



## MODELAGEM NUMÉRICA DE PLACAS LAMINADAS REFORÇADAS COM FIBRAS LONGAS DE SISAL

Ana Beatriz de Carvalho Gonzaga e Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Fernando Luiz Bastos Ribeiro

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Fevereiro de 2010

MODELAGEM NUMÉRICA DE PLACAS LAMINADAS REFORÇADAS COM FIBRAS  
LONGAS DE SISAL

Ana Beatriz de Carvalho Gonzaga e Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinada por:

---

Prof. Fernando Luiz Bastos Ribeiro, D.Sc.

---

Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, D. Sc

---

Prof. José Cláudio de Faria Telles, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO de 2010

Gonzaga e Silva, Ana Beatriz de Carvalho

Modelagem Numérica de Placas Laminadas Reforçadas com Fibras Longas de Sisal/ Ana Beatriz de Carvalho Gonzaga e Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2010.

vi, 25 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Fernando Luiz Bastos Ribeiro

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Ambiental, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 33-34.

1. Modelagem Numérica 2.Método dos Elementos Finitos.  
3. Fibras de sisal I. Ribeiro, Fernando Luis Bastos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Título.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

## Modelagem Numérica de Placas Laminadas Reforçadas com Fibras Longas de Sisal

Ana Beatriz de Carvalho Gonzaga e Silva

Fevereiro/2010

Orientador: Fernando Luiz Bastos Ribeiro

Curso: Engenharia Ambiental

A proposta deste projeto é realizar análises numéricas, utilizando o programa computacional de elementos finitos DIANA (plataforma comercial), de materiais compósitos de matrizes cimentíceas reforçadas com fibras de sisal, adotando os modelos constitutivos adequados e simulando um ensaio de flexão. Os resultados são comparados com resultados experimentais para validação do modelo.

*Palavras-chave:* Modelagem Numérica, Placas Laminadas, Fibras de Sisal

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

## NUMERICAL MODELING OF LAMINATED PLATES REINFORCED WITH LONG SISAL FIBERS

Ana Beatriz de Carvalho Gonzaga e Silva

February/2010

Advisor: Fernando Luiz Bastos Ribeiro

Course: Environmental Engineering

The purpose of this work is to perform numerical analysis, using the computational finite element method program DIANA (commercial program), of laminated cementitious composites reinforced with long sisal fibers, adopting the appropriate constitutive laws and simulating a bending test. The results are compared to experimental results to validate the model.

*Keywords:* numerical modeling, laminated plates, sisal fibers.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....	7
1.1 Relevância e Objetivos .....	7
1.2 Revisão Bibliográfica.....	9
CAPÍTULO 2. METODOLOGIA .....	14
2.1 Caracterização do Material .....	14
2.2 Modelagem Numérica por Elementos Finitos .....	15
CAPÍTULO 3. RESULTADOS .....	23
CAPÍTULO 4. CONCLUSÕES.....	31
REFERÊNCIAS.....	32

# **CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 Relevância e Objetivos**

A preservação do meio ambiente é um tema bastante polêmico na atualidade e, dentro desse contexto, o aquecimento global e os impactos das atividades humanas são preocupações que vêm sendo debatidas nas últimas décadas. A busca por um desenvolvimento sustentável é vista como uma necessidade para se obter um equilíbrio entre o homem e a natureza.

O desenvolvimento sustentável pode ser definido como uma forma de desenvolvimento econômico que utiliza o meio ambiente e emprega os recursos naturais sem prejudicar sua utilização pelas gerações futuras. O conceito de sustentabilidade é hoje uma preocupação de todas as nações, sendo adotado em diversos setores da economia.

As mudanças do clima da Terra são parte das conseqüências de um modelo de desenvolvimento econômico sem responsabilidade com as causas ambientais. O último relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) afirma com 90% de certeza que os homens são responsáveis pelo aquecimento global e que para deter esse processo é necessário diminuir de 50% a 85% das emissões de CO<sub>2</sub> até a metade deste século.

Para atingir esses objetivos, durante a Convenção do Clima do Rio de Janeiro (ECO-92) foram definidas políticas de redução de emissões. O Protocolo de Kyoto criado em 1997 não só estabelece metas de redução de emissões para os países desenvolvidos como cria mecanismos para ajudar os países a alcançarem suas metas de redução. Um desses mecanismos é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) através do qual projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEEs) por países em desenvolvimento podem resultar em Certificados

de Redução de Emissões, também conhecidos como créditos de carbono, que podem ser comercializados com os países desenvolvidos.

Esse sistema é um incentivo à pesquisa por materiais sustentáveis em diversas áreas, sendo uma forma dos países em desenvolvimento valorizarem o meio ambiente e melhorarem sua economia. A utilização de materiais sustentáveis eficientes e seguros é um grande desafio para a construção civil. No mercado de produtos laminares à base de cimento o uso de fibras vegetais como reforço em matrizes cimentícias é considerado alternativa sustentável às fibras sintéticas. Fibras de sisal, coco, juta, bambu e fibras de celulose, entre outros, têm sido usadas como alternativa às fibras de vidro, PVA e polipropileno para produzir elementos de cobertura e revestimento, painéis divisórios e outros componentes habitacionais com baixo custo em países em desenvolvimento [1]. A energia necessária para sua produção é comparativamente pequena e seus custos de fabricação são baixos, além de serem abundantes, mais baratas e não exigirem um grau elevado de industrialização durante o seu processamento.

No caso específico das fibras de sisal, um fator importante é sua grande disponibilidade e a possibilidade de se agregar valor a um produto agrícola da região semi-árida brasileira [2]. Do ponto de vista socioeconômico, uma maior demanda pela fibra de sisal se reflete na melhoria das condições de vida da população e mesmo na redução do processo de desertificação que aflinge essa região [2].

Um dos principais limitadores ao uso das fibras vegetais em matrizes à base de cimento tem sido a deterioração da fibra pelos produtos de hidratação do cimento (principalmente  $\text{Ca(OH)}_2$ ) que migram para a estrutura da fibra [1]. Para resolver esse problema foi desenvolvida uma matriz com adição de materiais pozolânicos, o que diminui a produção de hidróxido de cálcio (50% de



cimento Portland em comparação com os materiais convencionais), aumenta a durabilidade da fibra e reduz a emissão de CO<sub>2</sub>, apresentando vantagens econômicas e ambientais com relação à matriz convencional [3].

A modelagem computacional é uma ferramenta útil no design de estruturas com novos materiais como os compósitos de fibras de sisal, evitando a execução de testes uniaxiais de tensão, que além de consumir um tempo elevado requerem tecnologias mais avançadas [4]. Para isso torna-se necessário conhecer as leis constitutivas dos materiais. Os procedimentos de análise inversa são uma forma de determinar os parâmetros principais das relações constitutivas. Assim, os resultados obtidos com experimentos simples podem ser usados para simular testes mais complexos usando técnicas numéricas.

O objetivo deste projeto é realizar análises numéricas, utilizando o método dos elementos finitos, de placas laminadas de matrizes cimentícias livres de hidróxido de cálcio reforçadas com fibras longas de sisal, simulando ensaios de flexão e comparando os resultados com resultados experimentais. Com a calibração correta do modelo, a simulação dos ensaios economiza tempo, recursos financeiros e materiais, possibilitando a execução de testes experimentais apenas para os modelos que obtiverem melhor rendimento nos ensaios numéricos.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

As fibras naturais são uma alternativa às fibras de vidro utilizadas como reforço em compósitos em diversos campos de aplicação (naval, indústria automobilística e de construção civil) devido a sua propriedade de biodegradabilidade, além de seus baixos custos e de suas propriedades mecânicas e de baixa condutividade térmica e elétrica [5]. As fibras atuam nas microfissuras restringindo o crescimento de fissuras quando submetidas a tensões que levam a ruptura do

compósito, melhorando as propriedades mecânicas dos materiais, como fratura, módulo de elasticidade na flexão, fadiga e resistência a impacto [3].

O uso das fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios começou a ser estudado como alternativa de substituição da fibra de asbesto na década de 1970, após descobrir-se que o asbesto era prejudicial à saúde. A partir daí, materiais cimentícios laminares com reforço de fibras naturais e sintéticas foram desenvolvidos para atender às demandas de resistência e durabilidade de aplicações específicas na construção civil [2]. Em alguns países, produtos reforçados com fibras vegetais já são comercializados há algum tempo, empregando técnicas como o uso de fibras em formato de polpa e processos fundamentados no método *Hatscheck* [1].

A utilização de chapas pré-moldadas obtidas a partir do aproveitamento de fibras e resíduos vegetais vem sendo discutida no Brasil desde a década de 1980 para aproveitamento dos resíduos agroindustriais e redução de custos com fabricação e transporte [2]. Dentro desse contexto, a fibra de sisal vem sendo usada há mais de duas décadas como reforço em compósitos de cimento e polímeros. A planta do sisal é bem adaptada ao clima semi-árido do Nordeste brasileiro e um aumento na demanda geraria milhares de empregos ao longo da cadeia produtiva, além de reduzir a migração de trabalhadores rurais para as cidades [6].

Outro fator a ser considerado é que as fibras vegetais podem ser utilizadas para gerar energia ao fim de seu uso, através da incineração. Estudos recentes mostram que, num futuro próximo, estas fibras podem substituir não só as fibras de vidro, como também o aço e alumínio em aplicações específicas nas indústrias de telecomunicações, engenharia biomédica e aeroespacial [5].

Embora não haja estudos significativos de análise do ciclo de vida das fibras de sisal, pesquisas realizadas comparando outros tipos de fibra com as fibras de vidro, alumínio e aço [5] mostram

benefícios ambientais revelantes, com redução não só nas emissões de CO<sub>2</sub>, como também de NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>. Os impactos com a reciclagem dos materiais e consumo de energia também se mostram vantajosos.

A substituição de parte da matriz cimentícia por outros aditivos vem sendo estudada como forma de resolver o problema de deterioração das fibras. A adição de materiais pozolânicos consome o hidróxido de cálcio, transformando-o em silicato de cálcio hidratado e reduzindo a alcalinidade do meio e o efeito de mineralização das fibras. Estudos recentes [6] [7] [8] [9] mostram que a substituição parcial de 30% de cimento Portland por metacaulinita e 20% por resíduos cerâmicos produz uma matriz com consumo quase total de hidróxido de cálcio.

A metacaulinita é uma sílica amorfa obtida pela calcinação de argila caulínica a uma temperatura entre 500°C e 650°C, moída até a finura de 700m<sup>2</sup>/kg ou 900m<sup>2</sup>/kg, o que resulta em um material de grande pozolanicidade [1]. Já o resíduo cerâmico é um material de origem das indústrias produtoras de materiais cerâmicos. Sua utilização não só contribui para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> como permite a reciclagem de um resíduo que seria disposto no meio ambiente em aterros sanitários ou lixões, além de diminuir a demanda por matéria prima, o consumo de energia e proporcionar economia no produto final.

Com relação a matriz, a produção de cimento envolve emissões significativas de CO<sub>2</sub>, conhecido como o gás de efeito estufa mais importante para o aquecimento global. A indústria do cimento é responsável por cerca de 5% das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> [10] e, nesse processo, o consumo do calcário ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) representa mais da metade das contribuições em gases de efeito estufa da produção de cimento [11].

Estudos mostram que, usando um fator de emissão de 0.651 toneladas de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de cimento produzido, dos 25.22 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> registradas para o ano de 2001, uma redução de 5.04 milhões de toneladas seria possível utilizando 20% de resíduo cerâmico em substituição ao cimento Portland [12]. Esses cálculos não só evidenciam as vantagens ambientais obtidas com tal substituição como a possibilidade de obtenção de créditos de carbono com o processo. Esses créditos, implementados pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) estabelecido pelo Protocolo de Kyoto, são uma forma de incentivo à redução de emissões de CO<sub>2</sub> pelos países em desenvolvimento, visto que podem ser comercializados e vendidos aos países desenvolvidos como forma de cobrir parte das suas metas de redução de emissões estabelecidas pelo Protocolo.

Existem dois grupos básicos de modelos de compósitos reforçados com fibras. O primeiro deles seria uma análise micro-mecânica distinguindo a ação de cada componente do material. Já o segundo é uma aproximação em macro escala do comportamento do material estudado [4].

A modelagem numérica desses compósitos é uma forma de reduzir o tempo de análise e a necessidade de testes complexos. Para conhecer as leis constitutivas do material são usadas técnicas de análise inversa. Essas técnicas consistem em assumir uma forma para as leis constitutivas e valores iniciais dos parâmetros a serem determinados. Utiliza-se os resultados de ensaios mais simples para minimizar os desvios, variando-se os parâmetros de entrada [13].

Existem poucos trabalhos na literatura sobre a modelagem numérica de compósitos cimentícios. Trabalhos desenvolvidos por [4] utilizam a técnica de análise inversa para simular o comportamento de compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal em testes de flexão em

quatro pontos e tração direta. O presente trabalho é uma continuação desses trabalhos e contribui para o avanço do conhecimento no referido assunto.

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGIA**

### **2.1 Caracterização do Material**

O material escolhido para a modelagem foi produzido no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ e foi parte da tese de mestrado de MELO FILHO [1].

O cimento utilizado na confecção dos compósitos foi o cimento Portland CP II F-32, que possui tensão de compressão de 32 MPa ao final dos 28 dias de cura. O cimento foi parcialmente substituído por 30% de metacaulinita e 20% de resíduo de tijolo e reforçada por 5% de volastonita. A porção de mistura foi de 1:1:0.4 (materiais cimentícios: areia: água). A areia utilizada possui diâmetro máximo de 1.18 mm e massa específica de 2.67 g/cm<sup>3</sup>. Foi adicionado o superplastificante FOSROC REAX CONPLAST SP 430 que possui composição baseada em Naftaleno Sulfonado com teor de sólidos de 44%.

As fibras de sisal utilizadas têm diâmetro médio de 0.12 mm, densidade de 0.90 g/cm<sup>3</sup>, módulo de elasticidade de 19 GPa e uma tensão de tração de 557 MPa, e um comprimento variando de 80cm a 120 cm.

Os compósitos foram reforçados com fibras alinhadas e contínuas, colocadas manualmente no molde. A produção foi feita alternando-se uma camada de matriz e uma camada de fibras, até atingir o número de camadas desejado. Ao final as placas foram moldadas com uma pressão de compressão de 3 MPa.

## 2.2 Modelagem Numérica por Elementos Finitos

Neste trabalho utilizou-se o programa DIANA para modelagem dos compósitos. O programa DIANA foi desenvolvido por *TNO Building and Constructions Research* do *Department of Computational Mechanics Netherlands*, e é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF).

As modelagens foram efetuadas com o elemento de casca quadrilateral quadrático CQ40L, esquematizado na figura 1. Trata-se de um elemento quadrático laminado que permite a definição de até 20 camadas de espessuras e materiais diferentes.

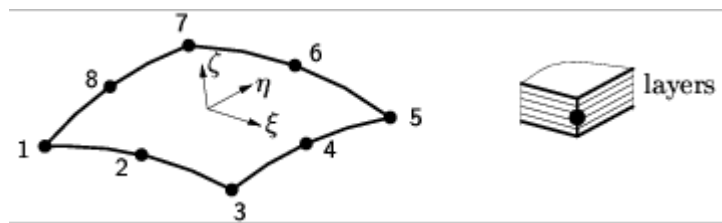


Figura 1: Elemento de casca quadrilateral quadrático curvo isoparamétrico em camadas CQ40L[16].

O comportamento típico de um compósito cimentício reforçado com fibras na flexão (Figura 2) pode ser descrito em cinco fases [14]:

1. Estado inicial antes da fissuração.
2. Região de fissuração múltipla na qual as fissuras se desenvolvem e sua largura aumenta com o aumento da carga aplicada.
3. Região na qual ocorre o escoamento devido à plasticidade das fibras.
4. Região onde ocorre a tensão máxima.
5. Região na qual a tensão cai e ocorre a ruptura.

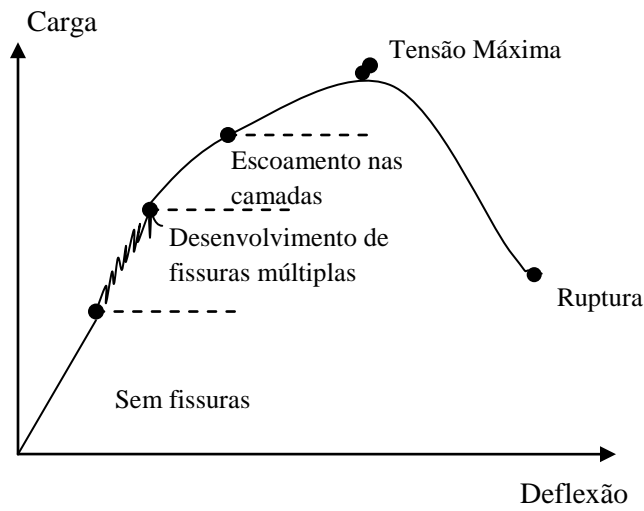


Figura 2: Comportamento típico de um compósito reforçado com fibras submetido a flexão (adaptado de [13]).

Para obter as leis constitutivas dos materiais adotou-se um modelo em macro-escala, considerando dois tipos de camadas: camadas de matriz cimentícia e camadas de matriz + fibras (Figura 3).

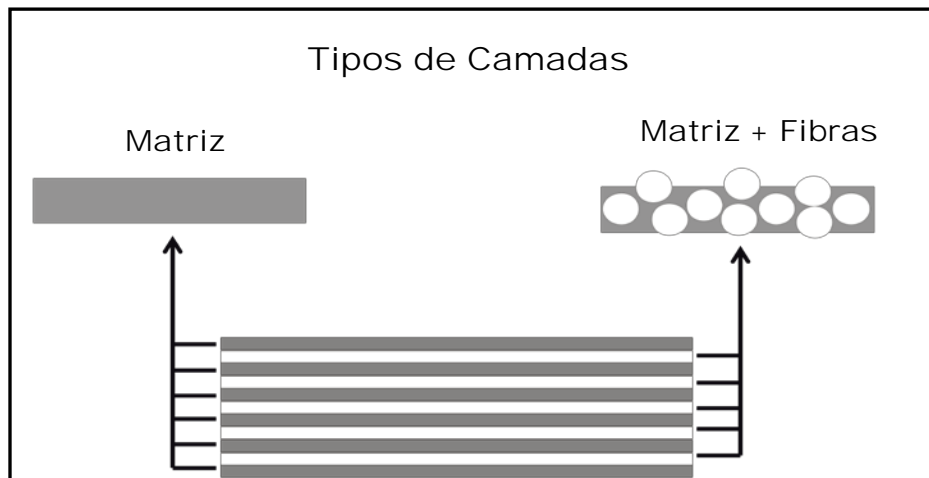


Figura 4: Modelo adotado para o material: camadas de matriz e matriz+fibras (adaptado de [4]).



O modelo utilizado na definição das camadas de matriz foi um modelo de fissura distribuída fixa com *softening* linear e plasticidade de *Drucker-Prager* ideal na compressão. Nas camadas de matriz + fibras foi adotada plasticidade com endurecimento bilinear e critério de *Von Mises*.

### 2.2.1 Camadas de Matriz

Para representar as fissuras foi utilizado o modelo de fissura distribuída (*smearred crack*) multidirecional com *softening* linear. Assume-se nesse caso que a descontinuidade do campo de deslocamentos causada pela fissura é espalhada ao longo do elemento. Apesar da continuidade assumida para o campo de deslocamentos ser incompatível com a descontinuidade real, a sua aplicação computacional simples e boa capacidade de modelar o comportamento estrutural global justificam seu uso [13].

Nesse modelo, adota-se que a resolução da variação de deformações totais é a soma das variações de deformações no cimento e a variação de deformações nas fissuras, como indica a equação 1.0. Isso permite que o comportamento nas interfaces das fissuras seja tratado separadamente do comportamento constitutivo do material e permite a combinação do modelo de fissuração com outros efeitos não-lineares do material [15].

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon^{co} + \Delta \varepsilon^{cr} \quad (1.0)$$

Adota-se nesse modelo um parâmetro de minoração da rigidez transversal do material (*shear retention factor*) ou fator de retenção ao cisalhamento ( $\beta$ ), que indica a capacidade de cisalhamento elástico retida após a fissuração. Outro parâmetro necessário é a energia de fratura ( $G_f$ ), propriedade do material definida como a quantidade de energia requerida para criar uma unidade de área de uma fissura contínua [15]. Assim, a taxa de energia de deformação dissipada

na propagação de uma fissura deve ser pelo menos igual à taxa de energia requerida para a formação de novas fissuras [13].

Após um certo limite de tensão todas as micro-fissuras se localizam em uma chamada zona de fratura. Nessa região, a tensão começa a cair enquanto a deformação aumenta, fenômeno conhecido como *softening* nas deformações de tração. Quando se alcança o final do ramo descendente, as micro-fissuras formam uma macro-fissura contínua [13]. O processo está ilustrado na figura 5.

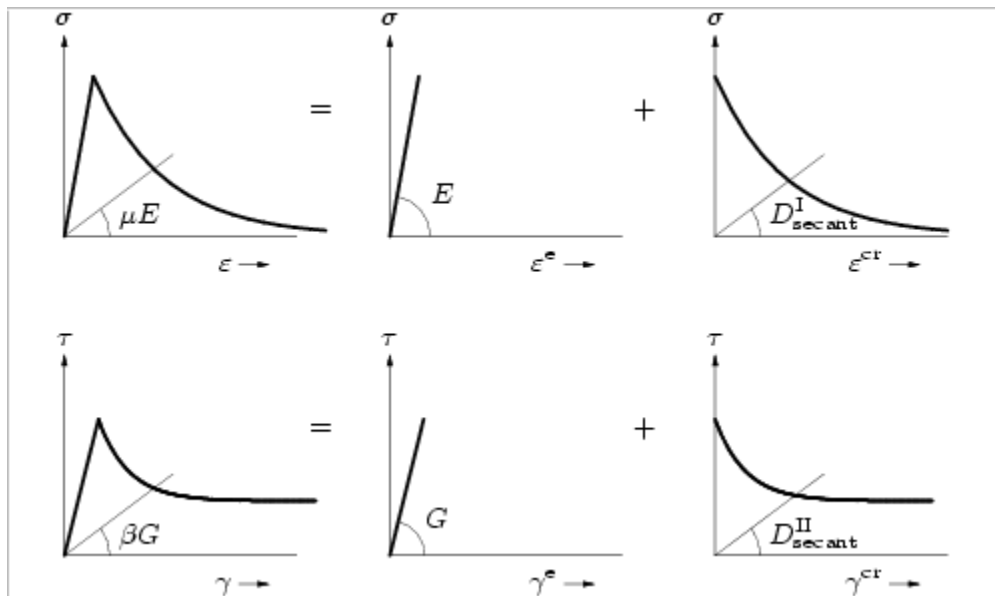


Figura 5: Processo de formação de fissuras na zona de fratura[16].

O programa DIANA utiliza diversos modelos de *tension softening*. Dentre eles, escolheu-se o modelo de softening linear (figura 6), que calcula a máxima deformação de fissura como função da energia de fratura através da fórmula

$$\varepsilon_u^{cr} = \frac{2G_f}{f_t h}, \quad (2.0)$$

Onde  $f_t$  representa a tensão de tração e  $h$  é a largura de banda da fissura. Por default,  $h$  assume um valor relacionado com a área ou volume do elemento.

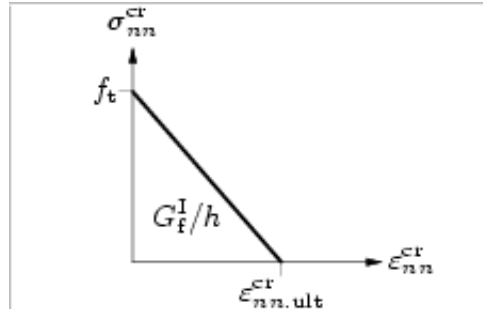


Figura 6: Modelo de *softening* linear [16].

Além do modelo de fissuração distribuída, foi adotado o critério de plasticidade de *Drucker-Prager* para o material na compressão, como mostra a figura 7. O modelo procura retratar o comportamento do material definindo dois trechos distintos na curva tensão-deformação, um elástico e outro plástico e é considerado perfeitamente plástico pois despreza os efeitos de endurecimento.

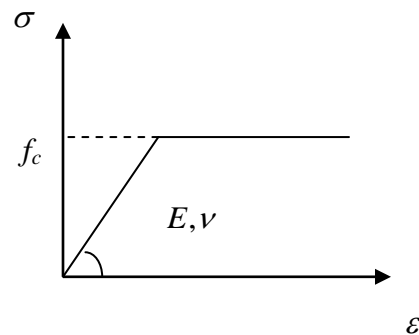


Figura 7: Modelo de Plasticidade de *Drucker-Prager* perfeita na compressão para as camadas de matriz(adaptado de [4]).

A condição de resistência de Drucker-Prager é uma simplificação da superfície de resistência de Mohr-Coulomb, sendo uma superfície cônica no espaço das tensões principais [16]. O critério de escoamento é dado por:

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) = \sqrt{\frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\sigma}} + \alpha_f \boldsymbol{\pi}^T \boldsymbol{\sigma} - \beta \bar{c}(\kappa) \quad (3.0)$$

Os parâmetros de entrada necessários são o ângulo de fricção interna  $\phi$  e a coesão, derivada da tensão de compressão e do ângulo de atrito através da fórmula:

$$\bar{c} = f_c \frac{1 - \text{sen} \phi_0}{2 \cos \phi_0} \quad (4.0)$$

Assim, para as camadas de matriz foram definidos os seguintes parâmetros de entrada: módulo de elasticidade ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), tensão de compressão ( $f_c$ ), ângulo de atrito ( $\phi$ ), tensão de tração ( $f_{t,m}$ ) e energia de fissuração ( $G_f$ ).

### 2.2.2 Camadas de Matriz + Fibras

Nas camadas de matriz com fibras foi considerado um modelo de plasticidade com endurecimento bilinear e critério de *Von Mises*, conforme ilustra a figura 8. Na figura,  $E_1$  representa o módulo de young homogeneizado antes da fissuração da matriz, e  $E_2$  o módulo de young após a fissuração da matriz.

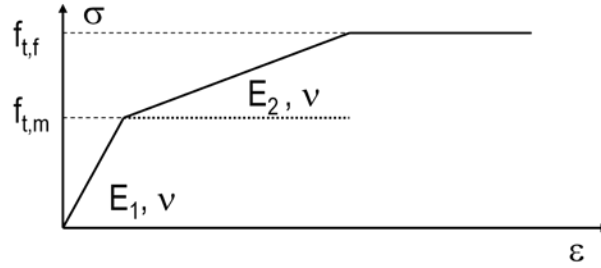


Figura 8: Modelo de plasticidade com endurecimento bilinear e critério de *Von Mises*(adaptado de [4]).

A condição de Von Mises é representada por uma superfície cilíndrica circular no espaço das tensões principais. A função de escoamento é dada pela seguinte formulação:

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) = \sqrt{3J_2} - \bar{\sigma}(\kappa) = \sqrt{\frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\sigma}} - \bar{\sigma}(\kappa) \quad (6.0)$$

Os parâmetros necessários para o modelo são os valores de tensão de tração e as variáveis internas de estado  $\kappa$ , obtidas através da transladação dos dados do gráfico tensão-deformação de acordo com o gráfico da Figura 9.

Assim, definem-se os seguintes parâmetros para o material: módulo de elasticidade homogeneizado antes da fissuração da matriz ( $E_1$ ), módulo de elasticidade após a fissuração ( $E_2$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), tensão de tração da matriz que circunda as fibras ( $f_{t,m}$ ) e a tensão de tração das fibras ( $f_{t,f}$ ). Além disso, dois parâmetros necessários para o modelo são as espessuras das camadas de matriz e de matriz+fibras, chamadas respectivamente de  $e_m$  e  $e_f$ .

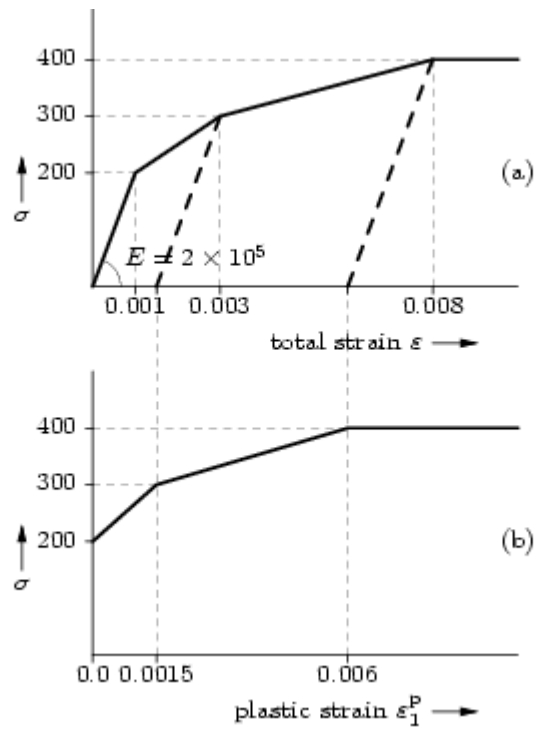


Figura 9: gráfico de tensão - deformação total (a) e tensão - deformação plástica (b) usados para obtenção das variáveis internas de estados [16].

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS

A modelagem realizada teve como objetivo simular um ensaio experimental de flexão em três pontos de uma placa laminada lisa reforçada com fibras longas de sisal (figura 10). As fibras foram alinhadas unidirecionalmente na direção do esforço. A placa possui dimensões de 400 mm x 400 mm x 12 mm e volume de fibras de 6%, divididas em 5 camadas. O vão entre os apoios era de 370 mm e o carregamento central era linear, como indica a figura 11.



Figura 10: Ensaio de Flexão utilizado para simulação numérica.

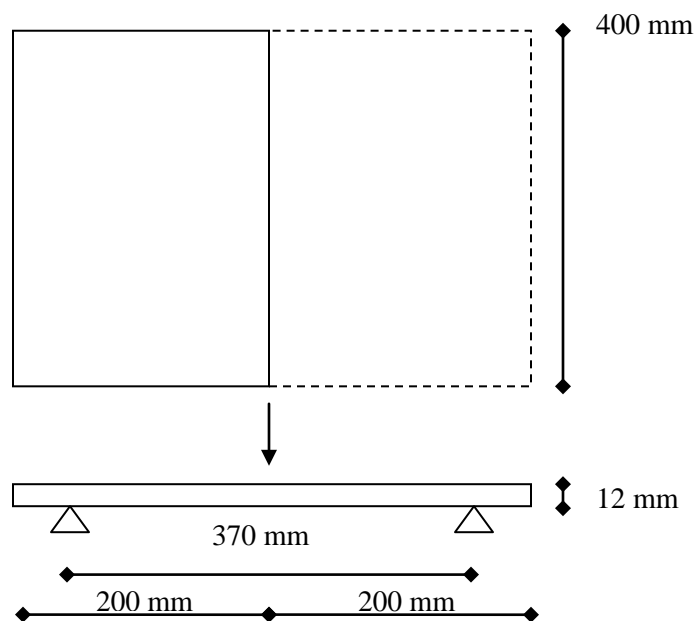
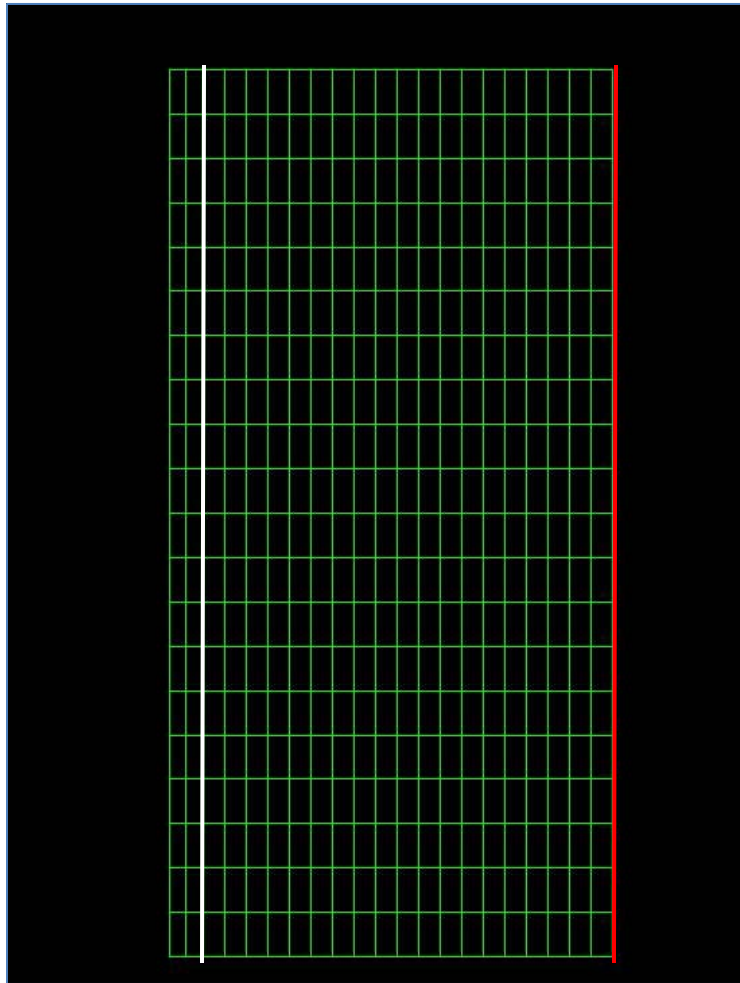


Figura 11: Dimensões da placa e distância entre os apoios e carga central.

A modelagem foi feita em metade da placa, devido as condições de simetria. A figura 12 mostra a malha gerada, formada por 420 elementos quadrilaterais quadráticos. A linha branca representa o suporte e a linha vermelha indica o carregamento central imposto.



**Figura 12:** Malha utilizada na modelagem. A linha branca indica o local do suporte e a linha vermelha o carregamento de força linear.



Os valores para os parâmetros de entrada utilizados no modelo estão listados na tabela 1.

Tabela 1: Valores dos parâmetros de entrada do modelo

Camadas de Matriz		Camadas de Matriz + Fibras	
$E$	35.0 GPa	$E_1$	10.0 GPa
$\nu$	0.2	$E_2$	7.0 GPa
$f_c$	60.0 MPa	$\nu$	0.2
$\varphi$	30°	$f_{t,ms}$	5.0 MPa
$f_{t,m}$	6.0 MPa	$f_{t,f}$	500.0 MPa
$G_f$	200 J/m <sup>2</sup>	$e_f$	0.6 mm
$e_m$	1.5 mm		

As figuras 14-22 apresentam resultados de tensão  $\sigma_{xx}$  para instantes de deflexão na parte elástica e plástica da deformação, nas superfícies superior e inferior da placa e as deformações de fissura correspondentes. A figura 13 mostra a deformada da placa após a aplicação da carga.

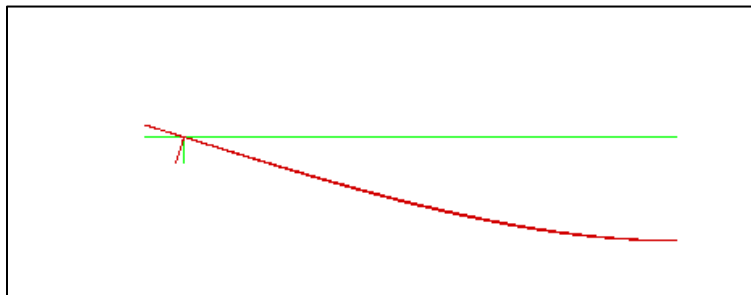


Figura 13: Deformada da placa após aplicação da carga.

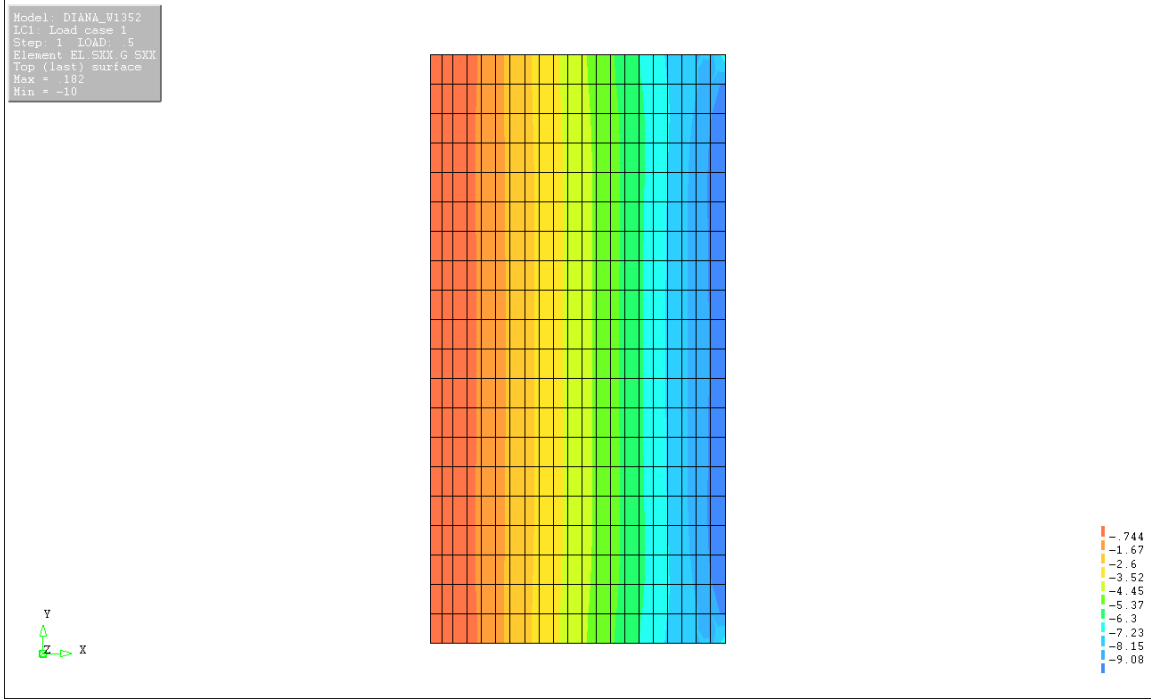


Figura 14: Tensões  $\sigma_{xx}$  na parte superior da placa – deflexão central de 0.5 mm.

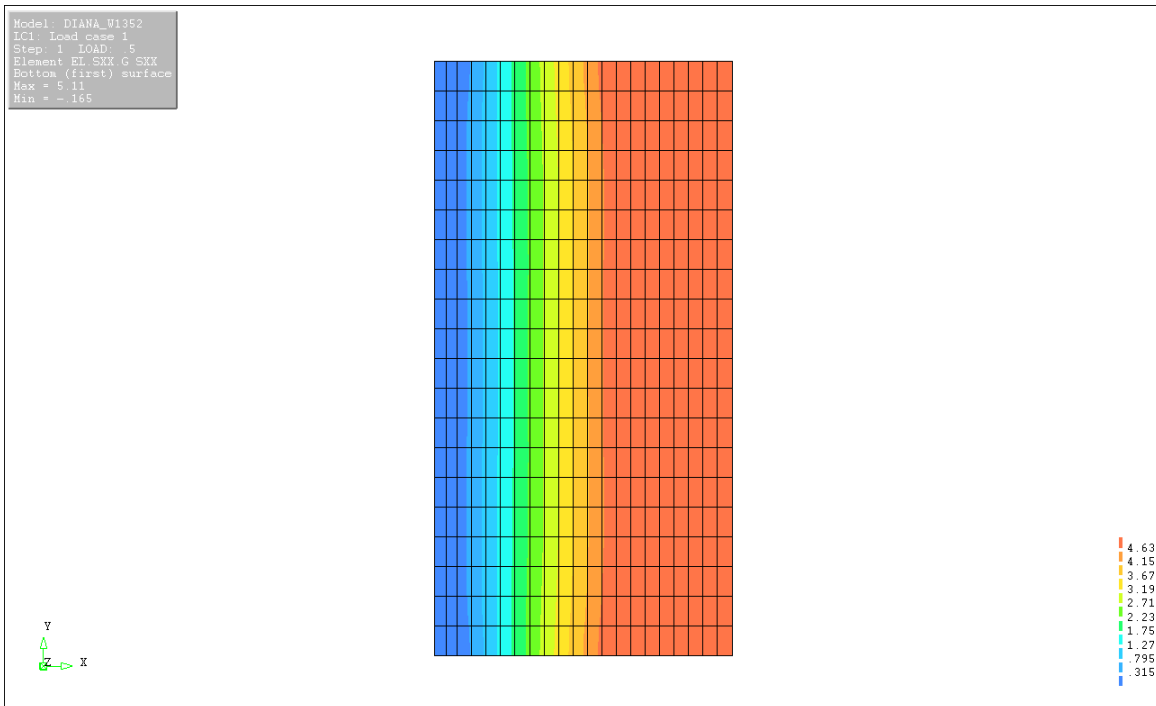


Figura 15: Tensões  $\sigma_{xx}$  na parte inferior da placa – deflexão central de 0.5 mm.

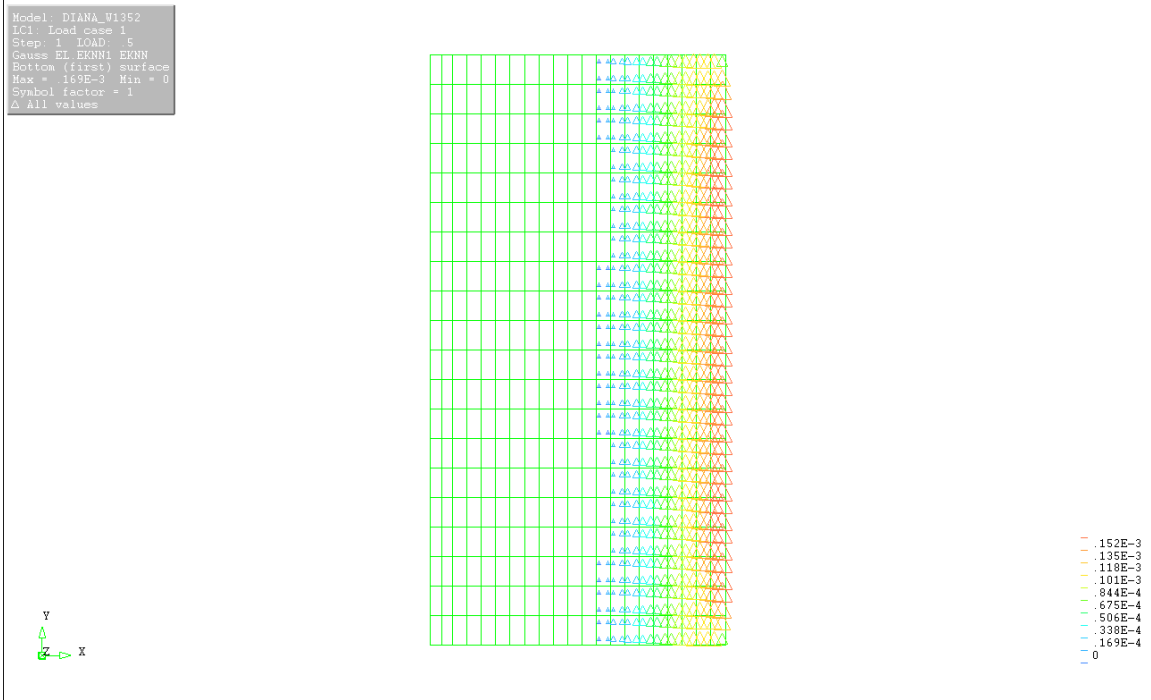


Figura 16: Deformações de fissura na parte inferior da placa – deflexão central de 0.5 mm.

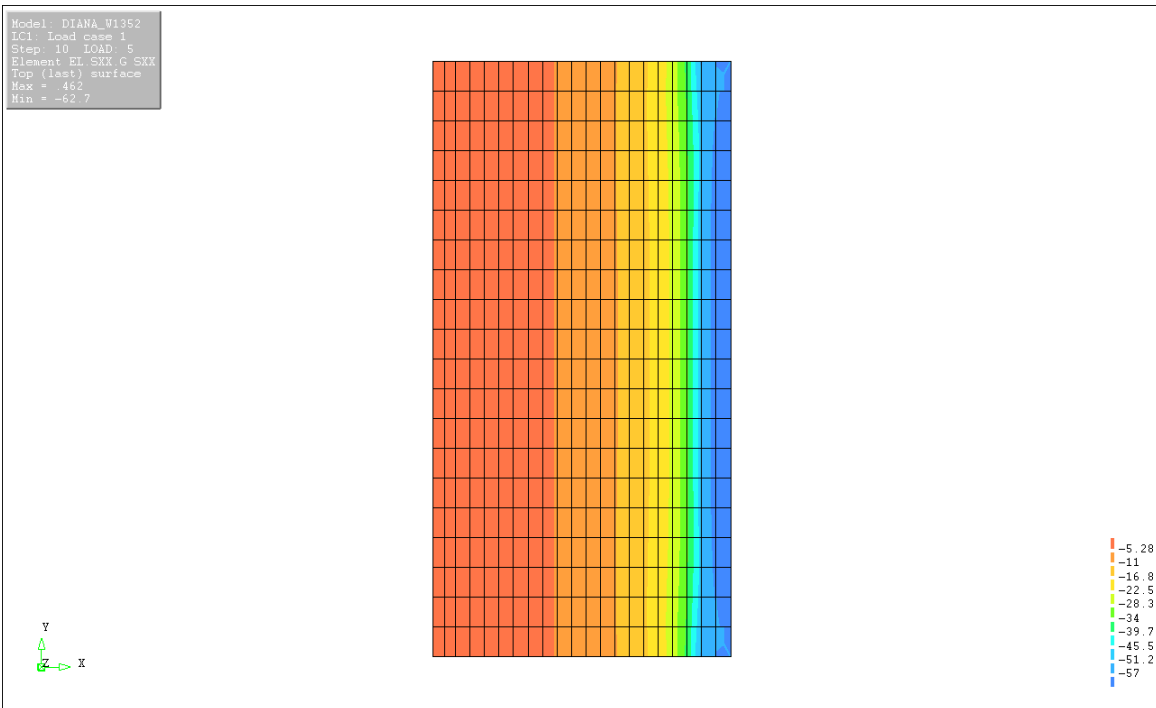


Figura 17 Tensões  $\sigma_{xx}$  na parte superior da placa – deflexão central de 5.0 mm.

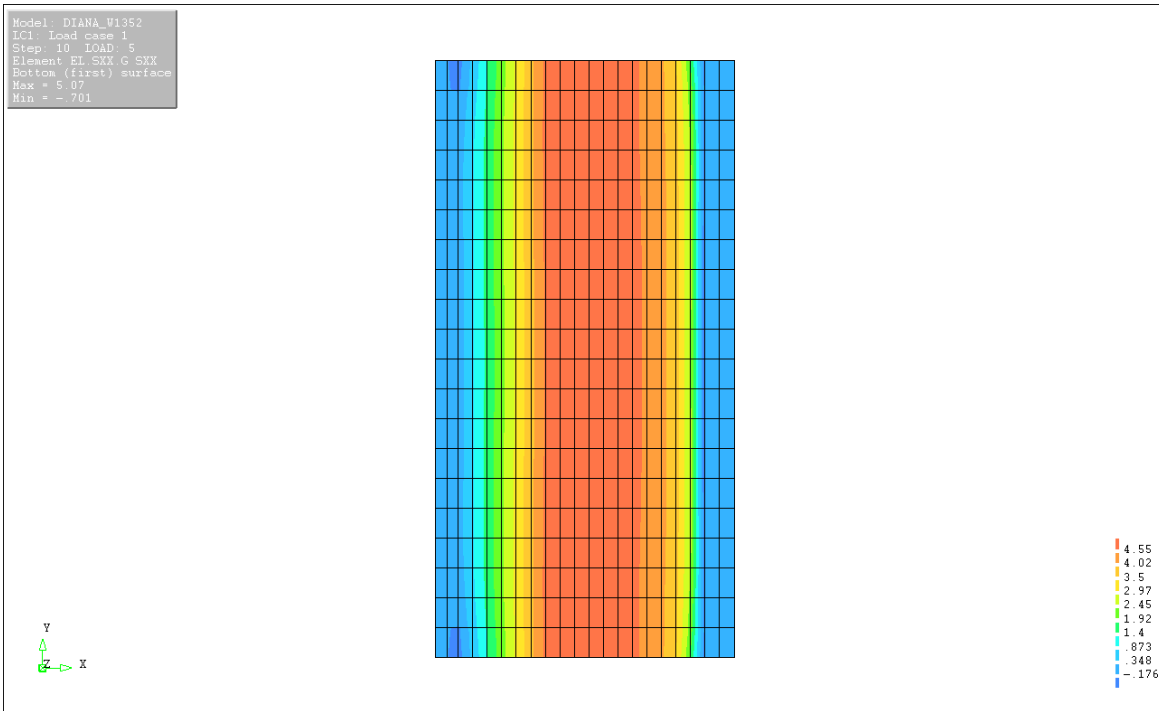


Figura 18: Tensões  $\sigma_{xx}$  na parte inferior da placa – deflexão central de 5.0 mm.

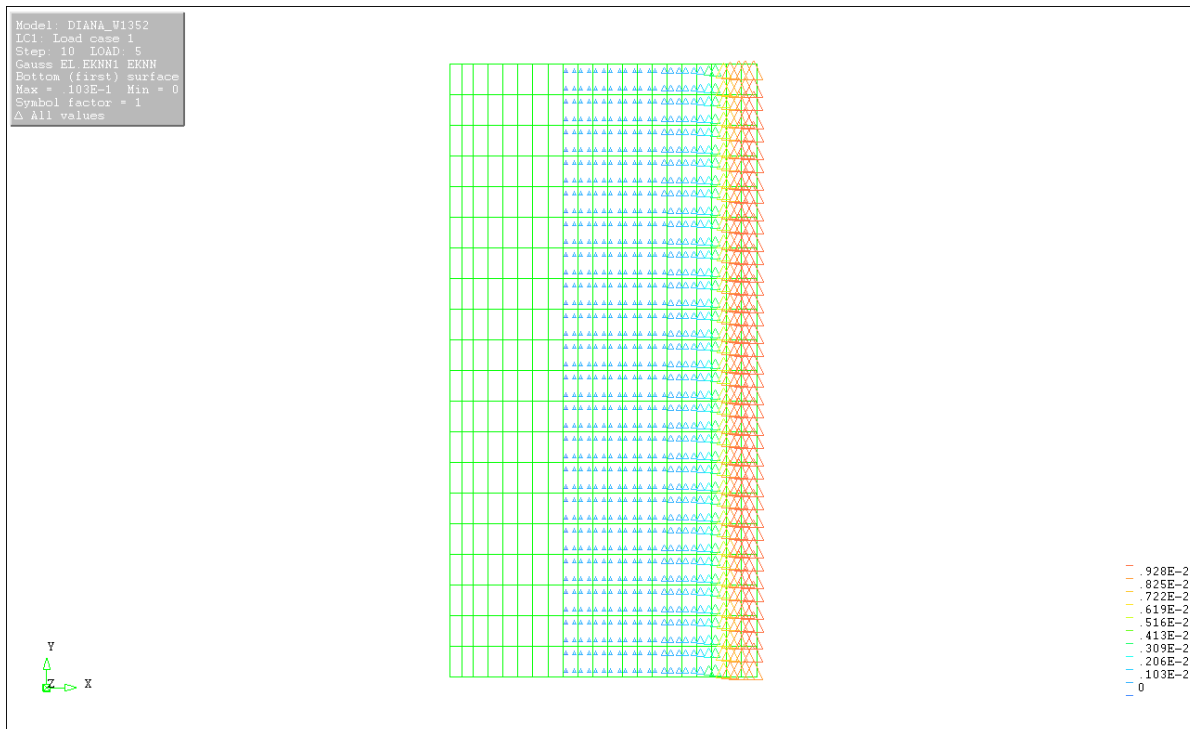


Figura 19: Deformações de fissura na parte inferior da placa – deflexão central de 5.0 mm.

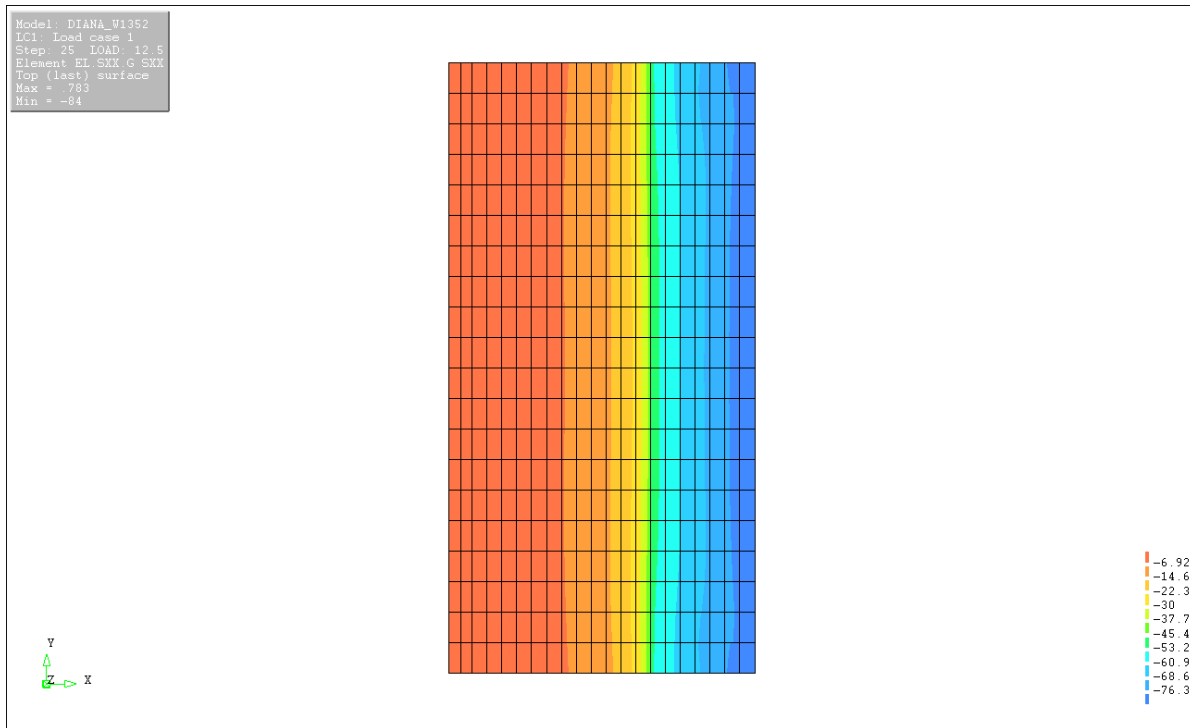


Figura 20: Tensões  $\sigma_{xx}$  na parte superior da placa – deflexão central de 12.5 mm.

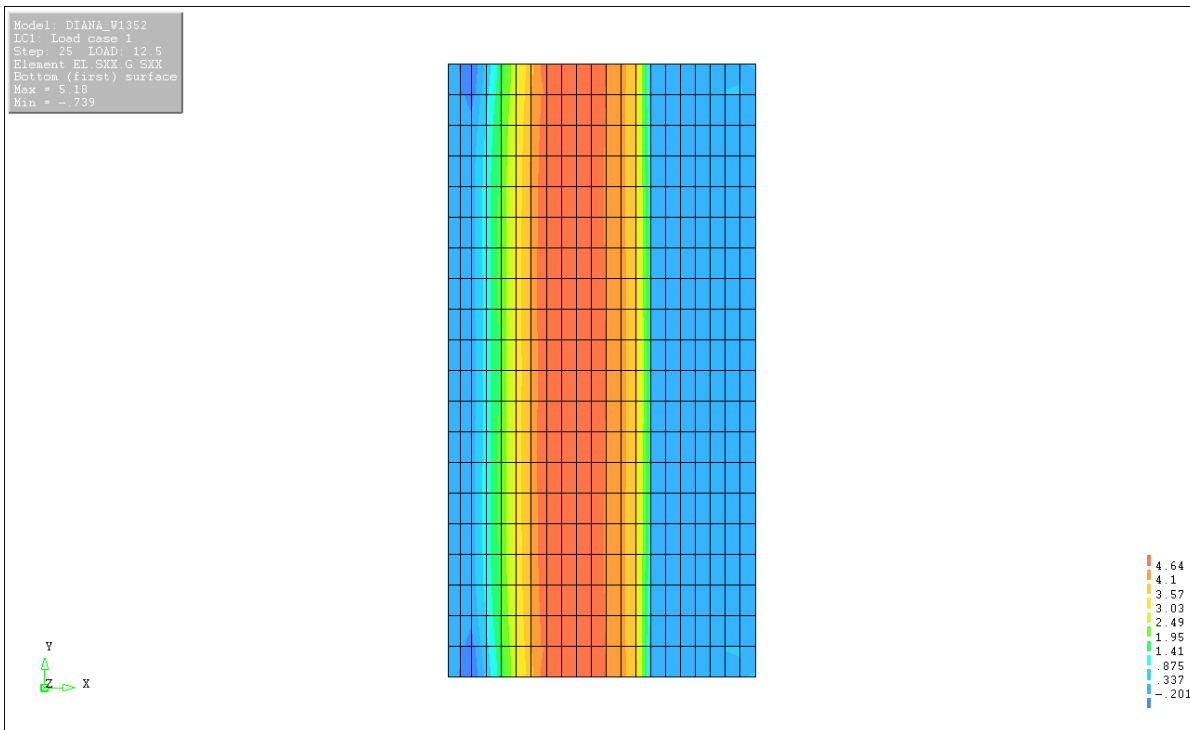


Figura 21: Tensões  $\sigma_{xx}$  na parte inferior da placa – deflexão central de 12.5 mm.

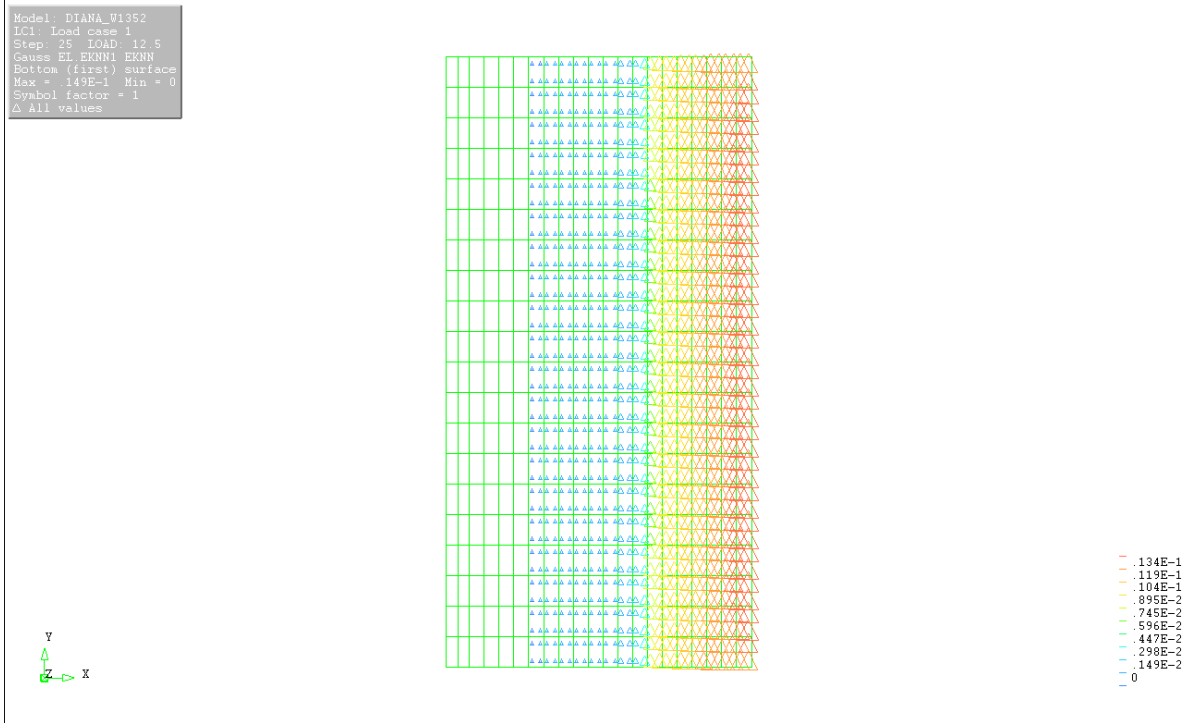


Figura 22: Deformações de fissura na parte inferior da placa – deflexão central de 12.5 mm.

A figura 23 mostra uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais com suas respectivas curvas de força x deslocamento.

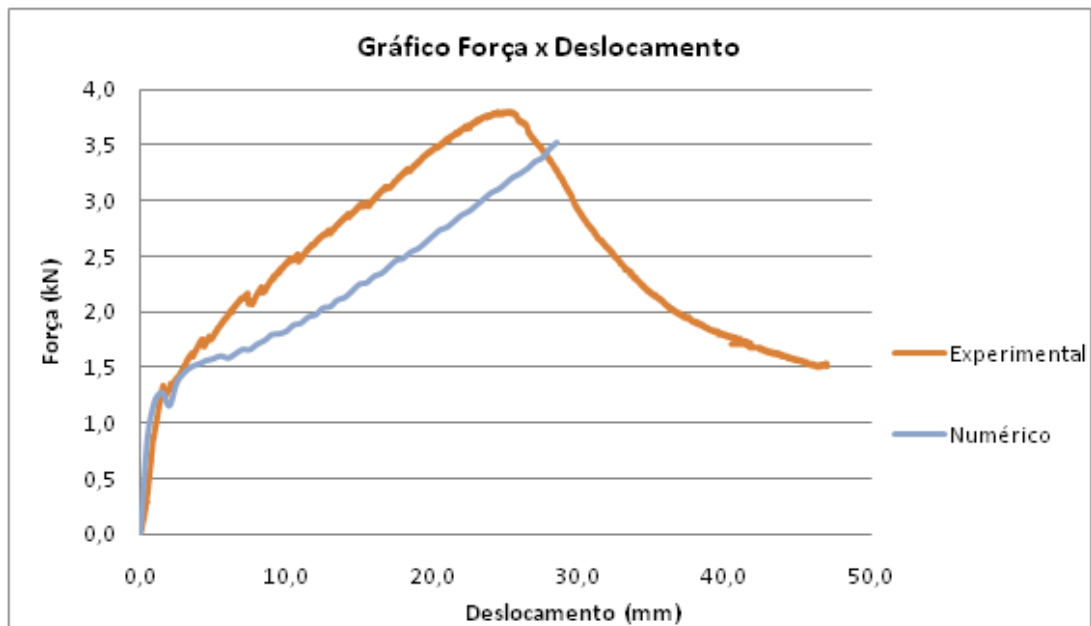


Figura 23: Curvas Força x Deslocamento - resultado numérico e experimental.

## CAPÍTULO 4. CONCLUSÕES

Com relação às tensões, os gráficos de tensão  $\sigma_{xx}$  demonstram uma tensão de compressão na superfície superior e de tração na superfície inferior, com desenvolvimento das fissuras gradativamente com o aumento da deflexão central. Aos 0.5 mm (figuras 14 e 15) as tensões na parte inferior da matriz concentram-se na área central onde a carga é aplicada. O comportamento do material nesse momento é elástico. Conforme as tensões de tração aumentam, as fissuras começam a surgir, aliviando as tensões no centro e transferindo as tensões máximas para as laterais da placa, como pode ser observado nas figuras 17, 18, 20 e 21.

Com relação ao gráfico força x deslocamento (Figura 23), pôde-se constatar que os resultados numéricos alcançados com o programa DIANA apresentaram boa correlação com os resultados experimentais de Melo Filho [1]. A curva força x deslocamento reproduz perfeitamente o comportamento esperado do compósito. Em um primeiro momento, antes de se iniciarem as fissuras o padrão é linear. Quando a matriz se rompe, o material perde rigidez e conforme as fissuras surgem, as fibras adicionam rigidez ao material.

A comparação entre as curvas experimental e numérica apresentam uma pequena defasagem, embora a inclinação de ambas seja semelhante. Assim, mostram-se necessários ajustes nos parâmetros para reduzir os desvios e aproximar os resultados.

A aquisição de mais dados experimentais pode garantir uma homogeneidade nos resultados práticos, minimizando erros de calibração no ensaio. Além disso, podem ser feitos ajustes nas condições de contorno do modelo numérico, de modo a reproduzir as condições reais dos suportes, no caso de um apoio fixo e outro móvel, condição comum em ensaios de flexão.

## REFERÊNCIAS

- [1] Melo Filho, J.A., *Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal*. Tese de M.Sc Engenharia Civil COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [2] Lima, P.R.L, Toledo, R.D., Nagahama, K.J., Fairbairn,E.M.R., “Caracterização mecânica de laminados cimentíceos esbeltos reforçados com fibras de sisal”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.11, n.6, p.644–651, Campina Grande - PB, 2007
- [3] Silva, F.A., *Durabilidade e Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios Reforçados por fibras de sisal*. Tese de D.Sc., Engenharia Civil COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- [4] Silvosso, M.M., Silva, F.A., Melo Filho, J.A., Toledo Filho, R.D., Fairbairn, E.M.R., “Inverse analysis of the tensile stress-strain curve for sisal fiber textile cement composites”. *18º Engineering Mechanics Division Conference*, 2007.
- [5] Scarponi, C., Andreotti, C., “Industrial applications of natural fibres advanced composites: environmental effects and comparative Life Cycle Analysis”. *Int. J. Materials and Product Technology*, Vol. 36, n 1/2/3/4, 241, 2009
- [6] Silva, F.A., Toledo Filho, R.D., Melo Filho, J.A., Fairbairn, E.M.R., “Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites”. *Construction and Building Materials*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030, 2009.
- [7] Farias Filho, J., Rolim, J.S., Toledo Filho, R.D., “Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. Construções Rurais e Ambiência”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, pp.437-444, Campina Grande - PB, 2000.
- [8] Toledo Filho, R.D., Gonçalves,J.P., Americano, B.B., Fairbairn,E.M.R., “Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil”. *Cement and Concrete Research*, Vol 37, n 9, pp. 1357-1365, 2007.



- [9] Silva, F.D., Mobasher, B., Toledo, R.D., “Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites”. *CEMENT & CONCRETE COMPOSITES*, Vol. 31, Issue 10, pp. 721-730, 2009.
- [10] Fairbairn, E.M.R., Americano, B.B., Cordeiro, G.C., Paula, T.P., Toledo Filho, R.D., Silvano, M.M., “Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO<sub>2</sub> emissions reduction and potential for carbon credits”. Submetido a *Journal of Environmental Management* em 2009.
- [11] Fairbairn, E.M.R., Paula, T.P., Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Americano, B.B., “Avaliação da substituição parcial de clínquer por cinza de bagaço de cana: redução de emissão de CO<sub>2</sub> e potencial de créditos de carbono”. Submetido a *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais* em 2010.
- [12] Gonçalves, J. P., Desenvolvimento e Caracterização de Concretos de Baixo Impacto Ambiental Contendo Argila Calcinada e Areia Artificial. Tese de D.Sc., Engenharia Civil COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [13] Gamino, A. L., *Modelagem Física e computacional de estruturas de concreto reforçadas com CFRP*. Tese de D.Sc., USP, São Paulo, 2007.
- [14] Naaman, A. E., *Ferrocement & Laminated Cementitious Composites*, 1 ed. Michigan, Techno Press 3000, 1999.
- [15] Rots, J.G., Nauta, P., Kusters G.M.A., Blaauwendraad J., Smeared Crack Approach and Fracture Localization in Concrete, *HERON*, v. 34 , n. 1, 1989.
- [16] DIANA Finite Element Analysis User’s Manual, *TNO DIANA BV*. 1 ed., Release 9.3, 2008.