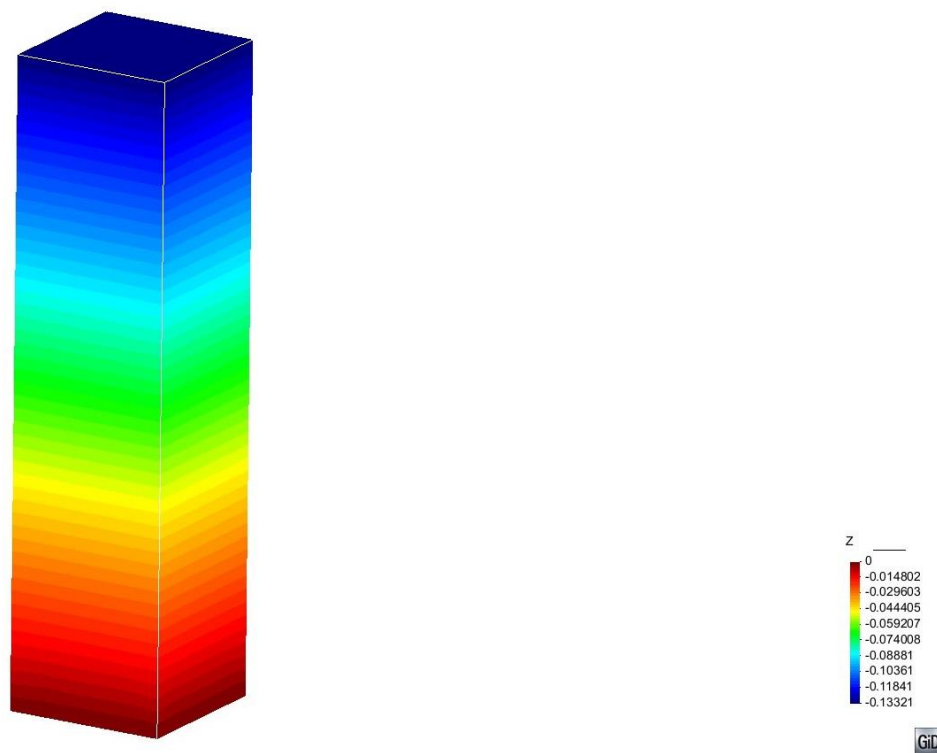


Figura 9- Deslocamento em Z – Programa RAA.

Fonte: Autoria própria utilizando o programa *GID*.

Já o deslocamento na direção “y”, obtido com o programa RAA, - 0,006892 m, figura 11, varia de 0,175% em relação ao calculado a partir da equação (40), que é de -0,006667 m, e em 0,245%, do resultado obtido pelo ANSYS®, figura 10, -0,007316 m.



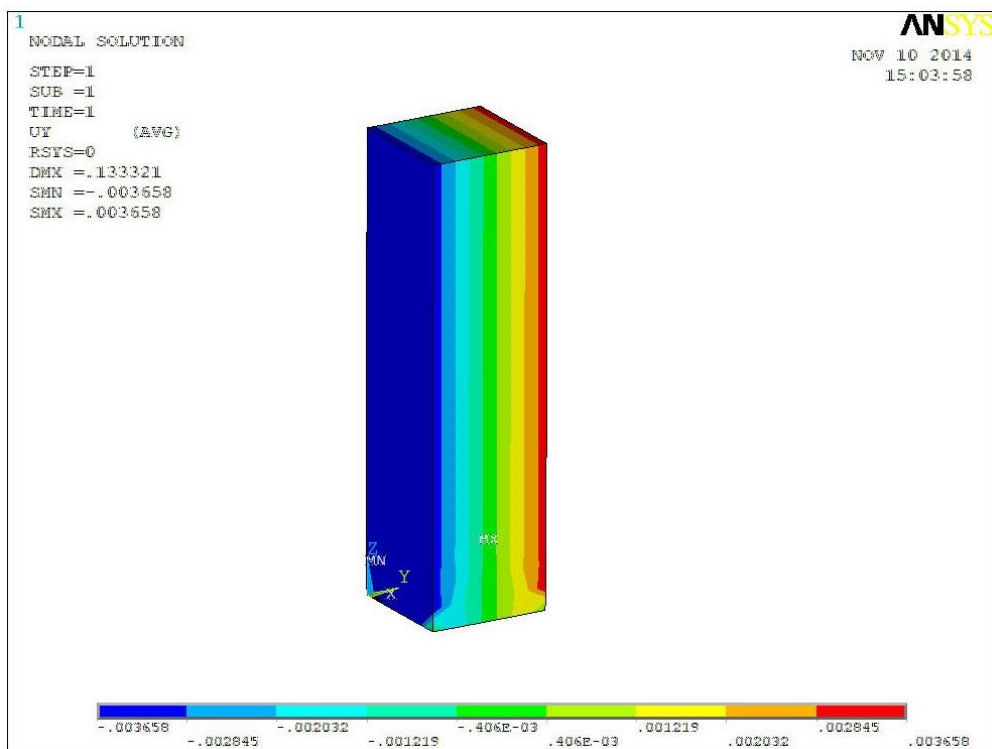


Figura 10- Deslocamento em Y - ANSYS®.

Fonte: Autoria própria utilizando-se o programa ANSYS®.

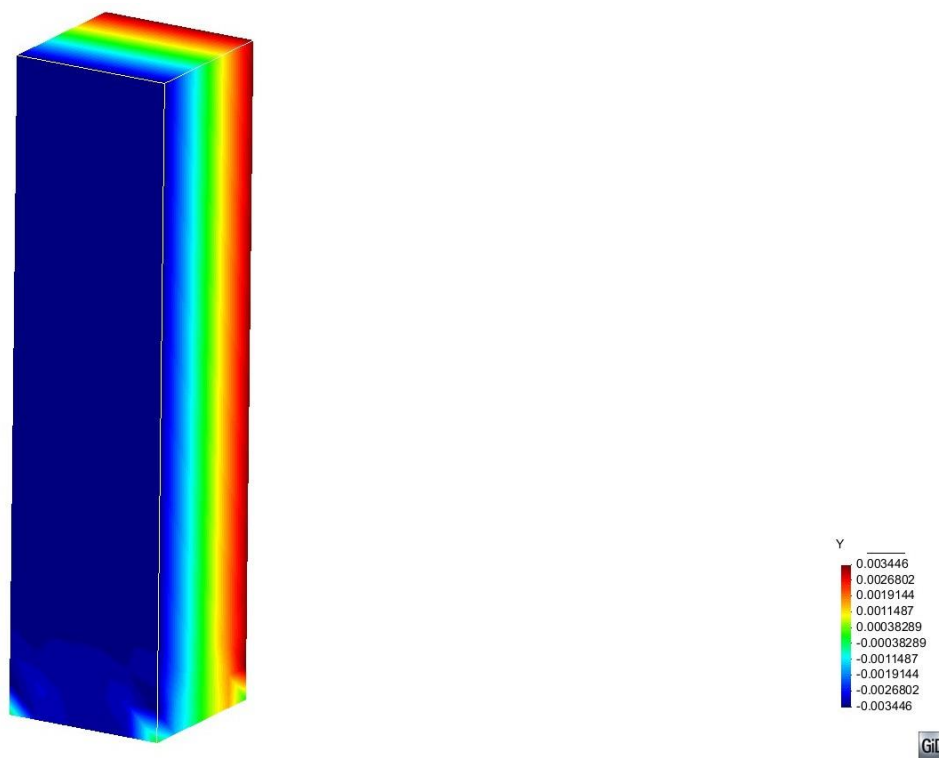


Figura 11- Deslocamento em Y – Programa RAA.

Fonte: Autoria própria utilizando o programa GID.

### 6.1.3 Malha Distorcida

Para o terceiro teste de validação foram empregados apenas 200 elementos, 378 nós e a malha distorcida, figura 12. A força de compressão adotada agora é de 20.000 kN, com coeficiente de Poisson igual a 0,2 e módulo de elasticidade de  $20 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup>.

Empregando o programa RAA para calcular o deslocamento em “z”, obtém-se um valor de 0,053265 m, demonstrado na figura 14. Comparando-se esse resultado com o fornecido pela equação (39), 0,053333 m, nota-se uma variação de 0,269%. E, ao compará-lo com o valor obtido utilizando-se o ANSYS®, 0,053278 m, figura 13, tem-se uma variação de 0,118%.



Figura 12- Malha distorcida, com carregamento e restrição de apoio.

Fonte: Autoria própria utilizando-se o ANSYS®.

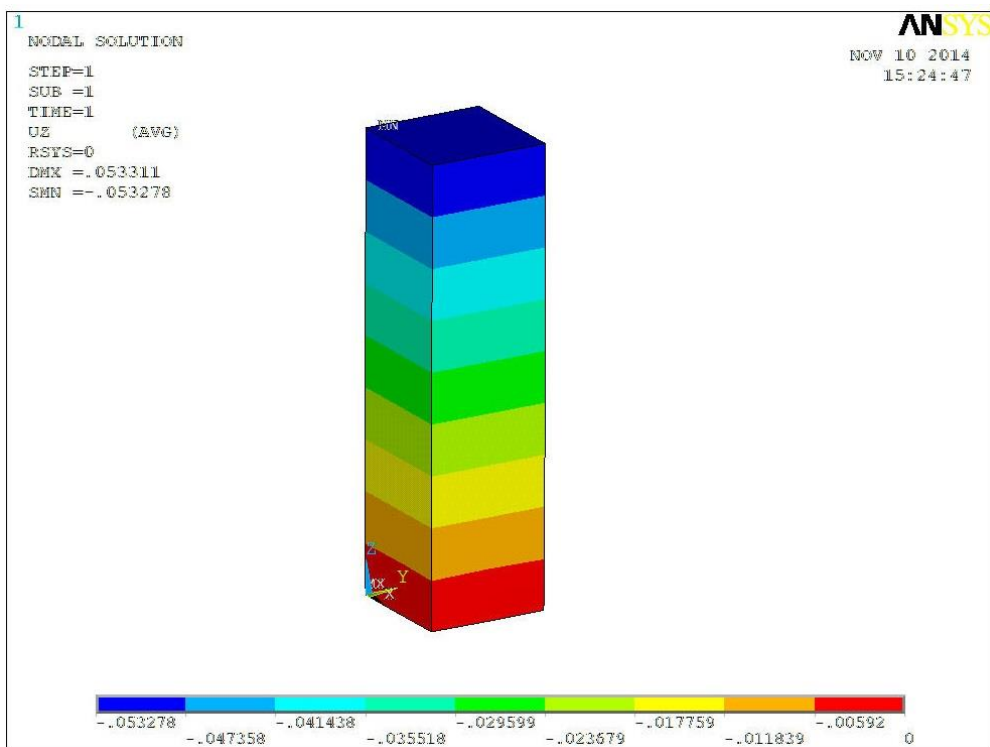


Figura 13- Deslocamento em Z em malha distorcida - ANSYS®.

Fonte: Autoria própria utilizando-se o programa ANSYS®.

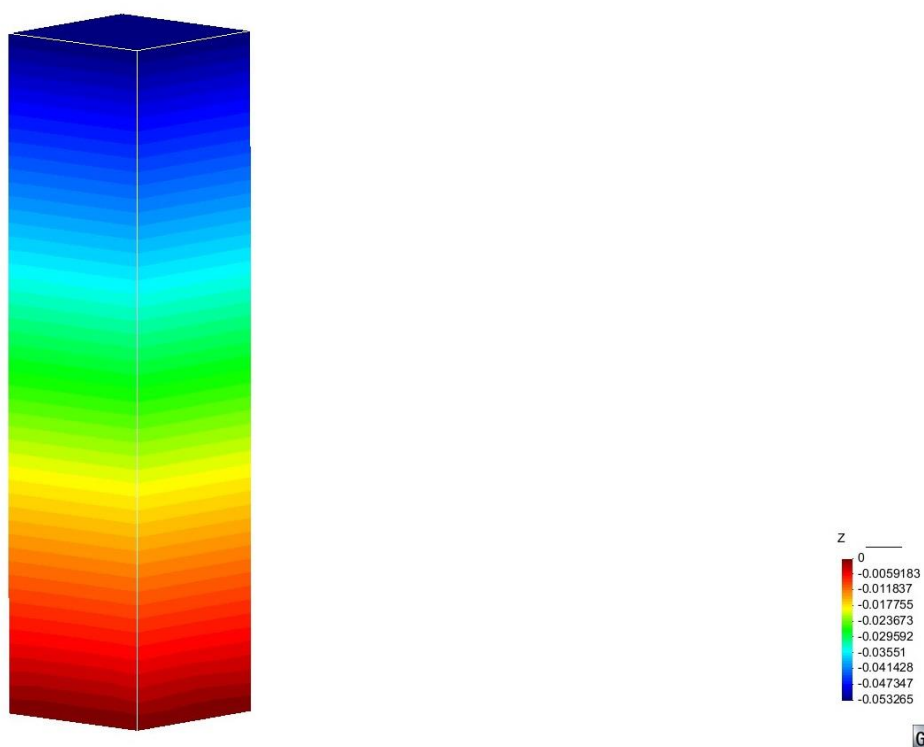


Figura 14- Deslocamento em Z – Programa RAA.

Fonte: Autoria própria utilizando o programa GID.

Quanto ao deslocamento em “y”, fornecido pelo programa RAA, 0,002672 m, apresentado na figura 16, e o calculado através da equação (40) que é de 0,002667 m, observa-se uma diferença de 0,016%. Em relação ao resultado do ANSYS®, 0,00270 m, figura 15, a variação é de 0,042%.

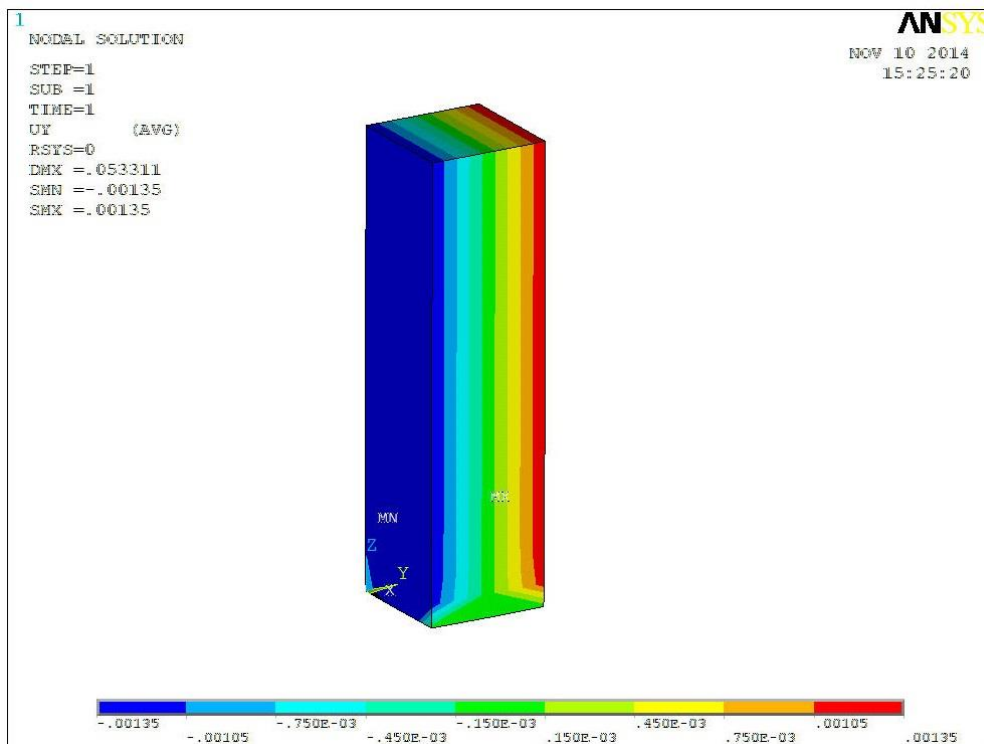


Figura 15- Deslocamento em Y com malha distorcida - ANSYS®.

Fonte: Autoria própria utilizando-se o programa ANSYS®.

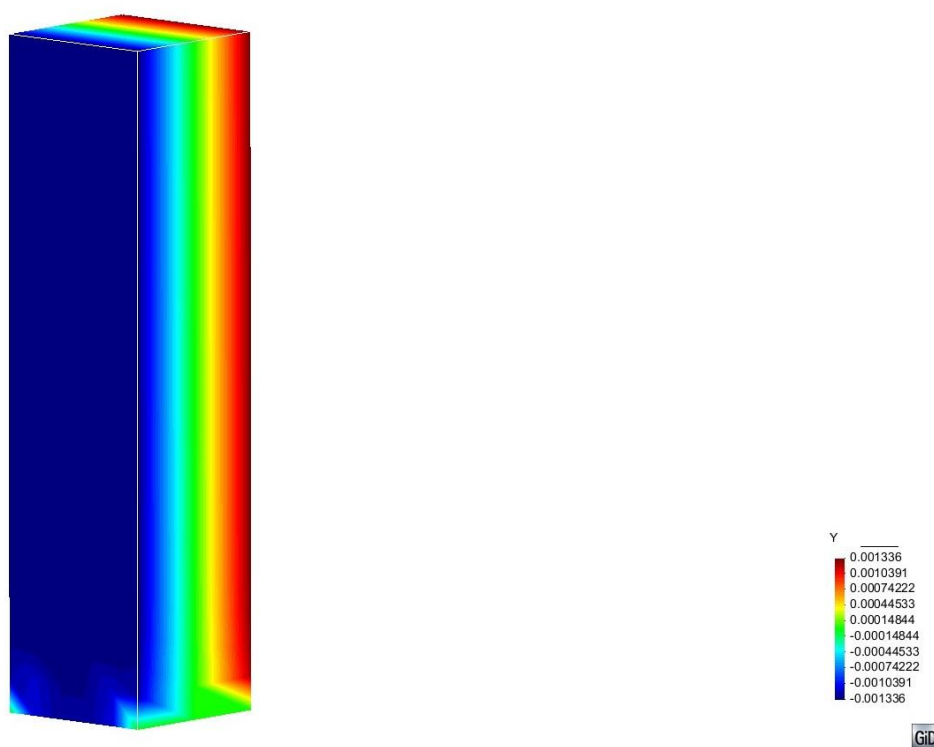


Figura 16– Deslocamento em Y – Programa RAA.

Fonte: Autoria própria utilizando o programa *GID*.

#### 6.1.4 Resumos dos resultados da validação.

Para melhor visualização dos resultados obtidos com a validação do programa organizou-se a tabela 2, com os valores dos deslocamentos referentes as direções “z” e “y”, e a tabela 3 com a porcentagem da variação dos valores obtidos para o programa RAA com os valores analíticos e do ANSYS®.

Tabela 2 – Deslocamentos das malhas analisadas.

	Malha regular e Poisson nulo.	Malha regular e Poisson 0,2.	Malha distorcida e Poisson 0,2.
Deslocamento “z”- RAA. (m)	0,091954	0,13321	0,053265
Deslocamento “y”- RAA. (m)	0	-0,006892	0,002672
Deslocamento “z”- Analítico. (m)	0,091954	0,13333	0,053333
Deslocamento “y”- Analítico. (m)	0	-0,006667	0,002667

Deslocamento “z”- Ansys. (m)	0,091954	0,133237	0,053278
Deslocamento “y”- Ansys. (m)	0	-0,007316	0,00270

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Norma da variação dos resultados.

	Norma da Variação do resultado em “z”- RAA e Analítico. (%)	Norma da Variação do resultado em “z”- RAA e Ansys. (%)	Norma da Variação do resultado em “y”- RAA e Analítico. (%)	Norma da Variação do resultado em “y”- RAA e Ansys. (%)
Malha regular e Poisson nulo.	0	0	0	0
Malha regular e Poisson 0,2.	0,573	0,268	0,175	0,245
Malha distorcida e Poisson 0,2.	0,269	0,118	0,016	0,042

Fonte: Autoria própria.

## 6.2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Para demonstrar o funcionamento do aplicativo considerando-se a reação álcali-agregado, analisou-se um corpo de prova prismático de dimensões 7,5 x 7,5 x 30 centímetros. Os resultados obtidos com o aplicativo desenvolvido foram comparados aos resultados numéricos de Carrazedo (2004) e aos resultados experimentais de Boddy, Hooton e Thomas (2000).

Para representar o corpo de prova citado anteriormente, utilizou-se o mesmo modelo tridimensional de elementos finitos, de 500 elementos sólidos cúbicos de 8 nós, empregado no primeiro teste de validação, figura 6. Essa quantidade de nós foi determinada levando-se em consideração também a limitação do programa de pós-processamento dos dados do aplicativo desenvolvido, o GID 11.0.8.

O comportamento do concreto foi considerado elástico-linear, desconsiderando seus fenômenos não-lineares como fluência, relaxação e fissuração, bem como as alterações nas propriedades físicas com o desenvolvimento da reação. Foi adotado módulo de elasticidade igual a  $20 \times 10^6$  kN/m<sup>2</sup> e o coeficiente de Poisson 0,2.

Os fatores de influência na RAA como temperatura, porosidade e umidade foram considerados constantes e com os mesmos valores empregados no estudo laboratorial, ou seja, sujeito a uma temperatura de 38°C, umidade relativa de 100% e sem restrições de deslocamento.

Adotaram-se valores constantes para estes parâmetros pois não era objetivo a implementação destes, devido ao prazo limitado para o desenvolvimento do trabalho, destacando-se que estas variáveis podem ser implementadas em trabalhos para continuidade da pesquisa. As propriedades dos materiais e parâmetros de reatividade inseridos no arquivo foram os mesmos adotados por Carrazedo (2004), e apresentados na Tabela 2.

Tabela 4 - Propriedades dos materiais e parâmetros de reatividade.

<b>Propriedades do material</b>	Material	1
	Young	20000000kN/m <sup>2</sup>
	Poisson	0,20
	Densidade	24
	Material	1
<b>Parâmetros de reatividade</b>	$e_{max}$	0,001737
	A <sub>1</sub>	250,989 dias
	t <sup>P</sup>	52 dias
	k <sub>c</sub> , k <sub>m</sub> e k <sub>p</sub> *	1,00
	k <sub>t</sub> *	0,2

\* Nota: Manteve-se constante e unitárias as variáveis k<sub>c</sub>, k<sub>m</sub> e k<sub>p</sub>, e manteve-se também constante a variável k<sub>t</sub> com o valor de 0,2.

FONTE: Modificado de Carrazedo, 2004.

Os resultados alcançados foram pós processados no *software* GID, para melhor análise e compreensão das expansões e deslocamentos causados pela RAA em um corpo de prova como descrito anteriormente.

A figura 17 representa o corpo de prova pós processado, em diferentes passos de tempo, em que observa-se seu deslocamento na direção Z. Pode-se notar que no primeiro passo de tempo não existe deslocamento, pois o corpo de prova não está sob ação de

carregamento. Nos passos de tempo seguintes é possível observar o aumento do deslocamento conforme ocorre o avanço do tempo.

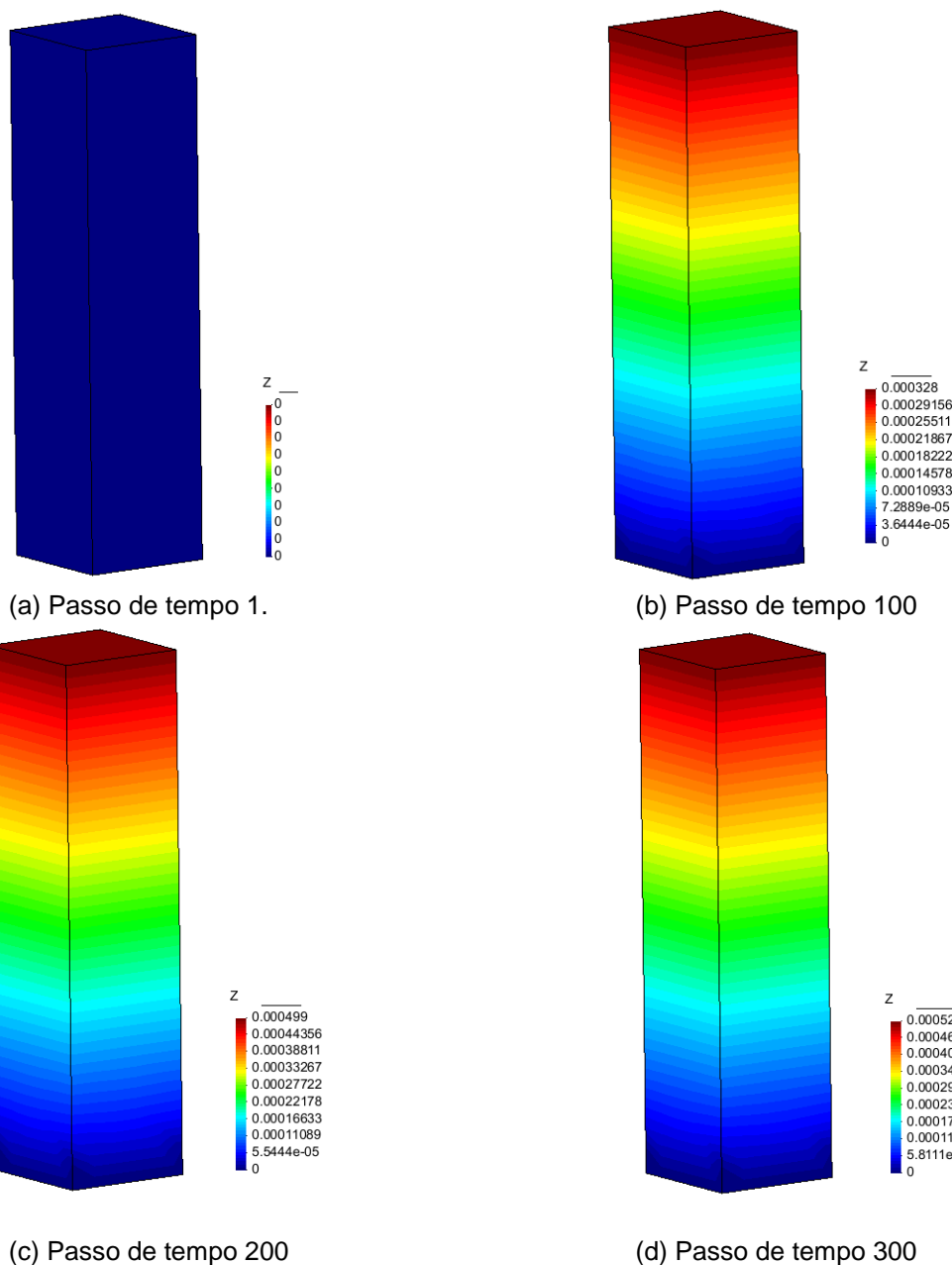


Figura 17- Modelo de corpo de prova deformado e seus deslocamentos no eixo Z, para diferentes espaços de tempo.

Fonte: Autoria própria utilizando o programa *GID*.

As cores representam a distribuição do deslocamento ao longo do corpo de prova. No primeiro corpo de prova da figura 17 não acontece alteração de cor, ficando plenamente azul, devido a inexistência de deslocamento neste passo de tempo. Observa-se a variação na escala de cores ao longo do comprimento do corpo de prova ao decorrer



dos passos de tempo e pode-se notar pela legenda a variação numérica do deslocamento, sendo este maior no topo do corpo de prova e nulo na base onde seus elementos apresentam restrição de deslocamento em Z, como esperado.

Para a verificação da coerência dos dados obtidos através do aplicativo, elaborou-se o gráfico de curvas de deformação a partir dos deslocamentos obtidos nos passos de tempo em que o corpo de prova foi analisado.

Para calcular a deformação do corpo de prova a equação (42) foi empregada para determinação das curvas de deformação.

$$\varepsilon = \frac{U}{L} \quad (42)$$

em que  $\varepsilon$  é a deformação do corpo de prova;  $U$  é a expansão do corpo de prova;  $L$  é o comprimento inicial total do corpo de prova.

Pode-se perceber na figura 18 que a curva de deformação obtida com a equação (42) aplicando-se os resultados de deslocamento fornecidos pelo programa RAA, coincide em quase toda sua totalidade com as curvas obtidas experimentalmente por Boddy, Hooton e Thomas (2000) e numericamente por Carrazedo (2004).

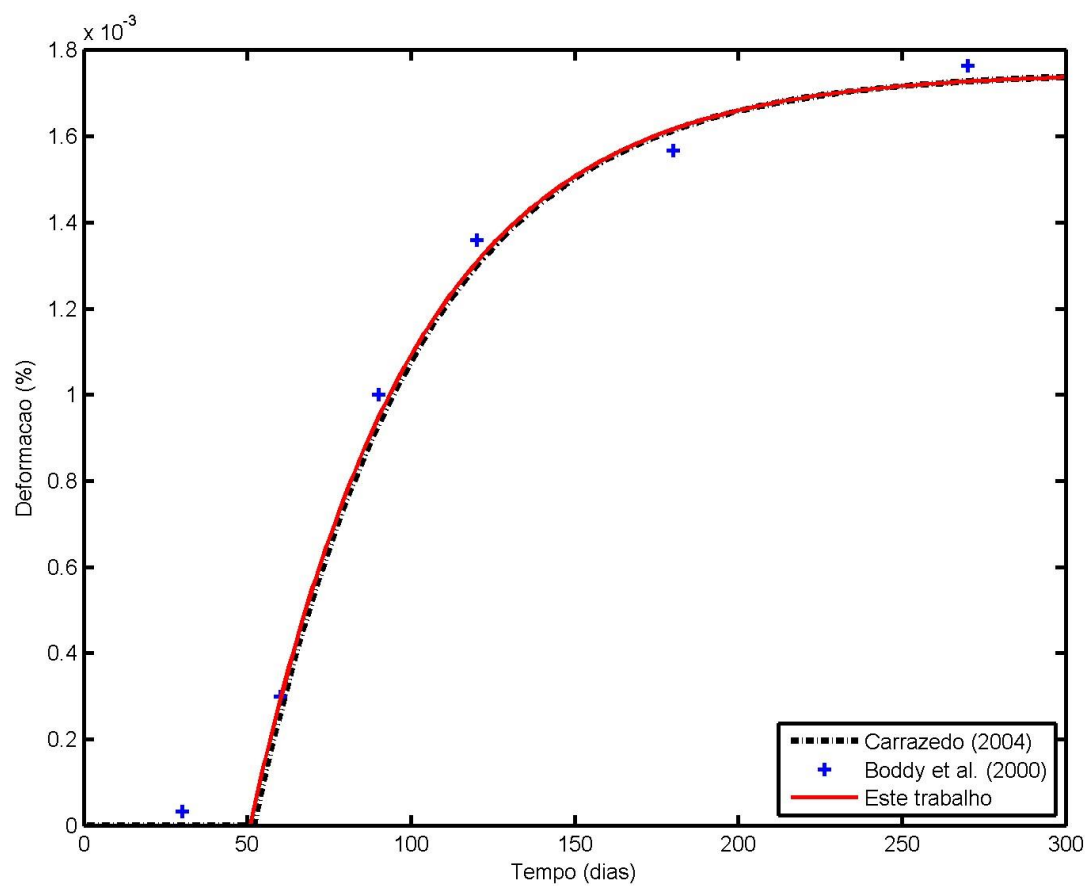


Figura 18- Deformação do corpo de prova ao longo de 300 passos de tempo.

Fonte: Carrazedo, 2004.

## 7 CONCLUSÃO

Desde que foi diagnosticado o fenômeno da reação álcali-agregado (RAA), em 1940 por Stanton, este vem sendo amplamente estudado, em diferentes direções: identificação dos componentes minerais dos agregados, características mineralógicas envolvidas na reação, diagnóstico, teste e avaliação da reação nas propriedades do concreto. Por ser um fenômeno complexo, em que muitos parâmetros como umidade, porosidade, temperatura, tensões confinantes, reatividade do agregado e conteúdo de álcalis no concreto, são interligados e influenciam sua ocorrência, muitas dúvidas ainda necessitam serem sanadas.

Sabe-se que grandes estruturas de concreto armado como pontes, barragens e túneis, estão sujeitas a fenômenos deletérios, entre eles a RAA, que pode resultar no surgimento de expansões, podendo originar fissuras, aumento de permeabilidade, diminuição da resistência física e química, redução da vida útil da estrutura e/ou até mesmo sua ruptura.

A reação álcali agregado é uma reação química que ocorre entre os álcalis do cimento e elementos químicos presentes na composição mineralógica de alguns tipos de agregados. Esta reação pode ser dividida em álcali-sílica, álcali-silicato e álcali-carbonato.

Neste trabalho, foi desenvolvido um aplicativo para a análise elástico-linear de estruturas de concreto sujeitas às reações álcali-sílica e álcali-silicato, utilizando o Método de Elementos Finitos e a linguagem computacional Fortran 90 para sua implementação. Aplicou-se um modelo paramétrico que se resume na distribuição espacial dos fatores que influenciam a reação álcali-agregado, normalizando-os, para que se aplique uma equação constitutiva de modo a obter a taxa de expansão volumétrica devido à RAA onde evidencia-se a influência da umidade, temperatura, tensões e reatividade dos materiais.

As modificações estruturais decorrentes da RAA podem ser representadas de forma simplificada pela superposição das deformações, em que a deformação total é obtida pela soma da deformação elástica com a deformação proporcionada pela RAA.

Para validação do programa analisou-se um corpo-de-prova prismático de concreto, em que se obtiveram os seus valores de deslocamento, tensões resultantes e expansão volumétrica. Os valores de deslocamento, sem a influência da RAA, fornecidos pelo programa foram comparados aos resultados obtidos de forma analítica e com os

apresentados pelo ANSYS®. A consideração da influência da RAA foi comparada a resultados experimentais e numéricos obtidos por outros pesquisadores.

Realizou-se também, um pós-processamento para melhor visualização dos resultados do programa, facilitando o entendimento e interpretação dos dados, com esquema de cores para ilustrar a distribuição do deslocamento que ocorre no concreto.

Pode-se observar a concordância de resultados, que valida o aplicativo implementado.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade da pesquisa tem-se como proposta a complementação do aplicativo, através da inclusão de outras variáveis, modelos e equações. Algumas sugestões são apresentadas a seguir:

- Modificação para processo dinâmico;
- Alteração da ordem dos elementos (funções de forma e quadratura de Gauss);
- Resolução do problema térmico e higrométrico, com a mesma malha;
- Implementação da NLF (não linearidade física);
- Utilização de modelos constitutivos visco-elásticos;
- Emprego de modelos de otimização;
- Inclusão da presença de armadura;
- Aplicação do modelo de Dano.

## 8 REFERÊNCIAS

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 1ª edição, 2003.

BAZANT, Z. P.; STEFFENS, A. **Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete**. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 3, p. 419-428, 2000.

BÉRUBÉ, M. A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M. **Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity**. Cement and Concrete Research, v. 32, n. 8, p. 1215-1227, 2002.

BODDY, A. M.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **The effect of product form of sílica fume on its ability to control alkali-silica reaction**. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 7, p. 1139-1150, Julho 2000.

CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P. **Modeling of induced mechanical effects of alkali aggregate reactions**. Cement and Concrete Research, v. 28, n. 2, p. 251-260, 1998.

CARRAZEDO, R. **Modelagem numérica da expansão do concreto devido a reação álcali-agregado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 81. 2004.

CARRAZEDO, R.; LACERDA, L. A. **A parametric discussion for the concrete expansion due to AAR**. International Conferences on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing: [s.n.]. 2004.

CARRAZEDO, R.; LACERDA, L. A. **Parametric model for the analysis of concrete expansion due to alkali aggregate reaction**. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 43, 2008. 325-335.

CARRAZEDO, R.; SANCHES, R. A. K.; LACERDA, L. A. D. **Numerical modeling of orthotropic concrete expansion due to alkali-aggregate reaction with a parametric model.** 10th World Congress on Computational Mechanics. São Paulo: [s.n.]. 2012.

CARRAZEDO, R.; SANCHES, R. A. K.; LACERDA, L. A. D.; DIVINO, P. L. **Modelagem paramétrica da expansão ortotrópica promovida pela reação álcali-agregado de uma barragem em arco.** Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Fortaleza: [s.n.]. 2014.

CHATTERJI, S.; JENSEN, A. D.; THAULOW, N.; **Studies of alkali-silica reaction. Part 5: Verification of a newly proposed reaction mechanism.** Cement and concrete research, v. 19, n. 2, p. 177-183, 1989.

COLLINS, R. J.; BAREHAM, P. D. **Alkali-silica reaction: Suppression of expansion using porous aggregate.** Cement and Concrete Research, v. 17, n. 1, p. 89-96, 1987.

CONSTANTINER, D.; DIAMOND, S. **Alkali release from feldspars into pore solutions.** Cement and Concrete Research, v. 33, n. 4, p. 549-554, 2003.

GAELZER, R. **Introdução ao Fortran 90/95.** Pelotas: Campus, 2012.

GILLOTT, J. E. **Alkali-reactivity problems with emphasis on Canadian aggregates.** Engineering Geology, v. 23, p. 29-43, 1986.

LÉGER, P.; CÔTÉ, P.; TINAWI, R. **Finite element analysis of concrete swelling due to alkali aggregate reactions in dams.** Computers & Structures, v. 60, n. 4, p. 601-611, 1996.

LIANG, T.; MINGSHU, T. **Correlation between reaction and expansion of alkali-carbonate reaction.** Cement and Concrete Research, v. 25, n. 3, p. 470-476, 1995.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, Brasil: PINI, 1994.

NOGUEIRA, K. A. **Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT:15577/2008**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Fevereiro 2010.

OLIVEIRA, J. R. S. D.; CARRAZEDO, R.; LACERDA, L. A. **Modelagem da Expansão do concreto devido à RAA com decaimento do módulo de elasticidade**. Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Pirenópolis: [s.n.]. 2013.

PAPPALARDO Jr., A. **Uma metodologia para metodologia para barragens de concreto afetadas pela reação alkali-agregado**. Tese (Doutor em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1998.

PIETRUSZCZAK, S. N. **On the mechanical behavior of concrete subjected to alkali-aggregate reaction**. Computers & Structures, v. 58, n. 6, p. 1093-1097, 1996.

WIGUN, B. J. **Alkali-aggregate reaction – Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks**. Tese (Doutor em Engenharia) – University of Trondheim, Noruega, 1995.

ZHANG, C.; WANG, A.; TANG, M.; WU, B.; ZHANG, N. **Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion**. Cement and Concrete Research, v. 29, n. 9, p. 1393-1396, 1999.