

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

DEPARTAMENTO DE DESENVOLVIMENTO DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MICAELA FRANCESCA MORONE

**ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO COM BAMBU
NO SOFTWARE ABAQUS**

MONOGRAFIA

ARACAJU

2021

MICAELA FRANCESCA MORONE

**ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO COM BAMBU
NO SOFTWARE ABAQUS**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel, da
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do
Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. Msc. Marcílio Fabiano
Goivinho da Silva.

ARACAJU

2021

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Morone, Micaela Francesca

M868a Análise numérica de uma viga de concreto armado com bambu, no
Software Abaqus. / Micaela Francesca Morone. - Aracaju, 2021.

94 f. : il.

Orientador: Prof. Me. Marcílio Fabiano Govinho da Silva.
Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil.) - Instituto
Federal de Sergipe, 2021.

1. Bambu. 2. Sustentabilidade. 3. Análise numérica. 4. Software
ABAQU. 5. Método Concrete Damaged Plasticity (CDP). 6. Modelagem
numérica. 7. Bambucreto. I. Silva, Marcílio Fabiano Govinho da. II.
Título.

CDU 691.328



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE
Av. Jorge Amado, 1551 – Loteamento Garcia, Bairro Jardins - CEP 49025-330 – Aracaju/SE
Fone: (79) 3711 1400 – E-mail: reitoria@ifs.edu.br

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Nº 185

**ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO COM BAMBU
NO SOFTWARE ABAQUS.**

MICAELA FRANCESCA MORONE

Esta monografia foi apresentada às 17:30 h do dia 16 de abril de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. M.Sc. Rodolfo Santos da Conceição
Santos Pereira

(IFS-Campus Aracaju)

Prof. M.Sc. Euler Wagner Freitas Santos
Silva

(IFS-Campus Aracaju)

Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho da
Silva

(IFS – Campus Aracaju)
Orientador

Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa

(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

Dedico este trabalho à minha família e amigos,
por todo apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Aqui resume-se o fim de uma grande etapa, embora árdua, foi muito gratificante. Desde pequena meu sonho sempre foi o de me tornar uma Engenheira Civil, e esse sonho finalmente está próximo de se realizar, apesar dos obstáculos que apareceram durante esta jornada.

Tenho muito o que agradecer as pessoas que participaram deste caminho comigo, que me motivaram e sempre me mostraram o quanto sou capaz. Sou grata primeiramente à Deus por ter me mantido na trilha certa durante este projeto com saúde e forças para chegar até o final. A mim mesma, pela minha força de vontade e por ter lutado até o final pelo que eu sempre sonhei, mesmo quando tudo desmoronava.

Sou grata a minha família, que sempre me apoiaram da melhor maneira possível e por todo esforço que tiveram investindo na minha educação.

Aos amigos e colegas do IFS que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com espírito colaborativo. Em especial agradeço a Lucas Gabriel e Kelly que sempre estiveram me apoiando em momentos de “surto”. As pessoas especiais em minha vida, que sem elas, jamais teria conseguido passar por esta etapa com tanta alegria e sorrisos.

Agradeço a todo corpo docente do Instituto Federal de Sergipe que sempre transmitiram seu saber com muito profissionalismo. Ao meu orientador Marcilio F. G. Silva pela sua dedicação e paciência durante este projeto. Seus conhecimentos fizeram uma grande diferença no resultado final deste trabalho.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que
ninguém viu, mas pensar o que
ninguém ainda pensou sobre aquilo
que todo mundo vê.”
(SCHOPENHAUER, Arthur)

RESUMO

MORONE, MICAELA F. **ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO COM BAMBU, NO SOFTWARE ABAQUS**. 94 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2021

Devido à crescente preocupação com a sustentabilidade, tem-se focado em estudos de utilização de recursos sustentáveis, com intuito de minimizar os impactos ambientais provocados pelos materiais convencionais. Sabe-se que a construção civil é o setor com um índice de poluição elevado causando graves impactos ambientais. Sendo assim, o bambu, um recurso biodegradável e ecologicamente correto, tem se mostrado uma ótima alternativa para minimizar os efeitos provocados pelo setor, além de possuir excelentes características mecânicas, com grande potencial na engenharia civil. Dito isso, o presente trabalho tem como objetivo principal simular computacionalmente, através do método dos elementos finitos (MEF), com auxílio do software ABAQUS, e considerando a não linearidade física do concreto através do modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity (CDP)*, o comportamento de uma viga armada com bambu, analisando a viabilidade quanto seu uso de forma estrutural. Após a simulação comparou-se os resultados numéricos com os resultados experimentais de um trabalho de referência, e percebeu-se que o modelo numérico em questão é adequado para descrever o comportamento mecânico do bambucreto.

Palavras-chave: Bambu 1. Sustentabilidade 2. Modelagem numérica 3. Método dos elementos finitos 4.

ABSTRACT

MORONE, MICAELA F. **NUMERICAL ANALYSIS OF A CONCRETE BEAM WITH BAMBOO IN ABAQUS SOFTWARE**. 94 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2021

Due to the growing concern with sustainability, studies have focused on the use of sustainable resources in order to minimize the environmental impacts caused by the use of conventional materials. It is known that the construction sector has a high pollution index which causes serious environmental impacts. Thus, bamboo, a biodegradable and ecologically friendly resource, has proven to be a great alternative to minimize the effects caused by the sector in addition to its excellent mechanical characteristics, with great potential in civil engineering. Having said that, the present work has as its main objective to simulate computationally, through the finite element method (FEM), with the aid of the ABAQUS software, and considering the physical non-linearity of the concrete through the Concrete Damaged Plasticity (CDP) constitutive model, the behavior of a beam reinforced with bamboo, analyzing the feasibility as to its use as a structural element. After the simulation, the numerical results were compared with the experimental results of a reference work, and it was realized that the numerical model in question is adequate to describe the mechanical behavior of the bamboo.

Keywords: Bamboo 1. Sustainability 2. Numerical modeling 3. Finite element method 4.

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Diagrama tensão deformação específica idealizado.....	47
Gráfico 02 – Comparação entre os diagramas tensão-deformação da CEB e NBR 6118.	49
Gráfico 03 – Comportamentos à tração teorizada no CDP	53
Gráfico 04 – Comportamentos à compressão teorizada no CDP.....	53
Gráfico 05 – Diagrama tensão - deformação inelástica do concreto de acordo com os valores adotados no ABAQUS	68
Gráfico 06 – Diagrama tensão versus abertura de fissuras do concreto de acordo com os valores adotados no ABAQUS.....	69
Gráfico 07 – Diagrama Tensão x Deformação idealizado	70
Gráfico 08 – Diagrama de Carga vs descolamento do aço.	77
Gráfico 09– Diagrama de Carga vs descolamento do bambu	77
Gráfico 10 – Comparação entre os Diagrama de Carga vs descolamento do aço e do bambu.	78
Gráfico 11 – Comparação entre os Diagramas de Carga vs deformação específica da armadura longitudinal do aço e do bambu dos resultados numéricos.....	83
Gráfico 12 – Comparação entre os Diagramas de Carga vs deformação específica do concreto da viga armada com aço e a viga armada com bambu dos resultados numéricos.....	84
Gráfico 13 – Comparação entre as linhas elásticas das vigas armadas com aço e bambu.....	85

INDICE DE TABELAS

Tabela 01- Relação das espécies mais utilizadas na construção civil.....	24
Tabela 02- Valores médios das propriedades mecânicas do bambu.....	27
Tabela 03- Resistência do bambu inteiro à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em diversas partes do colmo.....	28
Tabela 04- Resistência do bambu inteiro à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em diversas partes do colmo.....	29
Tabela 05- Propriedades físicas do bambu de diversas espécies.....	31
Tabela 06- Equações de modulo de elasticidade de acordo com cada norma.....	46
Tabela 07- Dados das vigas ensaiadas por Junior, 2005.....	57
Tabela 08- Partes que formam o modelo.....	59
Tabela 09- Condições de contorno do apoio e de simetria.....	63
Tabela 10- Características gerais do concreto.....	64
Tabela 11- Parâmetros plásticos do modelo de dano com plasticidade (CDP).....	67
Tabela 12- Parâmetros para o comportamento do aço.....	70
Tabela 13- Parâmetros para o comportamento do bambu.....	71
Tabela 14- Parâmetros usados na criação de incrementos.....	72
Tabela 15- Tamanho das malhas adotados para cada parte.....	73
Tabela 16 - Comparação dos resultados numéricos com experimental dos descolamentos verticais.....	76
Tabela 17- Comportamento das vigas modeladas no ABAQUS.....	82

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Taj Mahal em ANGRA, Índia.	19
Figura 02 – Detalhes do Projeto Malabar.	20
Figura 03 – Obras de Simón Vélez na China e Colômbia..	21
Figura 04 – Protótipo de Habitação Social, ARACAJU, Sergipe..	22
Figura 05 – Morfologia externa do bambu.....	25
Figura 06 – Principal distinção da constituição dos rizomas dos bambus.....	26
Figura 07 – Normatização para bambu em ordem cronológica.....	33
Figura 08 – Tipos de vigas de concreto testadas por K. Datta em 1935 usando bambu.....	35
Figura 09 – Interação entre uma ripa de bambu não tratado e o concreto.....	38
Figura 10 – Armadura de ripas de bambu.....	40
Figura 11 – Comparação da durabilidade do reforço concreto com bambu.....	41
Figura 12 – Comportamento uniaxial típico de concretos.	42
Figura 13 –Viga de concreto	42
Figura 14 – Diagrama de momento-curvatura de seções transversais de viga.....	43
Figura 15 – Diagrama tensão deformação do concreto.....	45
Figura 16 – Sequência de modelos aplicados à viga.	50
Figura 17 – Representação em fluxograma do funcionamento do ABAQUS.	52
Figura 18 – Representação do modelo Concrete Damaged Plasticity.	54
Figura 19– Representação das dimensões da viga.	56
Figura 20 – Representação do detalhamento das armaduras da viga armada com bambu	57
Figura 20.1 – Representação do detalhamento das armaduras da viga armada com aço.....	57
Figura 21 – Planos de simetria da viga	58
Figura 22 – Partes da viga em Assembly.....	60
Figura 23 – Detalhe da armadura na parte interior da viga.....	60
Figura 24 – Esquema geral das condições de contorno e carregamento.	61
Figura 25 – Detalhe das condições de contorno e carregamento.	61
Figura 26 – Face da viga no plano de simetria Y-Z e X-Y.....	62

Figura 27 – Aplicação do contato EMBEDDED REGION.....	63
Figura 28 – Superfície de ruptura na seção transversal desviadora no CDP.....	65
Figura 29 – Função linear e hiperbólica de Druger-Prager.	66
Figura 30 – Resistência do concreto sob tensão biaxial no CDP.....	67
Figura 31 – Transformação da área	72
Figura 32 – Malha	73
Figura 33 – Fluxograma: resumo da metodologia adotada.....	74
Figura 34 – Detalhes da instrumentação utilizado por Junior (2005).....	75
Figura 35 – Descolamentos verticais da viga de concreto armado com bambu.....	76
Figura 36 – Descolamentos verticais da viga de concreto armado com aço.....	76
Figura 37 – Tensões de von Mises para a carga última.....	79
Figura 38 – Detalhamento das tensões de von Mises para a carga última.	79
Figura 39 – Dano por compressão da viga de bambu.....	80
Figura 40 – Dano por compressão da viga de aço.....	80
Figura 41 – Dano por tração da viga armada com bambu.	81
Figura 42 – Dano por tração da viga armada com aço	81

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Módulo de elasticidade
σ_s	Tensão normal no aço de armadura passiva
σ_c	Tensão à compressão no concreto
f_{ck}	Resistência Característica do Concreto à Compressão
E_{ci}	Módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal
f_c	Resistência à compressão do concreto
γ	Massa Específica (kg/l);
f_{cj}	Resistência à compressão do concreto (MPa) em “j” dias.
α_E	Parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade
E_{cs}	Módulo de deformação secante do concreto
f_{cd}	Resistência de cálculo à compressão do concreto
f_{cm}	Valor médio da resistência à compressão (f_c aos 28 dias de idade);
ν	Coeficiente de Poisson
ϵ_c	Deformação específica do concreto
ϵ_c	Deformação específica do concreto submetido à compressão
ϵ_{c2}	Deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico
ϵ_o	Deformação específica do concreto na tensão máxima
k	Número da plasticidade
ϵ_{c1}	Deformação na tensão de compressão máxima;
E_{c1}	Módulo secante desde a origem até o pico de tensão compressiva
ϵ_c^{pl}	Variável de endurecimento ligada ao mecanismo de falha sob carga de compressão
ϵ_t^{pl}	Variável de endurecimento ligada ao mecanismo de falha sob carga de tração
dc	Variável de dano à compressão
dt	Variável de dano à tração
E_{el}	Módulo tangente reduzido

ψ	Ângulo de dilatação
ϵ	Excentricidade
K	Fator de forma
μ	Viscosidade
σ_{to}	Tensão de tração no estado uniaxial;
f_t	Tração uniaxial inicial da resistência do concreto
w	Valor da abertura da fissura
w_c	Abertura crítica de fissura
d_a	Tamanho máximo do agregado
w/c	Relação água/cimento
E_b	Módulo de elasticidade da vara de bambu
ϵ_b	Deformação no bambu
ϵ_{cr}	Deformação de ruptura das varas de bambu.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVO ESPECIFICO	18
3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	19
3.1	O BAMBU AO LONGO DA HISTÓRIA E NO MUNDO	19
3.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO BAMBU	24
3.2.1	Características biológicas e morfológicas	25
3.3	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	28
3.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	31
3.4.1.1	Umidade e variação dimensional	31
3.5	NORMAS TÉCNICAS SOBRE O BAMBU	33
3.6	BAMBUCRETO: BAMBU + CONCRETO	35
3.6.1	Durabilidade do bambu inserido no concreto	41
3.7	CONCRETO	42
3.7.1	Modulo de elasticidade do concreto	45
3.7.2	Equações constitutivas para o concreto	48
3.8	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	50
3.8.1	Uma breve descrição do Abaqus	52
3.8.2	Concrete damage plasticity (CDP)	53
4	METODOLOGIA	57
4.1	CASO ANALISADO	57
4.2	CONSIDERAÇÕES DO MODELO NUMÉRICO	59
4.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO	61
4.4	CONTATO	64
4.5	MATERIAIS	65
4.5.1	Modelo Constitutivo do Concreto	65
4.5.1.1	Parâmetros plásticos do modelo de dano com plasticidade (CDP)	65
4.5.2	Modelo constitutivo aço	71
4.5.3	Modelo construtivo bambu	71
4.6	MALHA	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
6	CONCLUSÕES	87

1 INTRODUÇÃO

A busca pela sustentabilidade na construção civil tem como principal característica a preservação do meio ambiente para gerações futuras, concentrando-se principalmente no uso de materiais alternativos que possam substituir ou minimizar a utilização de elementos (materiais) convencionais que agridam seja diretamente ou indiretamente o meio ambiente. Segundo Amado Borda (2013) apesar da construção civil ter uma contribuição essencial no crescimento econômico do país, o impacto ambiental causado pela atividade é considerado uns dos maiores e negativo ecologicamente.

Atualmente existem diversas alternativas para se construir de forma sustentável, uma delas é a utilização de recursos ecológicos que envolve materiais que gerem menos resíduos poluentes, diminuam o consumo de energia e que seja facilmente reabastecido na natureza, contribuindo para conservação dos recursos naturais e manutenção de um ambiente saudável (GHAVAMI E MARINHO, 2005).

Neste contexto, entre os materiais ecologicamente amigáveis está o bambu, uma planta utilizada pelo homem desde os tempos antigos, que tem se mostrado uma alternativa interessante com grande potencial na engenharia por ser um recurso renovável, versátil, relativamente barato e de rápido crescimento, além de possuir a capacidade de retirar toneladas de gás carbônico do ar atmosférico, que de acordo com Bennetti *et al.* (2009) pode chegar a cerca de 62 toneladas de CO₂ por hectare plantado/ano e libera aproximadamente 35% de O₂, revelando-se um grande aliado na busca pela sustentabilidade com grandes vantagens ambientais, estéticas, econômicas e estruturais.

De acordo com Ferroni (2009) o bambu pode ser definido como: “um dos melhores exemplos de eficiência estrutural que a natureza pode nos fornecer”, isto se deve, principalmente pelo fato do bambu possuir características notáveis de leveza, flexibilidade, resistência, trabalhabilidade e apresentar um valor da relação entre resistência à tração e o peso específico maior do que em comparação a outros materiais (GHAVAMI, 1992). Sua característica tubular e fibras longas dispostas no mesmo sentido do comprimento é responsável pela resistência mecânica, possuindo elevada resistência a tração, sendo considerada por alguns autores próximo ao do aço, motivo pelo qual a planta é chamada de “aço verde”, além de resistir a esforços

como compressão, flexão e torção, tornando-o adequado para substituir o aço em estruturas de concreto armado, diminuindo a demanda do mesmo.

Ao redor do mundo é possível verificar estruturas, como a Big Tree Farms ou o pavilhão de bambu construído pelo arquiteto Markus Heinsdorff na Expo Shanghai em 2010, que enfatizam o quanto esta incrível matéria prima possui surpreendentes possibilidades de uso sendo possível ser utilizada como parte integrante dos sistemas construtivos atuais. (MARÇAL,2018)

Desta forma, o bambu veio para salvar o planeta da falta de recursos que existe atualmente, sendo capaz de nos proporcionar um ambiente limpo, tornando-se necessário voltar os olhos para sua utilização tanto pela sua sustentabilidade, quanto pela sua eficiência como material, tornando construções mais elegantes e leves sem alterar sua qualidade. (HAOLI, 2018)

Apesar da gramínea ser motivo de orgulho em diversos países, no Brasil, seu uso como material de construção é pouco difundido, devido a uma resistência presente no mercado pela falta de estudos mais aprofundados sobre as características físicas e mecânicas, como também pela ausência de normas técnicas brasileiras para o seu uso como elemento estrutural, que possam viabilizar sistemas executivos que garantam qualidade e segurança aos usuários.

Na literatura é possível encontrar estudos relacionados ao uso do bambu de forma estrutural, que buscam entender suas propriedades, como os trabalhos de Ferreira (2002) e Boakye *et al.* (2018), que realizaram ensaios empregando abordagens ou método diferentes para estudar o comportamento das vigas armadas com bambu, sendo as principais adotadas os testes experimentais e modelagem numérica pelo método dos elementos finitos.

Apesar de atualmente ter ao nosso dispor tecnologias que possibilitam um amplo uso do método dos elementos finitos, ainda é pouco explorado para análise e estudo de estruturas de bambucreto. Sendo assim, o presente trabalho tem o intuito de incentivar o uso do bambu como elemento estrutural, estudando-se a aplicação de varas de bambu como reforço em uma viga de concreto armado, a fim de verificar aspectos técnicos através da simulação numérica pelo método dos elementos finitos, contribuindo para essa área de conhecimento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é fazer um estudo do comportamento de vigas de concreto armado, substituindo o aço da região tracionada por varas de bambu, fazendo-se uso da modelagem e simulação numérica via Método dos Elementos Finitos (MEF), através do *software* ABAQUS, utilizando o modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP).

2.2 OBJETIVO ESPECIFICO

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a rigidez das vigas armadas com bambu e com aço através da relação entre a carga e os deslocamentos verticais;
- Realizar a análise das tensões no concreto para as vigas armadas com bambu e com aço;
- Avaliação da deformada para os modelos armados com bambu e com aço;
- Comparar os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos no trabalho experimental de JUNIOR *et al.* (2005);
- Contribuir para a viabilização do uso de um material que pode reduzir os custos de construções, trazendo benefícios ambientais e sociais.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 O BAMBU AO LONGO DA HISTÓRIA E NO MUNDO

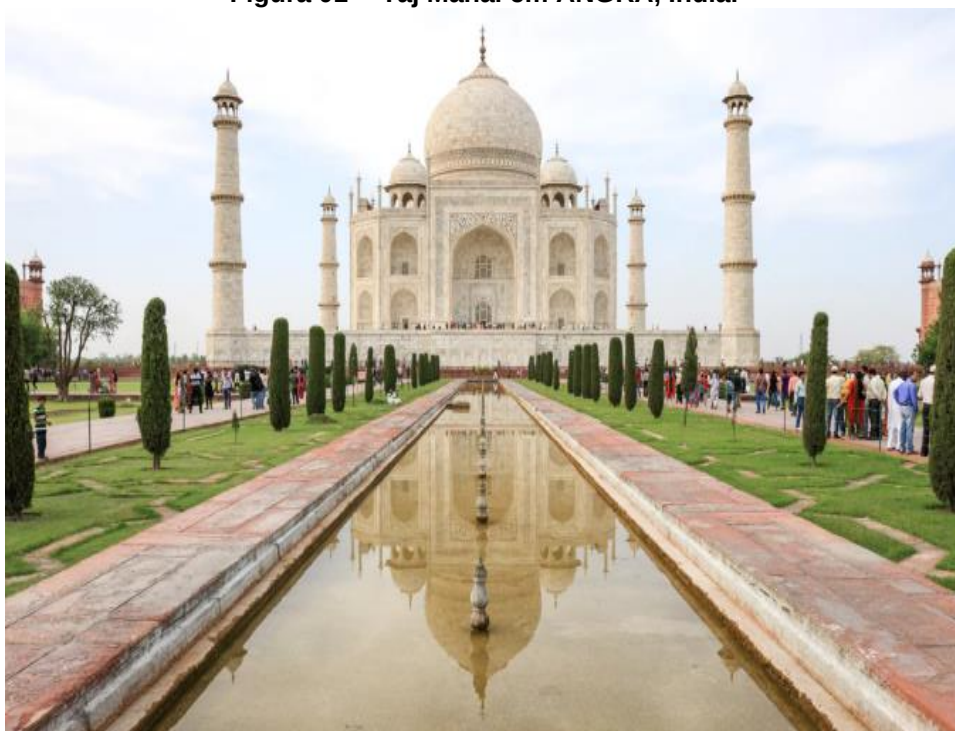
Conhecida como planta dos mil usos, o bambu faz parte da história da humanidade, desde os tempos antigos, como um grande aliado do homem, por proporcionar a produção de variados produtos, podendo ser encontrado em diversas manifestações artísticas e históricas como embarcações, utensílios, ferramentas, papel, entre outros, além de ter recebido infinitas aplicações. De acordo com Hidago (2003), a origem do nome da gramínea deu-se por conta do forte barulho provocado pelo estouro dos seus colmos quando em contato ao fogo, “bam-boo”.

Por ser uma planta que possui poucas exigências em relação aos aspectos de clima e solo, é naturalmente presente em várias regiões do planeta, sendo sua maior concentração no território asiático, considerado o seu berço, por haver uma grande aceitação da população, onde acreditam que a planta seja uma “dádiva dos deuses” (BERALDO, 2017).

Nesta região, mais especificamente na China, sua utilização é bastante difundida, dominando a arte de construção em bambu, onde faziam diversas construções, podendo ser encontrados, ainda nos dias de hoje, aplicações na arquitetura e pontes em todo o continente. De acordo Hidalgo (2003), essa relação remota entre os anos 1600 e 1100 a.c., onde os primeiros ideogramas chineses, so chamados CHU, era formado por dois talos de bambu com folhas e ramos. Desta forma, a planta representa um papel fundamental no desenvolvimento econômico rural do país, por ser aplicado de diversas maneiras, tanto em construção como em atividades diárias da população (BERALDO, 2008, apud BRAGA, *et. al.* 2011).

Destaca-se, como exemplo mais antigo de aplicação do bambu, o Taj Mahal, figura 01, considerado uma das mais importantes construções da história da humanidade, construído no século XVII, teve sua cúpula confeccionada em bambu, todavia a estrutura foi trocada recentemente por uma de aço.

Figura 01 – Taj Mahal em AGRÁ, Índia.



Fonte: Google (2019).

Em 1879, Thomas Edson produziu uma lâmpada em que foi necessário encontrar um material que fosse capaz de resistir ao calor por mais tempo, utilizando uma menor quantidade de energia. Após testar vários materiais, testou o bambu obtendo um resultado positivo, a lâmpada permaneceu acesa por 900 horas. A planta também foi usada na criação do avião 14bis, no ano de 1906, pelo brasileiro Alberto Santos Dumont. Uma aeronave constituída de alumínio com revestimento de seda japonesa e a estrutura de seu biplano de bambu (FILHO, 2005).

Ainda, de acordo com Argollo (1992), a gramínea foi utilizada nas construções militares da segunda guerra mundial como reforço ao concreto pelas forças armadas do Japão e Estados Unidos. Nesse período, existia uma preocupação com dificuldade de obtenção do aço, isso fez com que despertasse o interesse pela exploração do bambu como reforço estrutural, incentivando estudos em relação a tal aplicação.

No Ocidente, apesar de ter sido utilizada há séculos pelos indígenas nativos da região para a construção de cabanas, artefatos e alimento, a planta não recebe tanto destaque, porém em países vizinhos do Brasil, como Peru, Equador e Colômbia, a gramínea é de fundamental importância para o desenvolvimento social e econômico do país. Segundo Nunes (2005), nesses países é possível encontrar diversas aplicações do bambu, como também programas sociais que incentivem seu uso em

casas populares, resultando no desenvolvimento e/ou no surgimento de estudos e técnicas de modelos construtivos que se mostram bastante eficazes para combater as problemáticas existentes no país, como o desemprego e o *deficit* habitacional. Pode-se citar como exemplo de programa habitacional o *Projeto Malabar* (1970) na Colômbia, que foi criado com o intuito de reduzir a escassez de alojamentos urbanos existentes na cidade. O projeto teve como objetivo a construção de um conjunto habitacional de baixo custo com a utilização de materiais regionais, sendo o bambu o recurso mais utilizado. Na figura 02 é possível observar detalhes dos alojamentos do projeto Malabar.

Figura 02 – Detalhes do Projeto Malabar



Fonte: Hidalgo-López (2003).

É válido ressaltar que a Colômbia possui a melhor tecnologia construtiva em bambu do mundo, onde se pode encontrar importantes nomes, como os arquitetos Oscar Hidalgo López e Simón Vélez. Este por sua vez, tem introduzido o uso adequado do bambu na construção civil não somente na Colômbia, mas também em outros países, criando técnicas como o uso de concreto no interior dos gomos, tornando-o mais resistente à compressão, sem alterar a sua plasticidade natural. (FONSCECA, 2012). Na figura 03, é mostrado diversas obras realizadas pelo arquiteto Simón Vélez, em países como China e Colômbia.

Figura 03 – Obras de Simón Vélez na China e Colômbia.



Fonte: Google (2019).

No Brasil, o bambu como material de construção sofre preconceito por ser associado a obras sem valor, devido ao desconhecimento de suas propriedades e potencial. Deve-se isso principalmente a ideia de que recursos naturais não industrializados não possuem qualidade e durabilidade como os tradicionais, fazendo com que o mercado demonstre certa resistência ao seu uso. Porém, podem ser encontradas algumas construções em bambu, como o Memorial de Cultura Indígena, que possui sua estrutura em bambu e cobertura em fibras naturais. Em 2008, o arquiteto Ricardo Nunes, através do Instituto de Desenvolvimento Comunitário Sustentável (Incomum) em Aracaju (SE), construiu casas ecologicamente corretas (ver figura 04) com a proposta de ser uma solução para baixar o custo de novas moradias, preservando o meio ambiente, onde 70% de cada edificação era feita em bambu, como mostrado na figura 04.

Figura 04 – Protótipo de Habitação Social, ARACAJU, Sergipe.



Fonte: Ricardo Nunes (2008).

É possível perceber que o bambu mostra-se uma alternativa interessante e com grande potencial na construção civil, podendo se tornar um grande aliado na busca pela sustentabilidade, considerando-se uma alternativa viável por apresentar versatilidade, capacidade de renovação em um pequeno período de tempo, baixo custo e leveza, podendo substituir materiais como o aço e a madeira. A seguir são listadas as vantagens e desvantagens do bambu de forma geral.

Entre as vantagens do bambu, é possível citar:

- Suporta elevados níveis de tensões quando sujeito a solicitações de tração, e apesar de possuir densidade relativa baixa, o bambu é considerado um material bastante resistente.
- Tem uma estrutura que resiste muito bem a cargas dinâmicas;
- Combina flexibilidade com leveza, possuindo cerca de 1/3 da densidade do concreto;
- Abundância que leva ao baixo custo e à economia de recursos naturais.

O bambu possui algumas desvantagens, dentre elas:

- Durabilidade natural limitada, necessitando de tratamento preservativo contra o ataque de fungos e insetos;
- O posicionamento paralelo dos internós dos colmos (ver figura 05) é possível, desde que sejam utilizados colmos da mesma espécie, idade e touceira;
- Quase inexitem ferramentas desenvolvidas para o manuseio do bambu no Brasil, o que torna relativamente complexo a preparação de colmos ou taliscas para elementos estruturais;
- Falta de normatização;
- Pode contrair-se quando usado com o concreto armado.

3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO BAMBU

Considerada pela ONU como a “planta do milênio”, o bambu detém de um grande valor para a humanidade, como exposto no item 3.1, destacando-se pelo seu rápido crescimento em relação a qualquer outra planta, sem a necessidade de replantio. Por ser uma gramínea que não exige tanto do solo, possui uma extensa distribuição geográfica, havendo cerca de 1300 espécies ao redor do mundo, sendo no Brasil a maior diversidade das Américas, com aproximadamente 200 espécies (DRUMOND e WIEDMAN, 2017).

Trata-se de uma planta perene, tropical e ecologicamente correta, que dispõe de um elevado potencial com notáveis características mecânicas, físicas e químicas. Possui uma distribuição otimizada de fibras e matrizes, definido por Amada *et al.* (1997) como um compósito natural “inteligente”, que resiste a cargas ambientais da natureza. Sua natureza anatômica é responsável pelas características de resistências que o qualifica como um material para a construção civil. A seguir, na tabela 01, são apresentadas as espécies mais utilizadas neste setor de acordo com Greco (2017).

Tabela 01 – Relação das espécies mais utilizadas na construção civil

Nome botânico	Local de origem	Diâmetro (mm)
<i>Guadua Angustifolia</i>	América do sul	120-160
<i>Dendrocalamus Strictus</i> (bambu-maciço)	Ásia	25-80
<i>Bambusa Vulgaris</i> (bambu comum)	Ásia, américa do sul e África	80-150
<i>Phyllostachys edulis</i> (Mossô)	Ásia	120-180
<i>Dendrocalamus asper</i> (bambu gigante)	Ásia, América do sul	80-200
<i>Bambusa blumeana</i> (bambu espinhoso)	Ásia	60-150
<i>Gigantochloa apus</i> (bambu tali)	Ásia	40-100

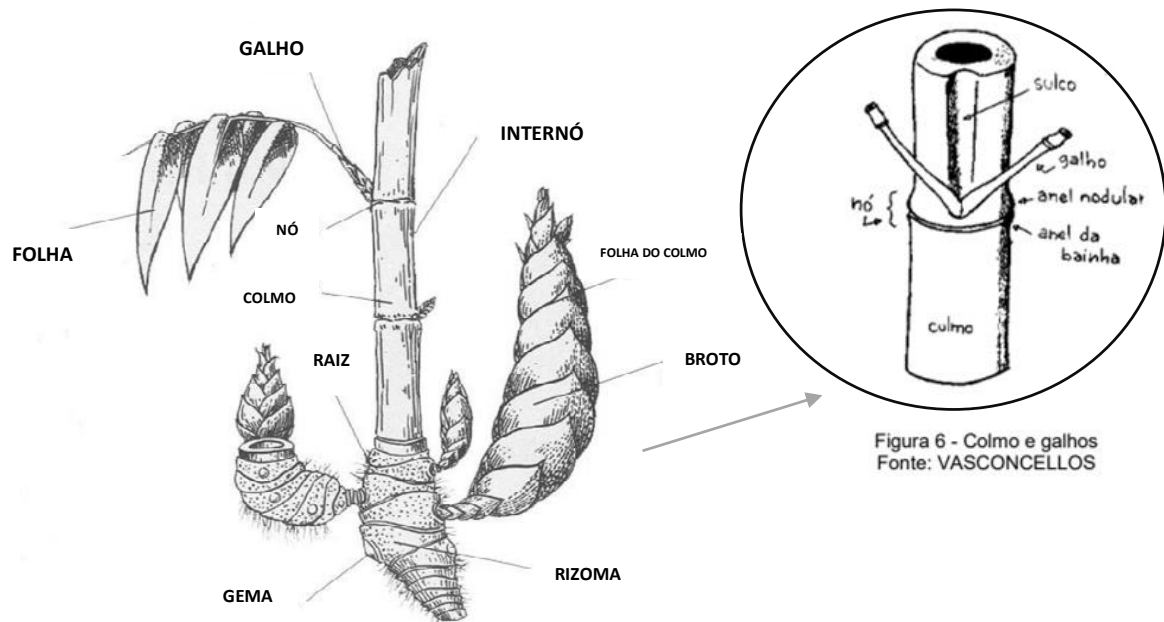
Fonte: Greco (2017).

No Brasil a maior parte dos bambus nativos são ornamentais, porém outras espécies foram trazidas e cultivadas desde o descobrimento, chamados de exóticos. Deste elenco são encontradas no Brasil as espécies *Guadua angustifolia* (*Guadua* Colombiano), *Dendrocalamus asper* (bambu gigante) e *Bambusa vulgaris* (bambu comum) (FILGUEIRAS & GONÇALVES, 2004).

3.2.1 Características biológicas e morfológicas

Botanicamente classificado como *Bambusae* da família das *Graminae* e membro das plantas lenhosas, trata-se de uma arborescente gigante e não uma árvore, como a maioria das pessoas consideram. A planta do bambu tem uma estrutura esquematizada dividida em duas partes: subterrânea e aérea. A primeira é composta por raízes e rizomas, e a segunda por colmos lenhosos, folhas e ramificações, como mostrada na figura 05 (HIDALGO-LÓPEZ, 2003).

Figura 05 – Morfologia externa do bambu.



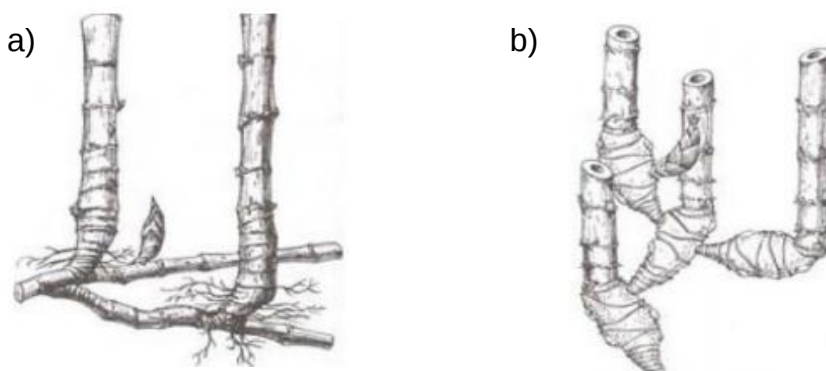
Fonte: Adaptado de Spolidoro (2008).

Estruturalmente é composto por um sistema de segmentos vegetativos, que formam nós e entrenós variando de espécie para espécie, sendo o rizoma responsável pela morfologia do caule e dos ramos.

O **rizoma** é um sistema subterrâneo complexo com nós que reúne importantes funções na vida da planta, responsável tanto pelo crescimento dos colmos, assim como pela sua reprodução (vegetativamente ou assexuadamente) e pelo armazenamento e distribuição de nutrientes, ou seja, é possível dizer em outras palavras: uma fundação para o sistema estrutural da planta. Pode ser classificado em dois tipos: paquimorfo ou simpodial (figura 06a.), que crescem em zonas tropicais desenvolvendo-se em touceiras, o que chamamos de "bambuzal", são deste tipo os gêneros *Guadua*, *bambusa* e *Dendrocalamus*. E leptomorfo ou monopodial (Figura 06b.) são alastrantes e crescem em zonas temperadas compreendendo o gênero *Phyllostachys*.

Figura 06 – Principal distinção da constituição dos rizomas dos bambus.

a) Alastrantes (Paquimorfos) b) Bambus entouceirantes (Leptomorfos).



Fonte: Spolidoro (2008).

Na parte aérea encontram-se os colmos, parte mais importante do bambu, uma vez que é a parte que é utilizada na estrutura, geralmente ocos com paredes espessas, que dependem do rizoma para o seu crescimento e robustez, detendo de um formato ligeiramente cilíndrico e subdivididos por seção em diafragmas que conferem a planta grande flexibilidade e resistência, também fornecem maior rigidez permitindo-lhe que suporte ação do vento e peso próprio. Na parte externa os colmos aparecem como nós dispostos em uma sequência de entrenós (seção entre dois nós), de onde sai as folhagem e ramificações, como mostrado na figura 05. O diâmetro dos colmos varia de espécie pra espécie, sendo que alguns podem chegar a 30 centímetro de diâmetro e 40 metros de altura (PADOVAN, 2010).

De acordo com Ferreira (2007), a parte externa do colmo é formado por duas camadas de células epidermes. Internamente possui uma camada mais espessa e altamente lignificada, constituída de numerosas células esclerenquimáticas (fibras), dificultando qualquer movimento lateral de líquidos.

De acordo com Ghavami (2000), a microestrutura do bambu pode ser definida como um compósito composto por fibras compridas dispostas de forma alinhada, possuindo celulosas imersas em matriz de lignina, formado por fibras (40%), células parenquimosas (50%) e vasos (10%). Os feixes de fibras do bambu se concentram em maior quantidade à medida que se aproximam da parte externa, cerca de 80%, tornando o bambu resistente às cargas do vento, solicitação mais constante durante a vida do material na natureza.

3.3 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Como ressaltado anteriormente, o bambu é uma matéria-prima que possui propriedades mecânicas coadunáveis às dos materiais utilizados como reforço de concreto armado (LIMA JR *et al.*, 2000). Porém alguns autores destacam a falta de padronização nos ensaios para determinação de características físicas e mecânicas do bambu, que tem levado a tendência de adotarem suas próprias metodologias, o que torna bastante difícil a comparação de resultados.

Liese (1998) diz que devido a planta ser anisotrópica, as propriedades mecânicas variam em diferentes direções e ângulos em que a força é aplicada em relação à fibra.

De acordo com Janssen (1981), para que se possa determinar as propriedades mecânica do bambu deve-se saber a espécie botânica, idade e quantidade de umidade, pois estes são os principais fatores que podem influenciar nas suas características mecânicas. Pelo fato do material ser utilizado no seu estado natural, deve ser considerada também a distância entre nós e entrenós, dimensões irregulares, formato dos colmos e presença ou ausência de nós, para que se tenha resultados com menor variabilidade e maior confiabilidade.

Pereira, Beraldo & Zoulalian (1995) sugerem, para fins de cálculo das propriedades mecânicas do bambu, adotar os valores médios citados na tabela 02.

Tabela 02— Valores médios das propriedades mecânicas do bambu.

Tipo de resistência	Valores médios a serem adotados
Tensão resistente à compressão (C)	50 a 90 MPa;
Tensão resistente à tração (T)	2,5 a 3,5 vezes sua resistência à compressão
Tensão resistente à flexão (F)	70 a 150 MPa.

Fonte: Adaptado de Pereira, Beraldo & Zoulalian (1995).

A resistência à compressão do bambu varia dependendo da direção de aplicação da carga, visto que solicitações paralelas à disposição das fibras aumenta a capacidade de resistência, além disso, a compressão axial quase um terço do valor da resistência à tração axial.

O formato tubular dos colmos provoca momentos de inércia similares em relação aos dois eixos (x e y) que favorece a aplicação como barra sujeita a solicitações de compressão (RADASKIEVICZ, 2016).

Ghavami e Marinho (2005) verificaram através de ensaios realizados com colmos inteiros da espécie *Guadua angustifolia* (Tabela 02), que a resistência a compressão nas regiões dos nós é menor, e que existe uma diminuição gradual, no sentido da base para o topo no diâmetro do colmo, na espessura da parede e no comprimento intermodal, fazendo com que os valores sejam variáveis dependentes da região na qual a solicitação é empregada. Além disso, depende em qual direção a carga será aplicada, se uma carga de compressão é aplicada paralelamente à fibra, os valores da resistência das seções do colmo, que possuam os nós, são cerca de 8% superiores às seções sem os nós. (DULKELBERG, 1996, *apud* PADOVAN, 2010).

Tabela 03— Resistência do bambu inteiro à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em diversas partes do colmo.

Seção do bambu	Resistencia à compressão σ_c (MPa)	Módulo de elasticidade E (GPa)	Coef. Poisson (μ)
Base sem nó	28,36	14,65	0,27
Base com nó	25,27	9,00	0,56
Centro sem nó	31,77	12,25	0,36
Centro com nó	28,36	12,15	0,18
Topo sem nó	25,27	11,65	0,36
Topo com nó	31,77	15,80	0,33
Valor médio	29,48	12,58	0,34
Variação	25,27 - 34,52	9,00 - 15,80	0,18 - 0,56

Fonte: Ghavami e Marinho (2005).

Através da tabela é possível notar que o valor médio de compressão foi de 29,48 MPa, apresentando os maiores valores no topo e centro da seção do bambu. O mesmo ocorre com o modulo de elasticidade, que possui valor médio de 12,58 MPa, com maior valor no topo de 15,80 MPa.

Ferreira (2002) realizou ensaios com corpos-de-prova de 1 cm x 2 cm de seção transversal e 6 cm de comprimento com o bambu Gigante (*Dendrocalamus giganteus*) obtendo valores de resistência a compressão de 77,8 MPa.

Lima Jr *et al.* (2000) confeccionaram 20 corpos de provas da região intermodal e 20 da região nodal para o ensaio de compressão paralela às fibras. Obtiveram resistência à compressão de 56,65 MPa e módulo de elasticidade de 20 GPa, nos ensaios realizados com corpos de provas com nós. Nos sem nós, encontraram valores de 21,88 GPa e 57,99 MPa.

O bambu possui elevada resistência à tração devido a orientação principal longitudinal dos seus feixes fibrovasculares. De acordo com Pereira e Beraldo (2008), em algumas espécies esta resistência pode chegar a 370 MPa, mas de forma geral varia de 40 a 215 MPa.

Culzoni (1986), cita que a estrutura fibrosa em forma de feixes favorece a resistência a esforços de tração axial, mas quando solicitado axialmente, dificilmente romperá por tração pura.

No estudo realizado pelos autores Ghavami e Marinho (2005), obtiveram-se valores variados em função do local onde foi aplicada a solicitação, tendo rompimento por tração na região dos nós ou próxima a ele, como mostrado da tabela 04:

Tabela 04 – Resistência do bambu inteiro à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em diversas partes do colmo.

Seção do bambu	Resistencia à tração σ_t (MPa)	Módulo de elasticidade (Mpa)	Coef. Poisson (ν)
Base sem nó	93,38	16,25	0,19
Base com nó	69,88	15,70	-
Centro sem nó	95,80	18,10	0,25
Centro com nó	82,62	11,10	-
Topo sem nó	115,84	18,36	0,33
Topo com nó	64,26	8,0	-
Valor médio	86,96	14,59	0,26
Variação	64,26-115,84	8,0-18,36	0,19-0,33

Fonte: Ghavami e Marinho (2005).

Analisando-se a tabela 04, é possível perceber que o bambu apresentou uma diminuição da resistência a tração nas regiões que detém nós. Isso ocorre devido a descontinuidade das fibras, visto que, segundo Ghavami e Marinho (2005), nessa área, vários tipos de células possuem diferenças consideráveis em relação às células do internó, são frequentemente deformadas, curtas e pequenas.

3.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

A propriedade física que tem maior influência sob as propriedades mecânicas é a massa específica aparente por unidade de volume. Liese (1998) cita que a massa aparente do bambu pode variar entre 500 a 800 kg/m³, aumentando da parte interna para parte externa do colmo, dependendo da quantidade e distribuição dos aglomerados de fibras em volta dos feixes vasculares.

Algumas espécies tem se mostrado com resistência superior à compressão e flexão na parte superior do colmo. O topo do colmo possui vasos condutores menores, porém em maior quantidade com uma cobertura crescente de fibras havendo, conseqüentemente, maior massa específica aparente (HIDALGO, 2003).

Sharma & Mehra (1970) apud Hidalgo-López (2003), comentaram que apesar da região dos nós possuir uma massa específica aparente maior do que a região dos internos, as resistências à flexão, à compressão e ao cisalhamento tendem a serem menores.

3.4.1.1 Umidade e variação dimensional

Semelhante à madeira, o bambu possui a capacidade de absorver umidade do ambiente. O teor de umidade do colmo de bambu jovens varia de 40% a 150%. Barbosa (1991), apud Júnior (2010) em seu trabalho deparou-se com valores para absorção de água do bambu *Dendrocalamus Giganteus*, nas primeiras 24 horas, de 25,1 %, já para o *Bambusa Vulgaris* obteve um valor em torno de 25,7%.

O teor de água do colmo possui maior valor na base do que na parte superior, assim como a capacidade de retenção de água também varia com a posição longitudinal, isto ocorre, devido ao fato de existir maior presença de células parenquimáticas higroscópicas na espessura da parede na parte inferior. A perda de

umidade na direção transversal às fibras é restrita, pois possuem uma impermeabilidade produzida pela casca do bambu (BERALDO, 2017).

De acordo com Beraldo *et al.* (2003), o teor de umidade está diretamente relacionado a estabilidade dimensional, conseqüentemente as propriedades mecânicas variam ao longo da seção do colmo do bambu. O autor comenta que o teor de umidade de bambu recém cortado é por volta de 80%, podendo variar de acordo com a idade, período do corte e parte escolhida do bambu para efetuar os ensaios. Logo após, é necessário fazer a secagem ao ar livre para que se atinja a umidade de 10% a 15 %.

Em seu estado seco, o bambu adquire uma grande capacidade de absorver água, fazendo com que ocorra expansão. Estas variações dimensionais ocorrem principalmente por causa da rápida absorção e da liberação lenta da água, em virtude de o bambu ser material higroscópico, quando em contato com o meio úmido ocorre o afastamento das células sofrendo variações nas suas dimensões (FERREIRA, 2002).

Pereira e Beraldo (2007) perceberam que as ripas de bambu possuem variação dimensional linear no sentido radial na ordem de 3%; no sentido tangencial a variação é maior, cerca de 5 a 6 %. A retração para o sentido axial é desprezível, com uma variação volumétrica média da ordem de 9%. Na tabela 05, são apresentados valores de propriedades físicas para várias espécies de bambu.

Tabela 05 –Propriedades físicas do bambu de diversas espécies.

Bambu	Massa específica (kN/m^3)			Variações dimensionais (%)			
	Saturado	Seco	anidro	Radial	Tangencial	axial	volumétrica
Nome botânico							
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	1110	790	760	5,5	6,2	0,5	12,6
<i>Bambusa Vittata</i>	1210	570	560	9,1	7,5	0,4	17,8
<i>Bambusa tuloides</i>	1100	660	650	11,7	8,9	0,4	22,2
<i>Phyllostachys purpuratta</i>	1150	590	590	9,8	8,0	0,5	19,2
<i>Phyllostachys sp</i>	1080	600	580	6,9	6,7	0,6	14,8
<i>Phyllostachys viridis</i>	1090	750	730	8,0	8,01	0,4	17,1

Fonte: Beraldo e Zoulalian (1995).

Tendo em vista o que foi mencionado, o bambu possui uma grande fragilidade quando exposto a umidade, afetando sua resistência. Portanto, se faz necessário realizar o processo de secagem de forma controlada e tomados os devidos cuidados na associação com outras matérias, como o concreto, além da utilização de impermeabilizantes eficientes que possam minimizar o fenômeno de variação dimensional impedido que a peça sofra fissuras facilmente.

3.5 NORMAS TÉCNICAS SOBRE O BAMBU

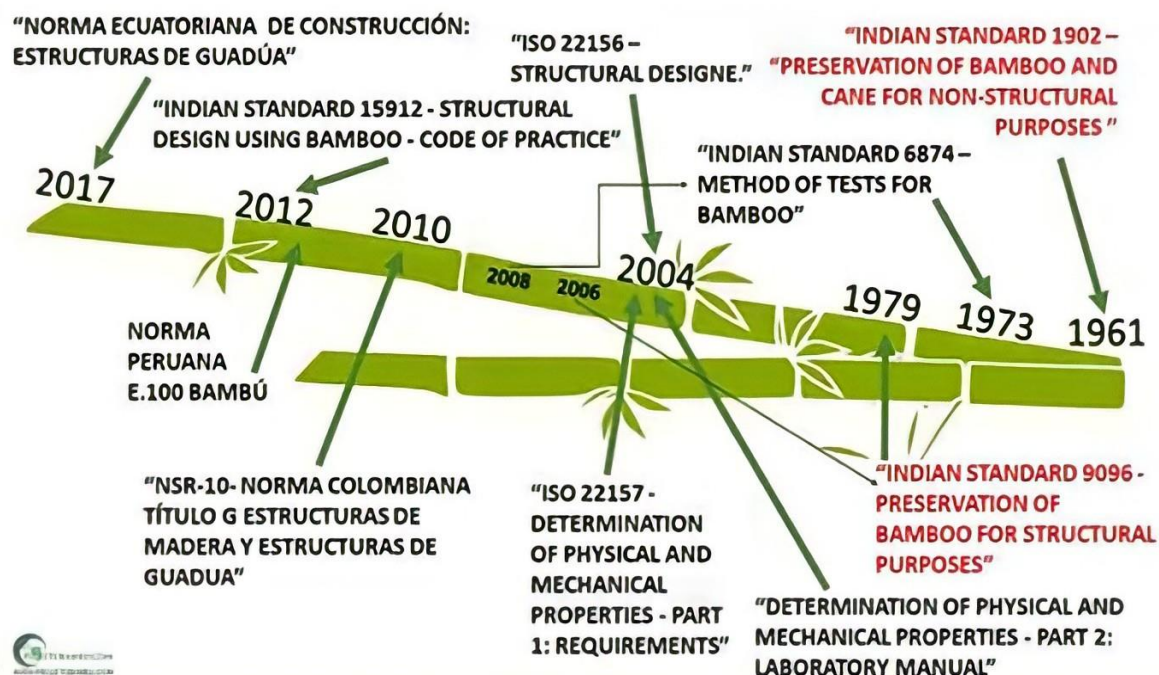
Diferente de outros materiais da construção civil, o bambu não possui especificação técnica para seu uso no Brasil, acarretando na falta de informações e estudos mais profundos sobre sua potencialidade física e mecânica, o que dificulta os construtores e projetistas na execução, além de confiança quanto ao seu uso, existindo o preceito de que o bambu é um recurso frágil, que se desgasta rapidamente ao longo do tempo, podendo ser utilizado somente em construções temporárias.

Apesar disso, o bambu já vem sendo utilizado na execução de diversas obras estruturais de pequeno a grande porte, o que torna de fundamental importância sua regulamentação e normatização para o uso na construção civil, para que se traga aos eventuais usuários uma maior segurança e padronização nos processos, viabilizando sua utilização. (MARÇAL 2018).

Ainda segundo Marçal (2018), é possível encontrar um grande número de normas técnicas internacionais, como também normas para colheita, tratamento, secagem e industrialização desse material, já que alguns países possuem amplo conhecimento sobre o bambu, como Índia e China. E na região da América do Sul, Equador, Colômbia e Peru, onde é bastante disseminada a utilização deste recurso em construções de habitações e também em construções de maior porte.

Nos últimos anos, cada país tem criado sua própria normatização (figura 07), baseando-se em conhecimentos locais em construções de bambu, sendo as normatizações mais importantes a Colombiana, Peruana e, também, a norma internacional (ISO). Vale ressaltar que, as normas de países como Colômbia e Peru, são bem completas, pois levam em consideração não somente os ensaios físicos mecânicos, mas apresentam diretrizes do uso do bambu das mais variadas formas e situações (MAÇAL, 2018).

Figura 07 – Normatização para bambu em ordem cronológica.



Fonte: Marçal (2018).

Sendo a primeira norma internacional a ser criada, a ISO 22156 - Structural Design tornou-se base de inspiração das normas lançadas posteriormente, porém mostra-se insuficiente para viabilizar e estimular o uso do bambu em grande escala, principalmente pela inópia nos detalhes de dimensionamento do bambu, necessitando-se de expansão e desenvolvimento de novas tecnologias para sua utilização de forma estrutural. Gatoó (2014) ainda acrescenta que é necessário que estas normas sejam similares a aplicadas à madeira facilitando comparações para os testes e caracterização entre os dois materiais, incentivando o mercado para seu uso. Sendo assim, torna-se claro que é necessário o desenvolvimento de normas e códigos mais detalhadas adaptadas de acordo com as condições de cada região (espécies, limitações e modelos de cálculos) que regulamentem seu uso.

Segundo Melo (2010) *apud* Marçal (2018) é de suma importância a normatização de materiais de construção para que se possa efetuar seu uso de forma consciente, com mais segurança e economia, trazendo uma maior confiabilidade nos resultados obtidos em ensaios, já que estas trazem orientações e asseguram a qualidade.

Devido à falta de normatização no Brasil para a realização de ensaios, muitas das vezes, são realizadas adaptações e interpretações com as normatizações que

melhor representam o comportamento do material, neste caso, é feito o uso da NBR 7190, 1997 sobre projetos de estruturas de madeira.

Vale a pena ressaltar, que a ABNT (2018) publicou o boletim 161 sobre a possível elaboração de uma norma técnica com a seguinte afirmação:

O bambu, um elemento natural, leve, bonito, resistente, renovável e cuja produção não exige, praticamente, gasto energético, será em breve mais um tema no acervo da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2018).

Desta forma, o cenário da construção civil tende a mudar, tendo uma maior aceitação do mercado para a utilização deste recurso e, conseqüentemente, o surgimento de um maior número de estudos que possam vencer algumas problemáticas existentes, como a carência de tratamentos eficazes que garantam a manutenção e durabilidade do mesmo.

3.6 BAMBUCRETO: BAMBU + CONCRETO

O concreto é um material que possui alta resistência à compressão, conforme dito no segundo parágrafo do item 3.7, contudo, ele necessita associar-se a um material que resista à tração e que seja dúctil, sendo o aço o material tradicionalmente usado para esse fim. Porém, sabe-se que o aço é um dos maiores agentes poluidores do setor da construção civil, visto que ele consome grandes quantidades de energia fóssil e fontes não renováveis, além de liberar gases que contribuem para o efeito estufa (SILVA 2006 *apud* FERREIRA, 2007). Desta forma alguns pesquisadores voltaram os olhos para o bambu por ser um material resistente, flexível e com baixa energia por unidade de tensão (comparado com o aço), mostrando-se uma alternativa com grande possibilidade de substituir ou reforçar o aço utilizado na armação do concreto, esta união foi batizada de “bambucreto”.

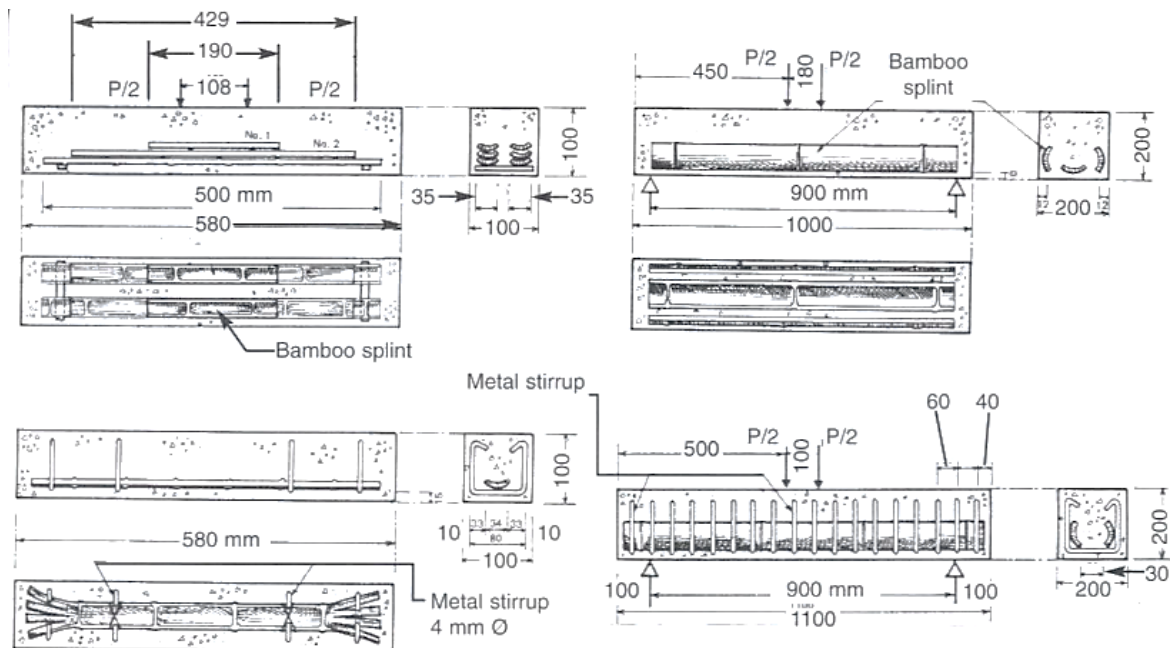
O estudo da resistência do bambu como reforço de concreto remota ao ano de 1914, quando H. K. Chow realizou as primeiras experiências utilizando bambus de pequenos diâmetros e talisca como reforço, também foi um dos primeiros a estudar sobre sua resistência. Também é importante destacar os estudos realizados por K. Datta em 1935, que teve como objetivo analisar vigas de concreto armadas com bambu, utilizando estribos de aço, nos quais obteve resultados satisfatórios, concluindo que vigas de concreto armadas com bambu, não possuem resistência inferior a de uma viga de concreto de mesma área transversal, pelo contrário,

possuíam maior resistência e maior flexibilidade, concluindo que o uso do bambu como reforço nas zonas tracionadas das vigas de concreto armado era vantajosa. Vale ressaltar, que a indústria metalúrgica evoluiu bastante desde a sua criação, de modo que atualmente existem aços com resistências bem superiores à daqueles empregados nos primeiros elementos de concreto armados com aço.

Um dos estudos mais extensos e considerado dos mais importantes foi realizado por H.E. Glenn, em 1950, no The Clemson Agricultural College of South Carolina, que consistiu na construção de edificações com estruturas experimentais utilizando bambu como reforço de fundações, paredes, vigas e lajes. A figura 08 mostra os detalhes de um dos protótipos, as dimensões dos elementos estruturais e o reforço de bambu utilizados por K. Datta (HIDALGO, 1974).

Diante disso, foram surgindo estudos em diferentes regiões, principalmente por alunos de escolas de engenharia de diferentes universidades das Américas, Ásia e inclusive da Europa, mesmo não possuindo espécies nativas, tornando a utilização do bambu como reforço do concreto um dos temas que possui maior abrangência e crescente aumento no número de pesquisas com o intuito de buscar soluções que torna seu uso viável na construção civil.

Figura 08 –Tipos de vigas de concreto testadas por K. Datta (1935).



Fonte: Hidalgo (2003).

Resumo das conclusões do estudo de vigas de concreto realizadas por H.E, Glenn (1944):

- Vigas de concreto com reforço de bambu longitudinal podem ser dimensionadas para suportar com segurança cargas de duas a três vezes maior do que o esperado para barras de concreto com as mesmas dimensões e sem armadura.
- Usar colmos de bambu maduros entre três a cinco anos de idade, isto é observado pela coloração do mesmo. O corte deverá ser feito quando o bambu apresentar cor marrom-amarelada;
- Quando o bambu seco foi usado como armadura longitudinal do concreto, inchou devido a absorção de umidade e essa expansão muitas das vezes causou fissuras longitudinais no concreto, principalmente em locais com uma porcentagem alta de reforço, diminuindo assim a resistência de viga.
- Os colmos de bambu a serem utilizados devem ter um período de secagem de 3 a 4 semanas, para que possam apresentar 15% de umidade.
- O valor da tensão de aderência entre as taliscas de bambu e o concreto é aproximadamente de 0,50 MPa.
- As taliscas de bambu usadas como reforço de concreto devem ter largura máxima de 19 mm.

Hidalgo (2003) cita em sua obra três métodos de utilizar bambu como reforço do concreto, o primeiro consiste no uso de tiras ou talas de bambu obtidas através de bambus gigantes, o segundo utilizando colmos de bambu de pequenos diâmetros e por último, o método desenvolvido pelo próprio autor em 1974, que faz uso de cabos de bambu. Destes três métodos, o mais eficaz é o de cabos de bambu que apresenta maior aderência em relação aos outros métodos, onde nos testes chegaram a valores de cerca de 1,8 MPa. Estes cabos podem ser confeccionados de duas maneiras: por

torção de três ou mais cabos ou em forma de trança, com medidas de 2 cm de largura e 3 mm de espessura cada.

De acordo com Ferreira (2007) o bambu deixa mais leve a estrutura, levando o peso próprio a tornar-se uma parcela considerável no carregamento com materiais mais densos, como o concreto, reduzindo o peso e o custo da obra. Fatores como peso específico, teor de umidade e absorção de água são características físicas que tem elevada influência sobre a utilização do bambu de forma estrutural.

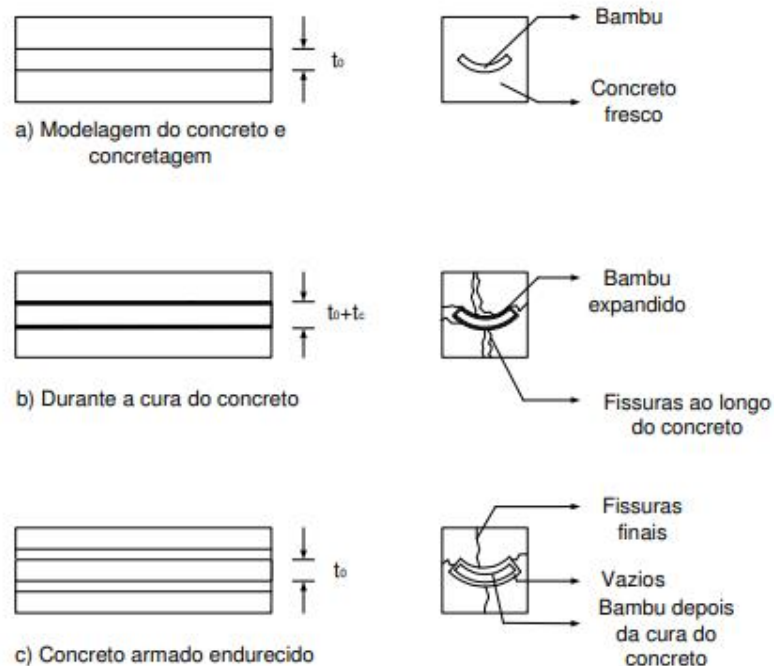
Estudos realizados na Universidade Estadual de Campinas, por Ferreira (2002), nos quais analisou vigas de concreto armado com ripas de bambu, obtiveram resultados satisfatórios, onde verificou-se que o emprego do bambu como armadura longitudinal é factível do ponto de vista estrutural, porém ela ressalta que o bambu somente terá um bom desempenho se forem garantidas a aderências entre os mesmos, utilizando tratamentos que melhorem este vínculo. A autora também cita que é possível utilizar a mesma hipótese de cálculo do concreto armado com aço, desde que sejam adotados maiores coeficientes de segurança.

Masani (1977) realizou um estudo aprofundando objetivando maneiras de utilizar o bambu na construção, trazendo instruções para garantir melhor desempenho, impermeabilização, tratamentos e vigas modelo. Neste estudo, foi possível concluir que a área de bambu deve ser cinco vezes maior da área de aço, outra afirmação é que mesmo quando o bambu desenvolve rachaduras finas em sua superfície sua capacidade de carga não é reduzida.

Raj (1991) *apud* Ferreira (2007), cita em seu trabalho que a porcentagem de armadura ideal depende da forma que o carregamento encontra-se distribuído, do tipo de estrutura, da carga última considerada e também dos aspectos econômicos de obtenção de materiais, entretanto, o autor afirma que a porcentagem ideal varia entre 1,25 % a 8,33%.

A pesquisa realizada por Ghavami (2001) reforça que uma das limitações do bambu, quando utilizado como reforço do concreto, é sua grande absorção de água. Durante o período que sucede o lançamento do concreto e da sua cura, o bambu absorve água, aumentando suas dimensões e provocando pequenas fissuras no concreto. Quando o concreto se encontra seco, o bambu começa a perder a água absorvida, encolhendo-se e quebrando o vínculo entre eles, como mostrado na figura 09. Desta maneira, é necessário o uso de tratamentos que aumente a ligação bambu-concreto.

Figura 09 –Interação entre uma ripa de bambu não tratado e o concreto



Fonte: Ghavami (2001).

A baixa aderência entre o bambu e o concreto é um dos motivos que limitam sua utilização. Fatores como grau de saturação do colmo, após o endurecimento do concreto; da quantidade de retração dos colmos; do revestimento do colmo, se ele é áspero ou saliente; da quantidade de bambu e de concreto; e da alternância de temperatura; estão diretamente ligados à aderência do bambu (FERREIRA, 2002). Na literatura é possível encontrar formas de melhorar este vínculo, algumas são citadas a seguir:

- Testes em laboratório demonstraram que o bambu tratado com a aplicação do impermeabilizante NEGROLIN, associado à areia e amarrado com fios de arame, aumentou sua aderência em até 90%;
- Colocar o bambu em betume derretido ou aplicar o betume quente com um pincel, como uma barreira de umidade, e cobrir o betume com areia grossa enquanto o betume ainda está fluido, para garantir a ligação. (KRISHNAMURTHY, 1986 *apud* JANSSEN, 2000);
- Utilização da resina epóxi, chamada Sikadur-32 gel junto com areia, aplicados direto no bambu. O produto limita a capacidade de absorção de

água pela planta, já a areia melhora a aderência com o concreto (GHAVAMI, 2005);

- Utilização de ripas de bambu cravejadas de pinos, faz com que aumente a rigidez das vigas ensaiadas, pelo aumento da aderência entre o concreto e o bambu. A cravação dos pinos deve-se ser feita de forma intercalada entre as ripas para que uma mesma seção transversal da viga não tenha mais de um pino (FILHO, A.C.B *et al*, 2010);
- Devem ser usados colmos maduros (com pelo menos 3 anos).
- Tiras de bambu, em vez de colmos inteiros, visto que a superfície interna desenvolve uma melhor ligação do que a superfície externa, visto que a casca do colmo é lisa. Além disso, colmos com vários nós proeminentes oferecem uma ligação melhorada (FERREIRA, 2002);
- Bambu “à milanesa”, que é a aplicação de piche chapiscado com areia, tornando a superfície rugosa e porque a aplicação do piche funciona também como impermeabilizante (FERREIRA, 2002);
- Colocação de arame farpado pregado sobre o colmo ou talisca (FERREIRA, 2002);
- Cravamentos de grampos de cerca e/ ou ranhuras realizadas na casca das taliscas de bambu;
- Uso dos nós dos bambus para elevar a extensão de contato com o concreto (o mais natural dos métodos).

Na figura 10, é possível ver a montagem da armação de vigas de concreto armadas com bambu para os ensaios realizados por Ferreira (2007).

Figura 10 –Armadura de ripas de bambu.



Fonte: Ferreira (2007).

Isso posto, percebe-se que a utilização do bambucreto pode ser viável, desde que sejam tomados alguns cuidados no dimensionamento das vigas, assim como, aumentar os coeficientes de segurança. É válido ressaltar, que sua eficiência é limitada pela baixa aderência entre bambu e o concreto, e devido à grande fragilidade quando exposto a umidade tornando de fundamental importância a adoção de métodos que sejam eficientes.

3.6.1 Durabilidade do bambu inserido no concreto

A durabilidade do bambu inserido no concreto ainda é um assunto bastante debatido entre os pesquisadores. O meio alcalino do concreto, que possui $\text{pH}=13$, destrói as fibras da celulose do bambu, o que com o tempo, diminui sua coesão.

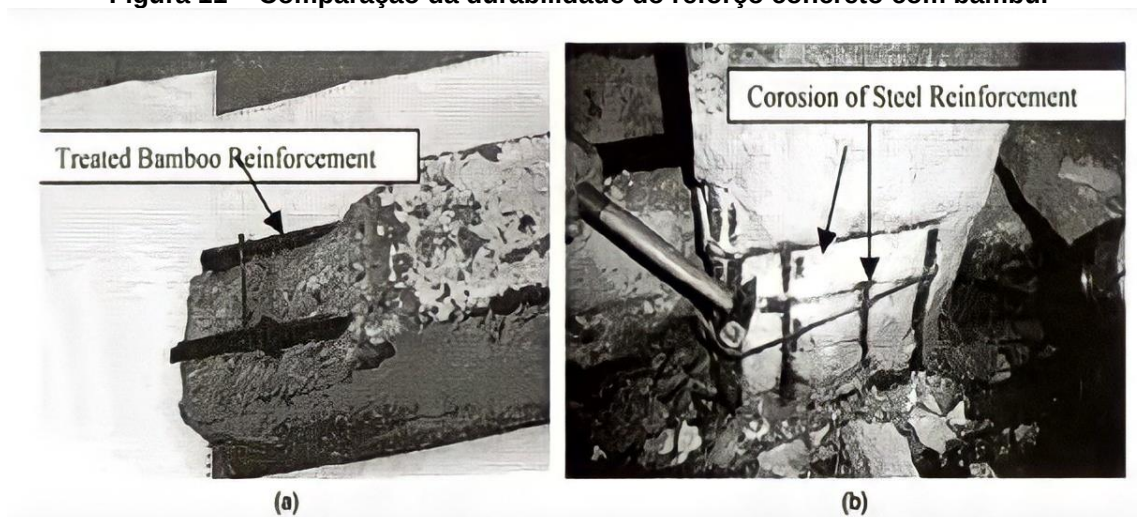
Ainda assim, existem estudos de observações de construções realizadas há mais de dez anos que até então não apresentam nenhuma fissuração ou qualquer dano associado à perda de resistência das taliscas de bambu (JASSEN, 1995).

De acordo com Ferreira (2007), a vida útil do bambu varia de 2 a 3 anos quando exposto à atmosfera em clima tropical, porém existem tratamentos que podem aumentar a durabilidade do bambu para 15 a 20 anos.

Em um estudo no qual Ghavami (2005) comparou dois pilares de concreto, um reforçado com aço localizado no metrô do Rio de Janeiro, executado há 10 anos; e o outro que havia sido reforçado com bambu há 15 anos, que se encontrava exposto a

intempéries no campus da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Foi possível verificar que o segundo pilar, armado com bambu, apresentava menor comprometimento da sua seção do que aquele armado com aço. Como mostrado na figura 11.

Figura 11 – Comparação da durabilidade do reforço concreto com bambu.



Fonte: Adaptado de Ghavami (2005).

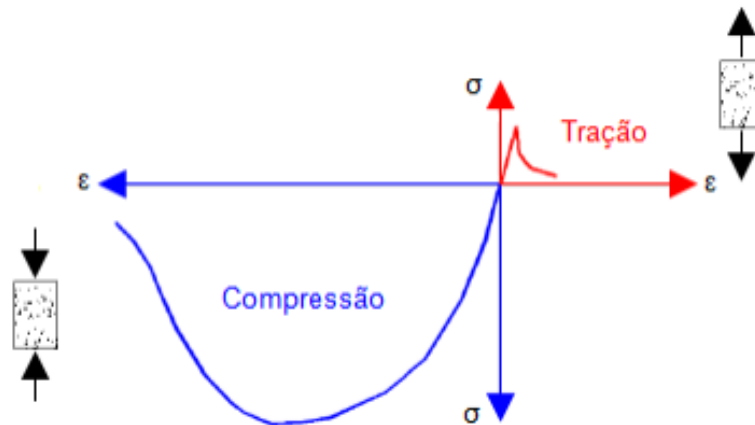
Dito isso, é preciso ter alguns cuidados com o bambucreto para aumentar sua durabilidade. Além do tratamento do bambu, é necessário considerar a porcentagem de área da seção transversal em relação a área de concreto, bem como implementar o reforço de cisalhamento, pois melhora o comportamento das vigas de bambucreto (FERREIRA, 2002).

3.7 CONCRETO

O concreto é um material compósito de uso estrutural, formado por cimento, água, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra ou brita) e aglomerante (cimento Portland), além desses, podem conter adições e/ou aditivos para melhorar ou modificar suas propriedades.

Dentre as propriedades, como já citado neste trabalho, o concreto se destaca pela sua elevada resistência às tensões de compressão. Entretanto, apresenta baixa resistência à tração, em torno de 1/10 da sua resistência à compressão, além disso apresenta uma ruptura frágil (SUSSEKIND, 1984). Na figura 12 mostra-se o comportamento uniaxial típico de concretos.

Figura 12 – Comportamento uniaxial típico de concretos

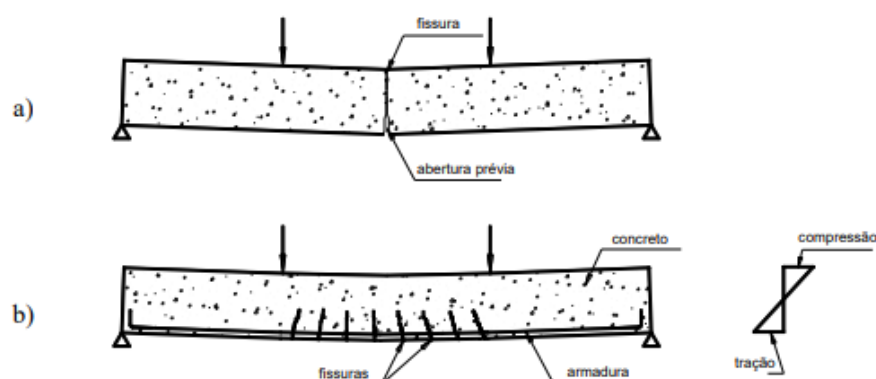


Fonte: Silva, 2012.

O comportamento à compressão do concreto é um dos tópicos da engenharia civil que demanda estudo e atenção. A idealização da relação tensão-deformação do material é complexa visto que o comportamento é não linear, ou seja, não obedece a Lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$), resultando em modelos de módulo de elasticidade variável, dependentes do histórico de deformações.

Isto ocorre devido a sua heterogeneidade, que tem efeitos diretos nas propriedades físicas, principalmente no mecanismo de fratura. Ela gera em locais aleatórios pontos mais fracos e pontos mais resistentes no material, o que leva ao aparecimento de microfissuras nos pontos fracos, que aumentam à medida que o corpo é levado à ruptura. (ROSSI; RICHER, 1987 *apud* SCHLANGEN; VAN MIER, 1992). Na figura 13, é mostrada a comparação de uma viga com e sem armadura quando sujeitas a tensões de tração e compressão.

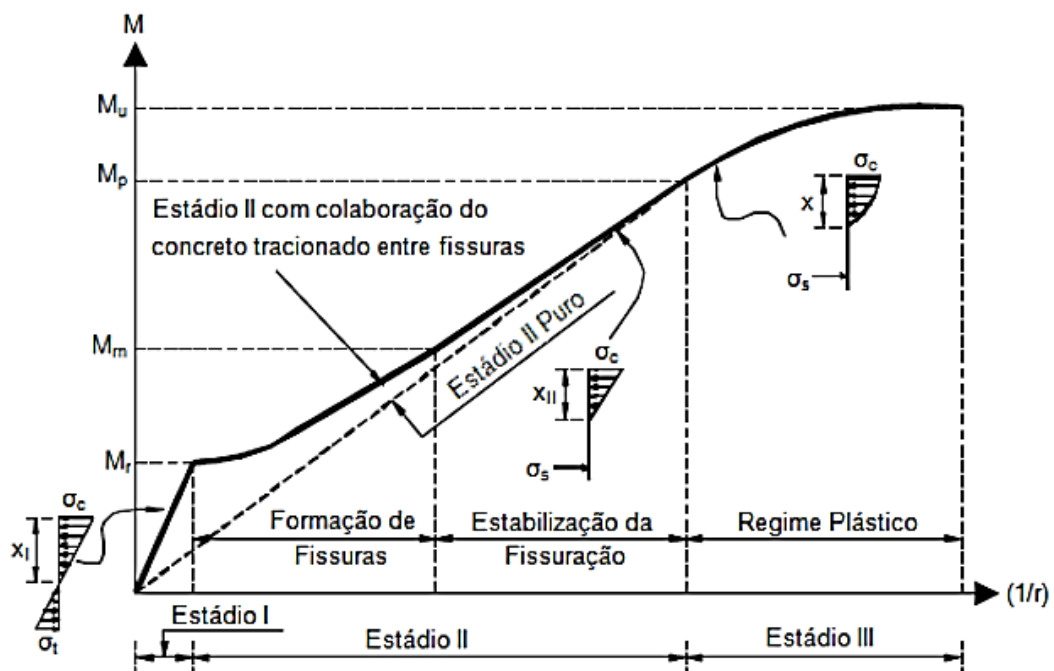
Figura 13 – Viga de concreto: a) sem armadura b) com armadura



Fonte: Bastos (2010).

O desenvolvimento dessas fissuras que aparecem sob solicitações, são a principal causa da não-linearidade física do concreto. Esse comportamento pode ser verificado através de um diagrama tensão-deformação do tipo parábola-retângulo (ABNT NBR 6118, 2014) e em diagramas de momento-curvatura de seções transversais da viga (Figura 14). A adoção de parâmetros de rupturas eficazes para detectar o aparecimento de fissuras e simulação do comportamento do concreto fissurado é de fundamental importância nas modelagens computacionais que visam a análise do comportamento de elementos de concreto armado pelo método dos elementos finitos (TROINA, 1981).

Figura 14 - Diagrama de momento-curvatura de seções transversais de viga



Fonte: Mendes (2017).

Alisando-se o diagrama da figura 14, é possível verificar que no primeiro trecho (estádio I), o concreto apresenta um comportamento idealizado como elástico linear. Neste estágio, a lei de Hooke é supostamente válida, não havendo formação de fissuras, apenas microfissuras devido à hidratação do concreto. No Estádio II, o concreto não mais resiste a tração e encontra-se fissurado na região tracionada. Na região comprimida a relação entre tensão e deformação ainda é linear, permanecendo válida a lei de Hooke. No estágio III, zona comprimida começa a plastificar e o concreto dessa região está próximo da ruína, que ocorre por esmagamento. Para análises no

estado limite último, podem ser empregados o diagrama tensão-deformação idealizado, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2104).

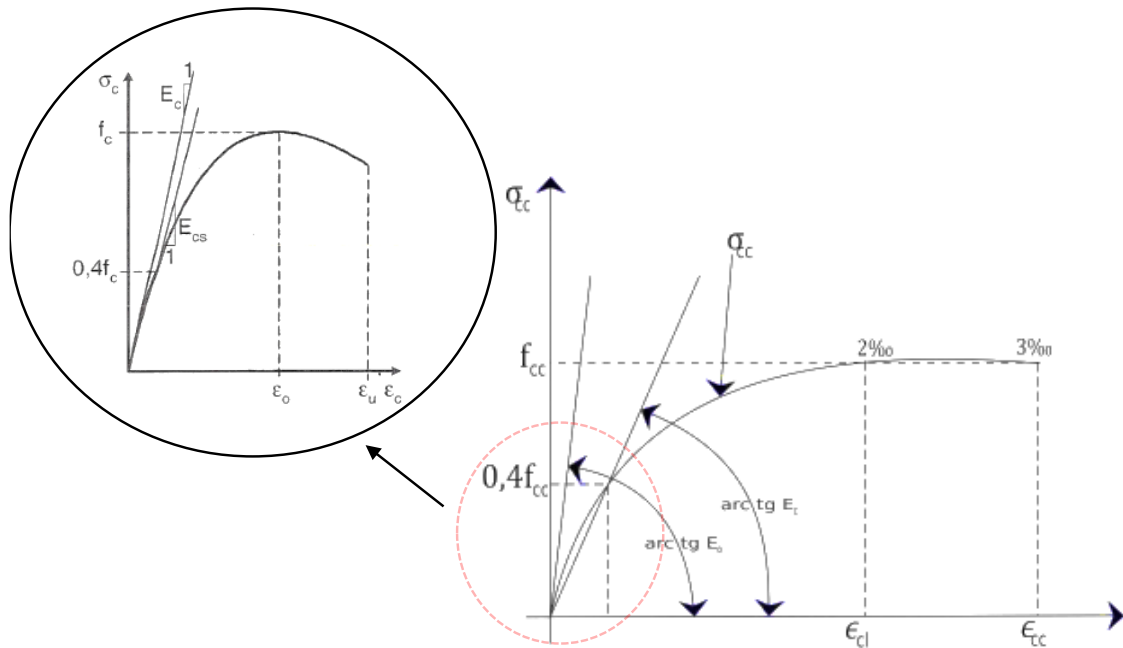
As principais propriedades mecânicas do concreto são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

3.7.1 Módulo de elasticidade do concreto

O módulo de elasticidade também conhecido como módulo de Young pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado, que mede a rigidez de um sólido (MEHTA,1994). O valor do módulo de elasticidade pode ser obtido através do gráfico tensão - deformação do concreto, pela declividade da curva sob um carregamento uniaxial, de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008) “Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão x Deformação – Método de Ensaio”.

Os módulos de elasticidade do concreto, que são vários em consequência do diagrama tensão deformação não linear, são os seguintes: Módulo de tangente, que possui valor variável em cada ponto e é definido pela inclinação da reta tangente à curva nesse ponto; módulo de deformação tangente na origem (E_{ci}), que do ponto de vista prático de ensaio corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e 0,3 f_c e; o módulo de deformação secante, calculado pela inclinação de um segmento de reta que vai desde a origem até o ponto, correspondente à tensão considerada no ensaio (ABNT NBR 8522, 2008). Vale ressaltar que para a NBR 6118 (ABNT, 2014), o módulo de elasticidade secante é definido pela inclinação da reta que corta o diagrama $\sigma_c \times \epsilon_c$ nos pontos $\sigma_c = 0$ e $\sigma_c = 0,5f_c$. Já para o CEB/90 esses pontos são $\sigma_c = 0$ e $\sigma_c = 0,4f_c$ (ARAUJO, 2010).

Figura 15– Diagrama tensão deformação do concreto. Figura 15.1: Diagrama tensão - deformação do concreto para compressão simples



Fonte: Adaptado de Chust, (2016).

De acordo com Melo e Helene (2002), além desses módulos de elasticidade outros tipos de módulos podem ser definidos como, por exemplo, o módulo de elasticidade à flexão, o módulo sob carga de longa duração e o módulo sob impacto.

Na literatura é possível encontrar diversas formulações para a obtenção do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do concreto. Na tabela 06 são citadas algumas equações de diferentes normas: NBR 6118 (ABNT, 2014), Norma Norte-Americana (ASTM C469:2014 e ACI C318: 2014) e Norma Europeia (CEB-FIP MC2010: 2013).

Tabela 06 –Equações de modulo de elasticidade tangente inicial acordo com cada norma.

NORMA	EQUAÇÃO	OBSERVAÇÕES
NBR 6118, 2014	$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$ Para f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa. $E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)}$ Para f_{ck} de 55 MPa a 90 MPa	E_{ci}= Módulo de Elasticidade Estático do concreto (MPa); f_{ck}= Resistência à compressão do concreto (MPa); α_E= coeficiente introduzido para corrigir um a variação do módulo de elasticidade devido à composição do agregado gráudo, sendo: 1,2 para basalto e diabásio, 1,0 para granito e gnaisse, 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.
Norma Norte-Americana (ASTM C469: 2014 e ACI C318: 2014)	$E_c = \gamma^{1,5} \cdot 33 \cdot f_c^{0,5}$ $E_c = 5700 \cdot f_{cj}^{0,5}$	E_c = Módulo de Elasticidade Estático do concreto (MPa); f_c = Resistência à compressão do concreto (MPa); γ = Massa Específica (kg/l); f_{cj} = Resistência à compressão do concreto (MPa) em “j” dias.
Norma Europeia (CEB-FIP MC 2010: 2013)	$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{f_c + 8}{10}\right)}$ $E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{f_{cj}}{10}\right)}$	E_c = Módulo de Elasticidade Estático do concreto (MPa); f_c = Resistência à compressão do concreto (MPa); f_{cj} = Resistência à compressão do concreto (MPa) em “j” dias.

Fonte: Autora desta monografia (2021).

O modulo de deformação secante pode ser obtido pelo método de ensaio estabelecido na NBR 8522 (ABNT, 2017): Concreto –Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão - Deformação – Método de Ensaio; ou pela Equação 1 extraída da NBR 6118 (ABNT, 2018): Estruturas de concreto armado.

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80}\right) \cdot E_{ci} \quad (1)$$

De acordo com o MC-FIP/2010, o módulo secante pode ser obtido através da equação 2:

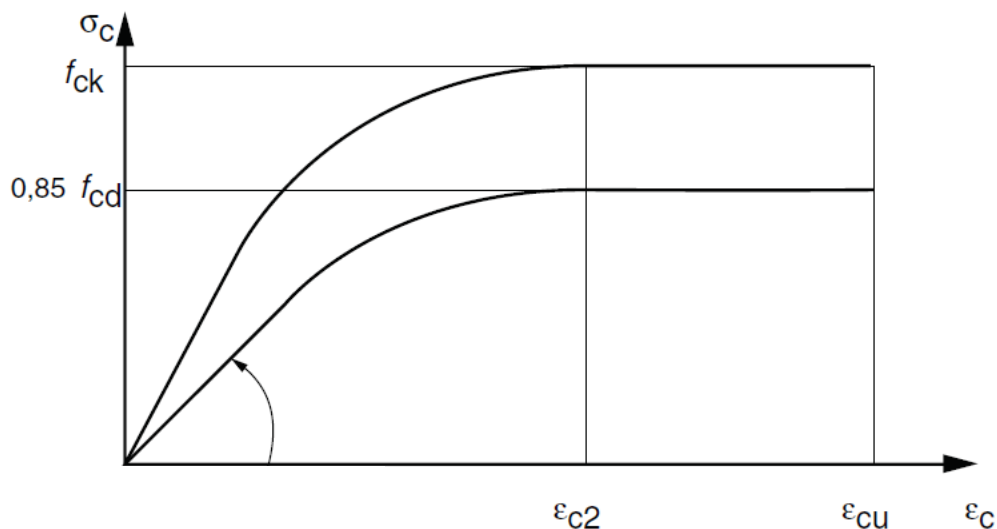
$$E_c = \alpha_i \cdot E_{ci} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{cm}}{88}\right) \cdot E_{ci} \quad (2)$$

3.7.2 Equações constitutivas para o concreto

. Variadas relações para descrever o comportamento tensão-deformação para o concreto em compressão uniaxial são encontrados na literatura.

Para análise no estado de limite último a NBR 6118 (ABNT, 2018) permite empregar o diagrama tensão-deformação idealizado, Parábola-retângulo como mostrado no Gráfico 01.

Gráfico 01 –Diagrama tensão deformação específica idealizado



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Consideramos que a partir de 2‰ de deformação específica o ganho de resistência é considerado nulo, como um patamar de escoamento, e que a ruptura aconteça sob a deformação de 3,5‰. Desta forma, o trecho curvo corresponde a uma parábola do segundo grau, a tensão limite do concreto é fixada em 0,85 f_{cd} e o limite de encurtamento é determinado como sendo 3,5‰, para concretos com f_{ck} de até 50 MPa, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

A equação é dada por:

$$\sigma_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad (3)$$

Para a curva superior substitui-se $0,85 \cdot f_{cd}$ por f_{ck} , como na equação abaixo:

$$\sigma_c = f_{ck} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad (4)$$

Onde:

ε_c = deformação específica do concreto submetido à compressão

ε_{c2} = deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico

O CEB (2010) adota a seguinte relação tensão-deformação para o concreto em compressão simples:

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot \left(\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta} \right), \text{ onde } k = \left(\frac{E_{ce} \cdot \varepsilon_o}{f_{cm}} \right); \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \quad (5)$$

Onde:

ε_o = deformação específica do concreto na tensão máxima, geralmente fixado em 2‰ para concretos de densidade normal;

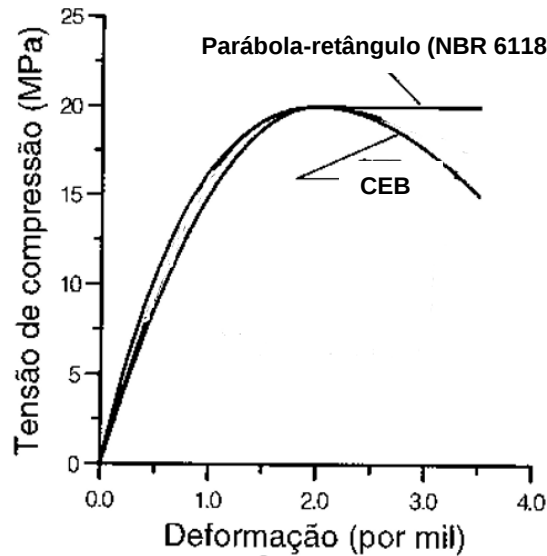
f_{cm} = valor médio da resistência à compressão (f_c aos 28 dias de idade);

k = o número da plasticidade de acordo com a Tabela 5.1-8 da CEB 1990;

E_c = módulo secante desde a origem até o pico de tensão compressiva.

No gráfico 02, é mostrando os diagramas tensão-deformação obtidos com as duas expressões (4 e 5), considerando uma resistência média de $f_{cm} = 20 \text{ MPa}$ e $\varepsilon_o = 2 \text{ ‰}$.

Gráfico 02 – Comparação entre os diagramas tensão-deformação da CEB e NBR 6118



Fonte: Adaptado de Araújo (2010).

Analisando o Gráfico 02, é possível perceber que existe uma boa concordância entre os dois diagramas no trecho inicial. De acordo com Araújo (2010) a parte decrescente da curva, não representam uma propriedade do material, visto que, ele varia de acordo com o comprimento do elemento estrutural. Desta forma, ele afirma que para efeito de projeto pode-se admitir o diagrama como parábola-retângulo.

3.8 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Atualmente, observa-se que com o avanço da tecnologia da informação a modelagem computacional das estruturas através do uso de softwares tem se tornando cada vez mais uma realidade, sobretudo através do método dos elementos finitos, que tornou possível análises de estruturas de com alto grau de complexidade.

Antes do aparecimento deste método, a análise dos meios contínuos era realizada por resolução direta dos sistemas de equações das derivadas parciais, levando em consideração as condições de fronteira necessárias. Devido à complexidade, estes procedimentos só eram aplicáveis a meios contínuos homogêneos e de geometria simples (AZEVEDO, 2003).

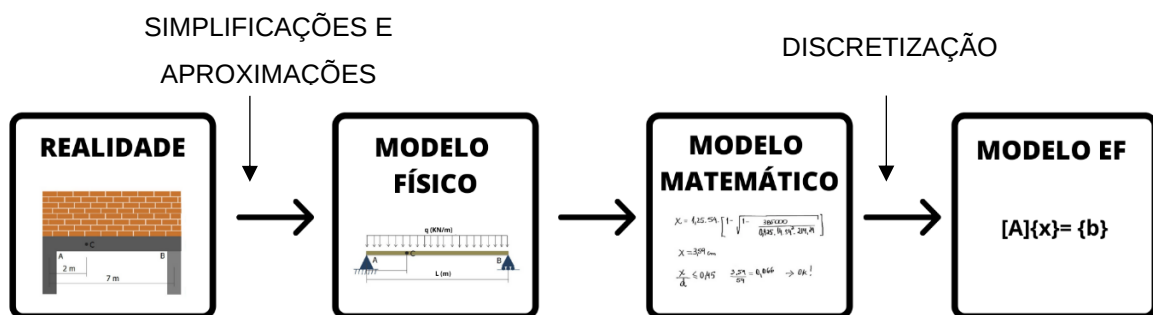
O termo Método dos Elementos Finitos (MEF) surgiu na literatura no ano de 1960, quando Clough fez seu uso no artigo de engenharia sobre aplicações planas, porém, as ideias fundamentais do método já vinham sendo aplicadas há alguns anos.

O MEF é um método de solução numérica de problemas governado por equações diferenciais, contribuindo de forma eficiente para o cálculo de deformações, deslocamentos e tensões em estruturas, encontrando soluções satisfatórias para problemas estruturais.

A ideia básica de funcionamento consiste em subdividir o domínio do problema em elementos de dimensões finitas denominados elementos finitos, interligados através de pontos chamados de nós, de modo que o agrupamento de todos os elementos finitos seja igual ao domínio original (ALVES, 2007). A divisão do domínio é chamada de malha, composta por vários elementos, ou seja, um conjunto de elementos finitos resultante do modelo de aproximação.

Este método pode ser utilizado para diferentes aplicações sendo as mais comuns as análises dinâmicas ou estáticas, linear ou não linear, sendo bastante utilizado na área de engenharia civil e mecânica, pois é possível fazer análises das tensões, cargas, deformações e etc. Na Figura 16 é possível entender de forma simplificada como o método dos elementos finitos funciona.

Figura 16 – Sequência de modelos aplicados à viga.



. Fonte: Autora (2021).

De acordo com Santos (2015), a modelagem e a simulação numérica otimiza o tempo, como também, viabiliza novas e inovadoras formas de resolução de problemas, torna-se um recurso cada vez mais explorado em diversas áreas, ajudando, em harmonia com as técnicas tradicionais, no estudo e realização de grandes e complexos projetos.

Atualmente existem uma grande variedade de *softwares* comerciais para a análise numéricas utilizando o princípio do método dos elementos finitos como o SAP2000, Abaqus, ANSYS, entre outros. Entretanto, é importante ressaltar a

importância de o usuário dominar os conceitos e teorias que embasam o funcionamento desses softwares, para modelar e interpretar os resultados corretamente.

3.8.1 Uma breve descrição do Abaqus

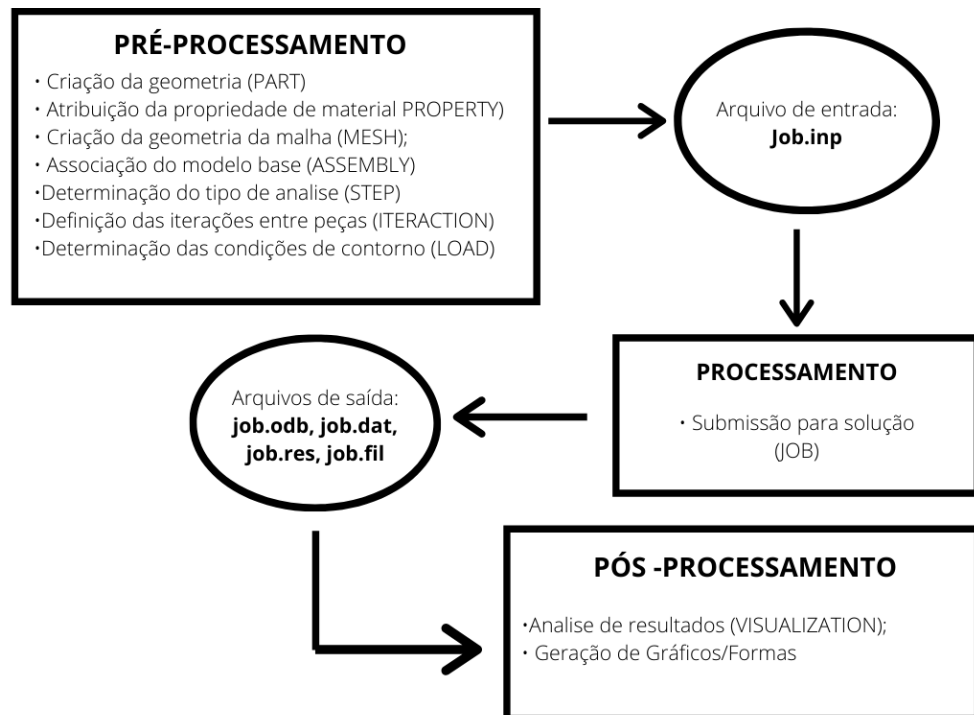
O Abaqus, que surgiu no final da década de 70, desenvolvido pela empresa *Dassault Systèmes Simulia*, é um suporte lógico baseado no método dos elementos finitos para diversas aplicações, incluindo a realização de análises de tensões e deformações em estruturas.

O Abaqus possui um ambiente completo que oferece uma interface simples e consistente para criar uma gama de modelos com diversas potencialidades, permitindo que problemas complexos envolvendo geometrias complicadas, relações construtivas não lineares e interação entre materiais possam ser modelados numericamente

Por se tratar de um programa aberto para aplicações em diversos tipos de elementos estruturais, possui a necessidade de que todos os parâmetros para a modelagem de uma determinada estrutura sejam customizados, sendo assim, é de fundamental importância possuir um conhecimento dos métodos de resolução adotados, para que se possa garantir um controle dos parâmetros envolvidos gerando uma maior confiabilidade nos resultados obtidos.

De acordo com Castro e Silva (2006), o Abaqus tem por base a aproximação das condições de equilíbrio de um corpo pelo princípio de Lagrangiano, onde cada ponto material do corpo é analisado em função de suas coordenadas e do tempo alcançando-se equações de equilíbrio através do princípio da Mínima Energia Potencial Total. O programa consiste em três etapas para a resolução do problema: Pré-processamento, processamento e pós-processamento, essas três etapas estão conectadas conforme mostrado no fluxograma abaixo:

Figura 17 – Representação em fluxograma do funcionamento do ABAQUS.



Fonte: Autora (2021).

O pré-processamento envolve criar um arquivo de entrada onde serão definidas a geometria e as diversas propriedades do modelo que se deseja adotar, através da programação de um algoritmo que pode ser feita através da interface gráfica do software ou por comandos escritos em Python. No processamento o problema que foi criado é solucionado, através de equações diferenciais ordinárias e equações diferenciais parciais. Por fim, no pós-processamento, é possível a visualização dos resultados, como deslocamentos, tensões e outras variáveis através da interface renderizada, onde podem ser feitas animações, plotagens de gráficos, etc. (AFFONSO, 2012).

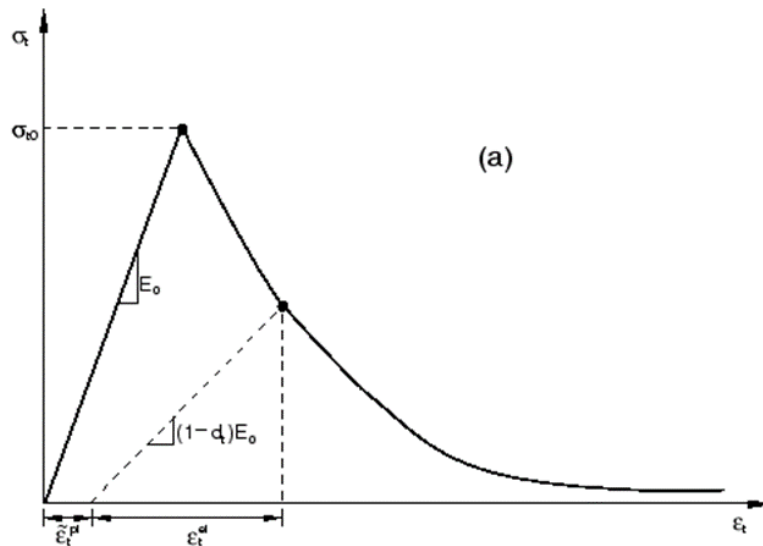
3.8.2 Concrete Damage Plasticity (CDP)

O modelo escolhido neste trabalho, por retratar a não linearidade física do concreto através de parâmetro intuitivos, é o mesmo utilizado pelo ABAQUS CAE que mescla conceitos de plasticidade e o dano, para computar a perda de rigidez do material (JANKOWIAK e LODYGOWSKI, 2005). O *Concrete Damaged Plasticity* é um modelo governado pelos critérios desenvolvidos por Lubliner *et al.* (1989) e posteriormente modificado por Lee e Fenves (1998), e normalmente é utilizado para

simular estruturas de concreto, porém SIMULIA (2012), cita que também é válido em outros materiais de comportamento quase frágeis.

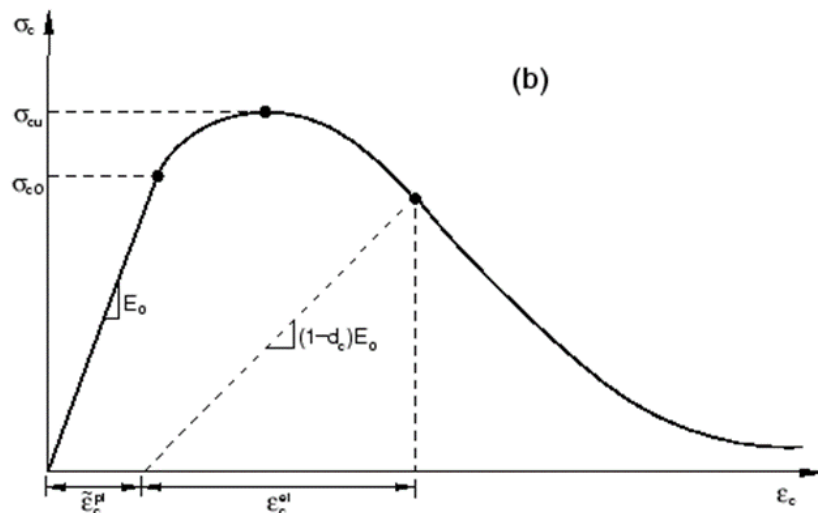
O modelo assume que os principais mecanismos de falha são fissuras por tração e esmagamento por compressão do concreto, sendo a falha controlada por duas variáveis de endurecimento ε_t^{pl} e ε_c^{pl} , ligados a mecanismos de falha sob carga de tração e compressão, respectivamente (SIMULIA, 2020). Os comportamentos à tração (a) e à compressão (b) teorizados no *Concrete Damaged Plasticity* estão ilustrados nas curvas tensão - deformação dos gráficos 03 e 04.

Gráfico 03 – Comportamentos à tração teorizada no CDP



Fonte: SIMULIA (2020).

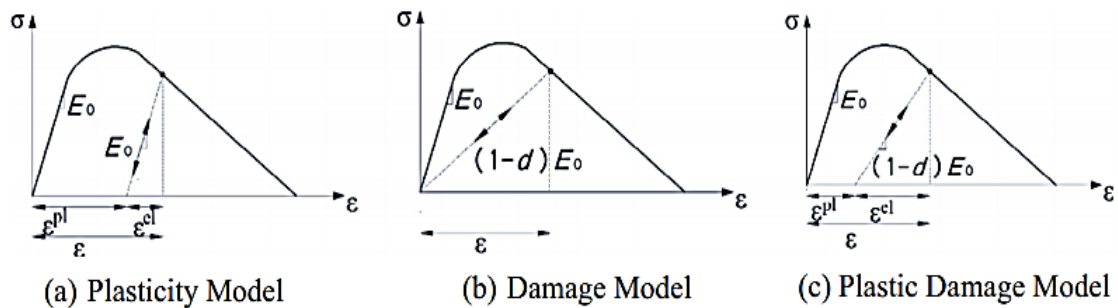
Gráfico 04 – Comportamentos à compressão teorizada no CDP



Fonte: SIMULIA (2020).

Através dos gráficos é possível perceber que é assumido que o concreto é linear apenas nos primeiros trechos, em função das deformações elásticas, sendo possível denotar as variáveis de dano d_c e d_t (valor de danos estão compreendidos entre 0 e 1). Observa-se também, que sob tensão de tração a resposta tensão-deformação segue elástica linear até o valor da tensão de ruptura, σ_{t0} , e no caso de compressão até σ_{c0} .

Figura 18 – Representação do modelo *Concrete Damaged Plasticity*.



Fonte: Alfarah *et al.* (2017)

A Figura 18 apresenta os gráficos de tensão-deformação uniaxiais típicos de plasticidade, dano e plasticidade por dano. O dano gera degradação da rigidez, uma vez que a inclinação do trecho de descarga e recarga é $(1 - d)E_0$, onde d é uma variável de dano variando entre 0 (nenhum dano) e 1 (completamente danificado). Para compressão e tração, a relação tensão-deformação sob carga uniaxial no comportamento de plasticidade por dano exibido na Fig. 18c pode ser escrito como:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \epsilon_t^{pl}) \quad (6)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \epsilon_c^{pl}) \quad (7)$$

Os subíndices t e c referem-se à tração e compressão, respectivamente. Para condições de carregamento-descarregamento cíclico uniaxial, o CDP assume que a degradação na rigidez elástica é dada por:

$$E_{el} = (1 - d)E_0 \quad (8)$$

Onde:

E_{el} = Módulo tangente reduzido

O dano efetivo é dado por:

$$1 - d = (1 - s_t d_t)(1 - s_c d_c) \quad (9)$$

Onde d_c e d_t são os danos na compressão e na tração, respectivamente, s_t e s_c são coeficientes adimensionais responsáveis por efeitos de recuperação de estado de tensões e da rigidez, sendo dado por:

$$s_c = 1 - h_c(1 - r^*(\sigma_{11})) \quad (10)$$

$$s_t = 1 - h_t r^*(\sigma_{11}) \quad (11)$$

Onde σ_{11} é a tensão principal (positiva para tração), r^* é o parâmetro de estado de tensão; e h_c e h_t são fatores de ponderação que variam entre 0 e 1, o fator h_c se relaciona com o fechamento de fissuras após a carga passar de tração para compressão, enquanto que o fator h_t representa a recuperação no esmagamento após a carga passar de compressão para tração.

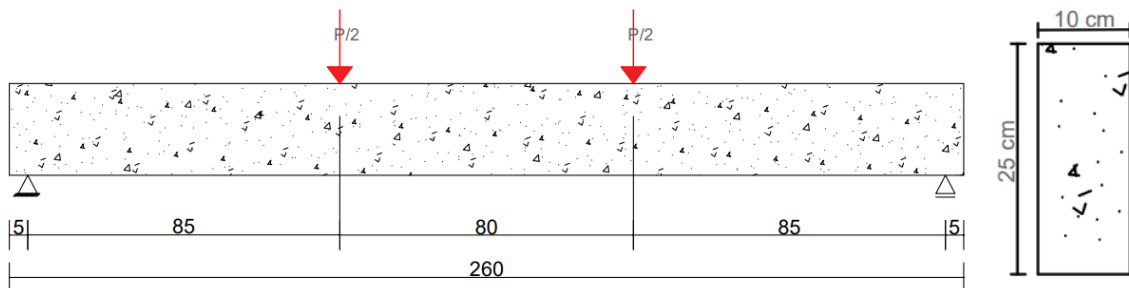
O manual do Abaqus apresenta os parâmetros de plasticidade do CDP que são adotados por vários pesquisadores e considerados como padrão para o concreto armado, nele são considerados, além do gráfico tensão-deformação: ângulo de dilatação (ψ), excentricidade (ϵ), relação entre a resistência à compressão do concreto biaxial e uniaxial (f_{b0}/f_{c0}), fator de forma (K) e viscosidade (μ), os quais serão explicados de forma detalhada no subitem 4.5.1.1. deste trabalho.

4 METODOLOGIA

4.1 CASO ANALISADO

As simulações numéricas realizadas neste trabalho buscaram reproduzir os ensaios realizados por Lima *et al.* (2005). Foram analisados os comportamentos de vigas de concreto armado reforçadas com taliscas de bambu, simuladas numericamente por meio do Método dos Elementos Finitos. As vigas ensaiadas no trabalho Lima *et al.* (2005) apresentaram seção transversal retangular de 100 mm (largura) por 250 mm (altura) com comprimento total de 2600 mm. Nos ensaios, as vigas estavam bi apoiadas com vão teórico de 2500 mm e carregadas com forças concentradas, como mostrado pela figura 19:

Figura 19 – Representação das dimensões da viga.



Fonte: Autora (2021). Medidas em cm.

No trabalho de Lima *et al.* (2005), foram confeccionadas 10 vigas com taxa de armadura e força aplicada distintas, sendo 2 armadas com aço (vigas 1 e 2) e 8 armadas com taliscas de bambu. Duas vigas foram armadas com duas varas de bambu de 2 cm x 1cm (vigas 3 e 4); duas armadas com quatro varas de bambu de 1 cm x 1 cm (vigas 5 e 6); duas armadas com quatro varas de bambu de 2 cm x 1 cm (vigas 7 e 8) e, finalmente, duas armadas com oito varas de bambu de 1 cm x 1 cm (vigas 9 e 10). Porém as simulações feitas neste trabalho se restringiram apenas às vigas 1, 2, 3 e 4. Na tabela 07 são apresentados os dados das vigas.

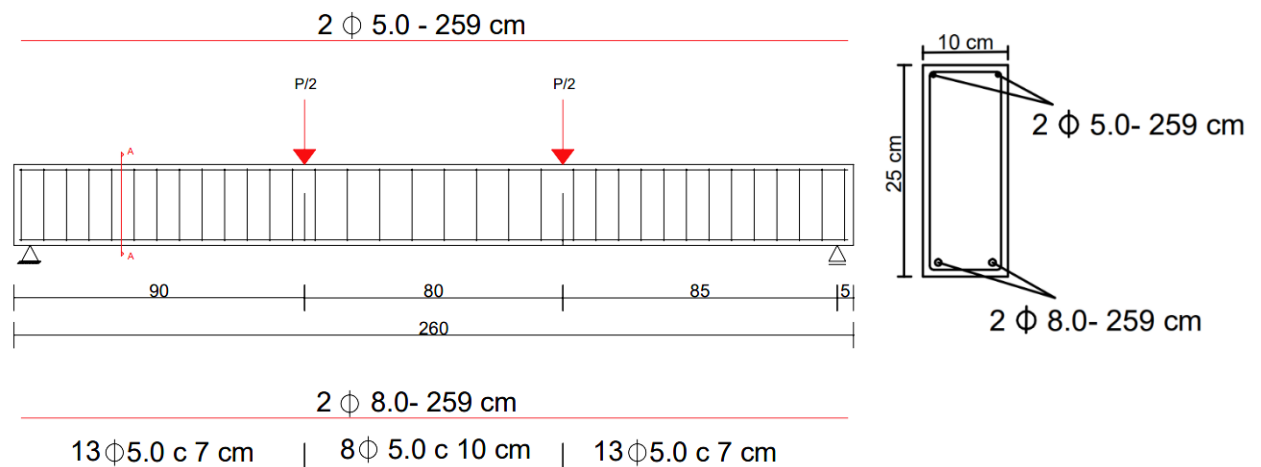
Tabela 07 –Dados das vigas ensaiadas por Lima, 2005.

VIGAS	Armadura positiva	$A_{média}$ (cm ²)	f_{cm} (MPa)
Tipo 01	2 ϕ 8.0mm - AÇO	1.00	27,16
Tipo 02	2 ϕ 8.0mm - AÇO	1.00	27,11
Tipo 03	2x(2cm x 1cm) - BAMBU	$\approx 4,50$	27,03
Tipo 04	2x(2cm x 1cm) - BAMBU	$\approx 4,50$	26,26

Fonte: LIMA *et. al.* (2005).

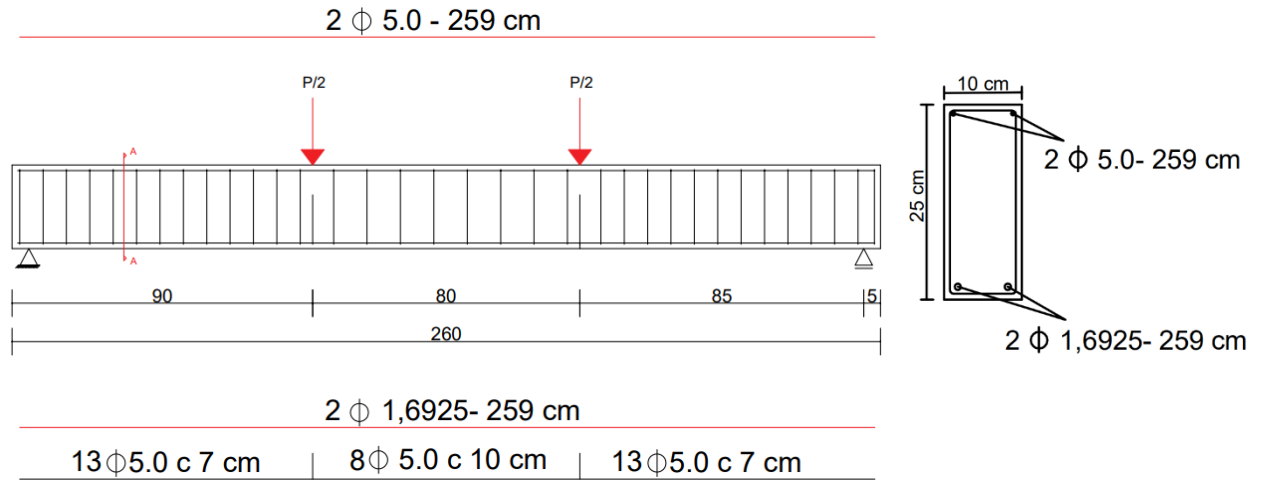
Nas figuras 20.1 e 20.2 há a representação detalhada das armaduras das vigas de bambu e do aço, considerado que 1,6925 cm é o diâmetro equivalente de cada uma das ripas de bambu.

Figura 20.1 – Representação do detalhamento das armaduras da viga armada com aço.



Fonte: Autora (2021).

Figura 20.2 – Representação do detalhamento das armaduras da viga armada com bambu

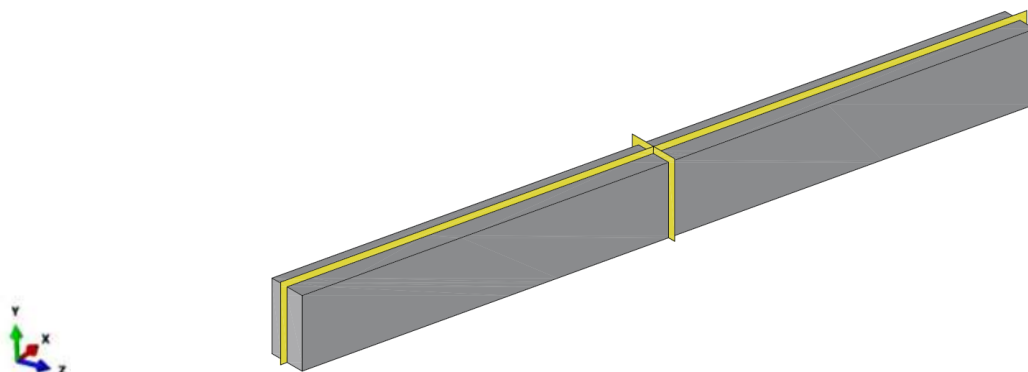


Fonte: Autora (2021).

4.2 CONSIDERAÇÕES DO MODELO NUMÉRICO

As simulações computacionais foram realizadas por meio do software de análise numérica avançada Abaqus, especializado em *Computer-Aided Engineering* (CAE), que utiliza como mecanismo de cálculo o método elementos finitos (MEF). Para possibilitar uma economia de tempo no processamento computacional durante as simulações foram realizadas a modelagem e simulação de apenas um quarto ($1/4$) da viga, como mostrado na figura 21. Isso é possível, porque a viga apresenta característica geométrica de simetria em dois planos (XY e YZ). Lembrando que é de fundamental importância a adoção condições de contorno de simetria adequadas para que os resultados representem os mesmos resultados da simulação de uma viga inteira.

Figura 21 – Planos de simetria da viga

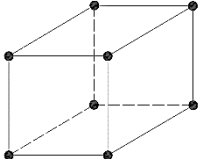
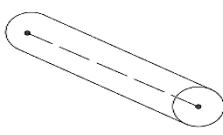


Fonte: Autora (2021).

Inicialmente, é necessário modelar as várias partes (viga de concreto, estribos, reforços e placa de aço dos apoios, os quais compõem a simulação de forma separada no módulo PARTS; e posteriormente serão unidas no módulo ASSEMBLY. Finalmente, após montar o modelo, as interações entre as partes são definidas no módulo INTERECTIONS para que ajam de forma adequada, considerando a aderência entre as barras e o concreto.

Para a modelagem da viga foram utilizadas as dimensões baseadas nas descritas por Lima *et al.* (2005). Cada parte do modelo foi idealizada conforme a Tabela 08.

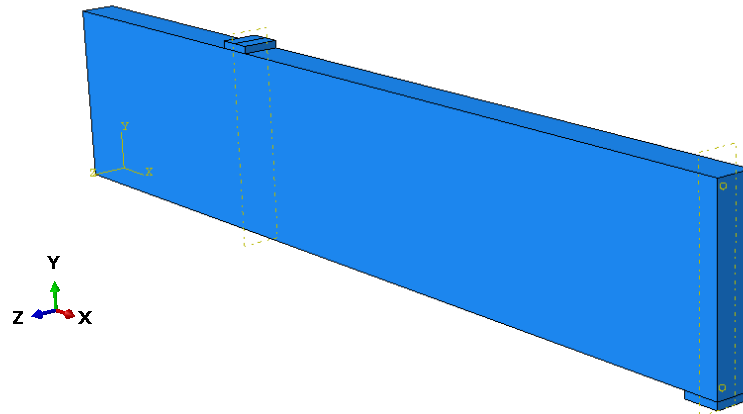
Tabela 08 –Partes que formam o modelo.

PARTE	TIPO	FORMA	ILUSTRAÇÃO (SIMULA, 2020)
VIGA DE CONCRETO	DEFORMÁVEL	SOLID, 3D (3D8R)	
CHAPA DE CONTATO			
BARRA AÇO C-60	DEFORMÁVEL	WIRE- STRUSS (T3D2)	
BARRA AÇO CA-50			
ESTRIBO CA-50			
BAMBU			

Fonte: Autora (2021).

Na figura 22 ilustra-se a montagem do modelo (viga e chapas de contato).

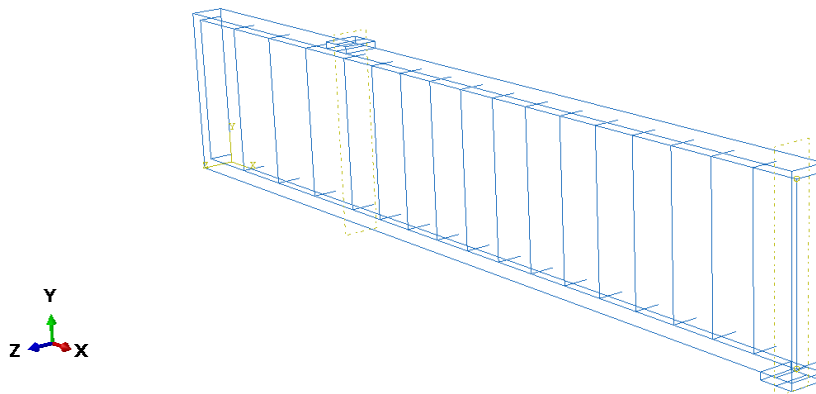
Figura 22 – Partes da viga em Assembly



Fonte: Autora (2021).

A figura 23 mostra o posicionamento das armaduras.

Figura 23 – Detalhe da armadura na parte interior da viga.



Fonte: Autora (2021).

4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO

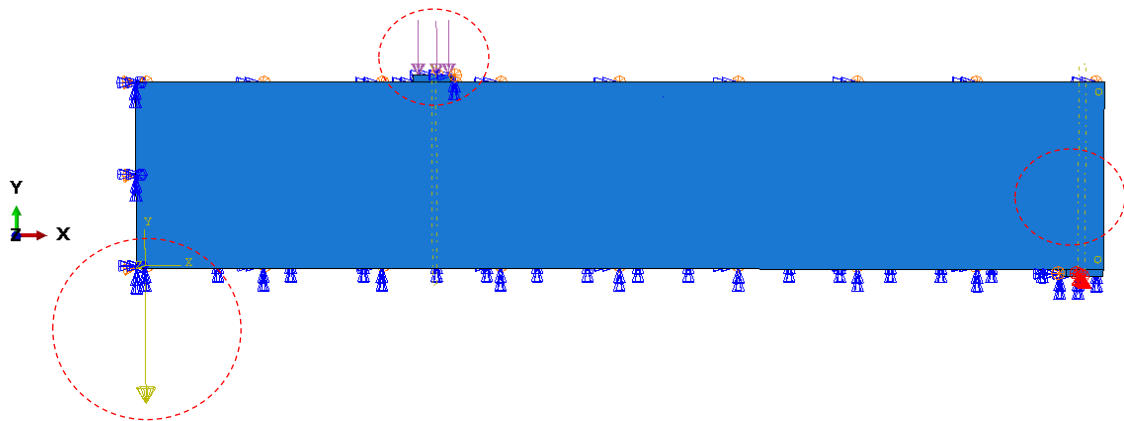
No estudo foram empregadas as mesmas condições de apoio dos ensaios de Lima *et al.* (2005): apoio de primeiro e segundo gênero, para que se possa manter a coerência no modelo físico. Desta forma, foram adotados elementos rígidos nos apoios, onde a força aplicada será considerada uniformemente distribuída no tamanho do elemento 5cm x 5 cm (conforme aparelhos de apoio utilizados no modelo experimental), ou seja, o centro dessa peça fica exatamente onde teoricamente a força seria aplicada caso estivesse em contato direto com a viga. O carregamento aplicado

foi de 50% do seu valor total, visto que o plano X-Y foi dividido em duas partes, sendo assim, foi aplicado um carregamento de 0,6 kN/cm² e também, o peso próprio. A carga de P/2 em cada um dos apoios foi adotada para as simulações numéricas por terem sido o fundo de escala dos gráficos apresentados por Lima *et al.* (2005).

O carregamento considerado foi obtido da seguinte forma:

$$\frac{P/2}{A_{contato}} \quad (12)$$

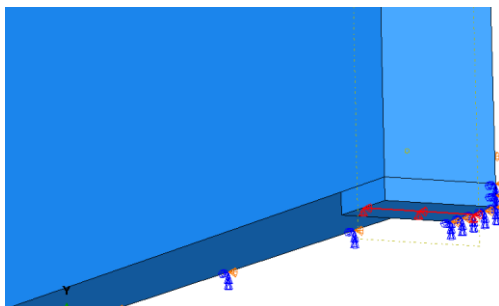
Figura 24 – Esquema geral das condições de contorno e carregamento.



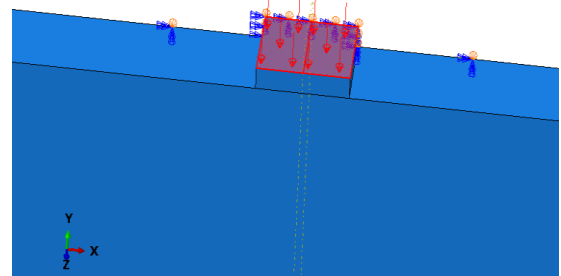
Fonte: Autora (2021).

Figura 25 – Detalhe das condições de contorno e carregamento.

a) Detalhe do apoio.



b) Detalhe da aplicação da carga.

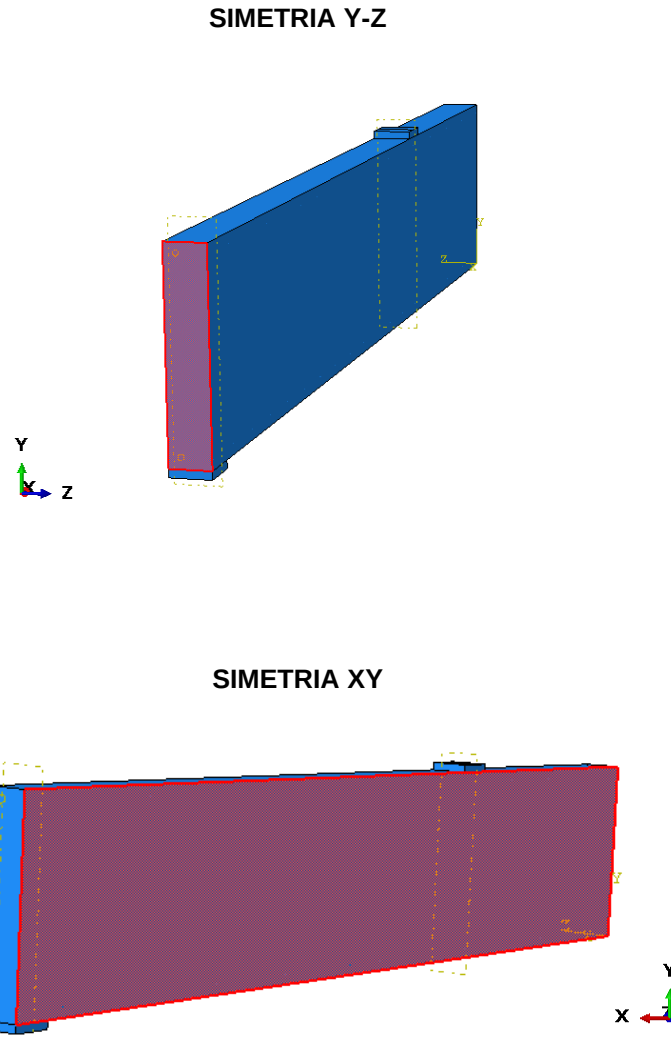


Fonte: Autora (2021).

Como mencionado no item 4.2, a simulação é feita apenas de um quarto ($1/4$) da viga, desta forma, para se obter os mesmos resultados equivalentes aos do modelo

inteiro, é necessária a adoção de condições de contorno adequadas nas faces onde se localizam os planos de simetria (Figura 26).

Figura 26 – Face da viga no plano de simetria Y-Z e X-Y



Fonte: Autora (2021).

O Abaqus possui predefinições que permitem a inserção destas condições nestes planos. Na tabela 09 apresenta um resumo juntamente com as condições de contorno adotadas na simulação:

Tabela 09 –Condições de contorno do apoio e de simetria.

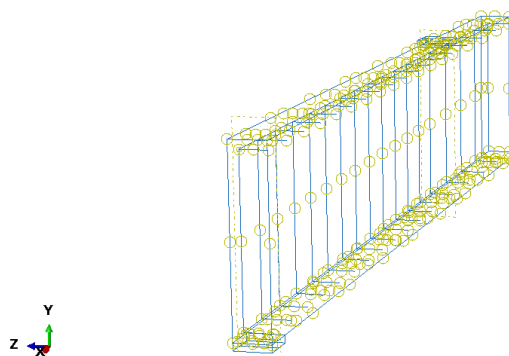
COMANDO	CONDIÇÃO DE CONTORNO	DESCOLAMENTO	OBSERVAÇÕES
SIMETRIA PLANO Y-Z	XSYMM	$U1 = 0$ $UR2 = UR3 = 0$	Impede o deslocamento no sentido de X; Impede rotação em torno dos eixos Y e Z;
SIMETRIA PLANO X-Y	ZSYMM	$U3 = 0$ $UR1 = UR2 = 0$	Impede o deslocamento no sentido de Z; Impede rotação em torno dos eixos X e Y;
APOIO	UNIFORM	$U2 = 0$ $U3 = 0$	Impede deslocamento somente na vertical; rotação em torno do eixo Z;

Fonte: Autora (2021).

4.4 CONTATO

As interações entre as partes constituintes da viga foram definidas da seguinte forma: para o contato entre as barras de bambu e o concreto, e as barras de aço e o concreto, utilizou-se o tipo EMBEDDED REGION que permite embutir uma região na outra, ou seja, considera-se aderência perfeita (Figura 27).

Figura 27 –Aplicação do contato EMBEDDED REGION (Armadura envolvida pelo concreto)



Fonte: Autora (2021).

4.5 MATERIAIS

Após a criação da geometria e condições de contorno da simulação, é necessário criar os materiais utilizados, inserindo cada uma das características que governam o comportamento dos materiais.

4.5.1. Modelo Constitutivo do Concreto

As características físicas do concreto adotado na modelagem estão apresentadas na Tabela 10:

Tabela 10 – Características gerais do concreto.

CARACTERISTICAS GERAIS DO CONCRETO	
f_{cm}	2.5 kN/cm ²
MODULO DE ELASTICIDADE SECANTE	2541.290539 kN/cm ²
DENSIDADE	$2.4525 \cdot 10^{-5}$ kN/cm ³
COEFICIENTE DE POISSON	0.2

Fonte: LIMA *et al.* (2005)

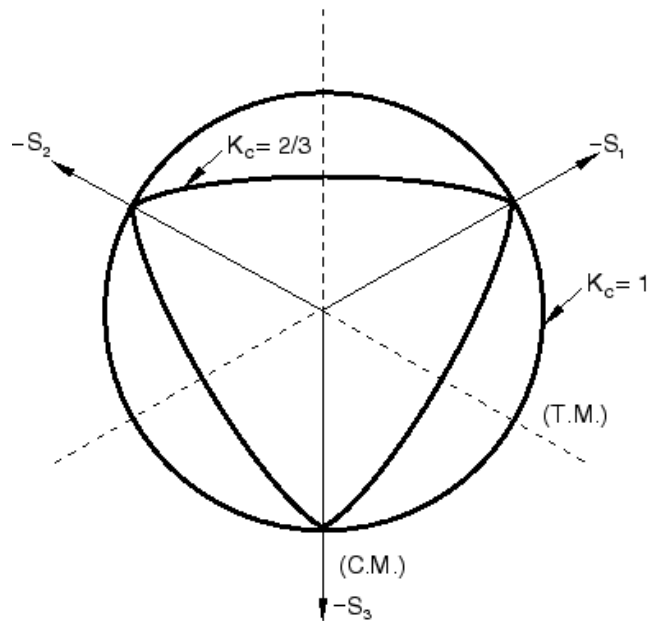
4.5.1.1. Parâmetros plásticos do modelo de dano com plasticidade (CDP)

Para aplicação do comportamento plástico do concreto foi adotado o modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity* (CDP). Este modelo depende essencialmente de quatro parâmetros, K_c , ψ , f_{co}/f_{cb} e ϵ .

Segundo Kmiecik e Kaminski (2011), o CDP é uma adaptação do modelo de Drucker-Prager, que também é utilizado para representar o comportamento mecânico de materiais frágeis. Esses parâmetros possuem a função de expandir as equações de comportamento no estado uniaxial para o estado multiaxial (BATISTA, 2017).

Na figura 28, o valor de K_c representa a razão entre a distância do eixo hidrostático ao meridiano de tração e de compressão no plano desviador. O valor $k_c = 2/3$ corresponde a forma gráfica da combinação de três elipses tangentes. Quando k_c tiver o valor de 1, a superfície de falha se torna um círculo, sendo -S1, -S2 e -S3 eixos meridionais, C. M. meridiano de compressão e T. M. meridiano de tração.

Figura 28 –Superfície de ruptura na seção transversal desviadora no CDP.



Fonte: Kmiecik & Kaminski (2011).

De acordo com Marques e Araújo (2016), devido ao fato de a superfície de falha ser uma combinação geométrica de duas funções diversas de Drucker-Prager, a função hiperbólica potencial plástica de Drucker-Prager é usada no modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), de acordo com a Equação 14.

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi) + q^2} - p \tan \psi \quad (13)$$

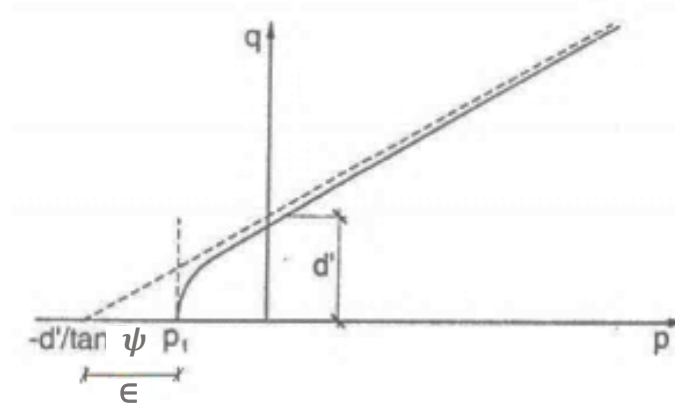
Sendo:

σ_{t0} - Tensão de tração no estado uniaxial;

ψ é o ângulo de dilatação medido no plano meridional para grandes valores de tensão de confinamento. Para o concreto, varia de 36° a 40°. Em termos práticos, esse ângulo determina a capacidade de expansão do concreto ao sofrer deformações plásticas, é consenso adotar um ângulo de 35° para o concreto.

Na figura 29 é ilustrada a função hiperbólica de potencial plástico de Drucker - Prager utilizada no programa Abaqus.

Figura 29 – Função linear e hiperbólica de Druger-Prager

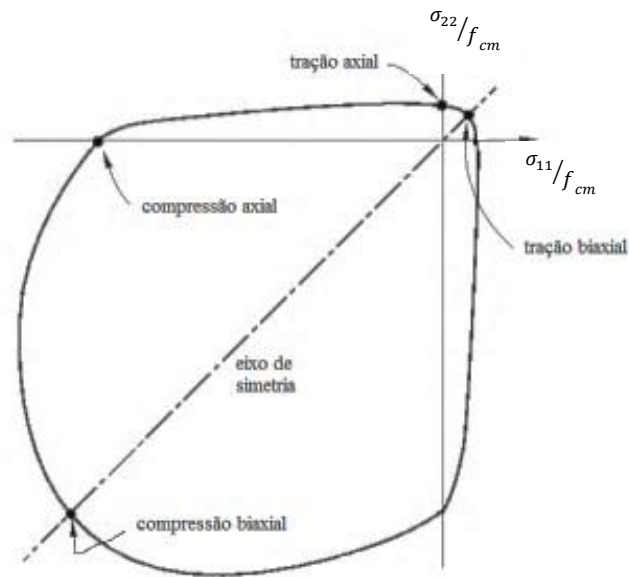


Fonte: Adaptado de Kmiecik & Kaminski (2011), apud ÁVILA (2016).

Segundo Marques e Araújo (2016), em razão da fórmula da função potencial plástica no plano meridional ser hiperbólica é essencial ajustá-la através da excentricidade, que por sua vez representa a taxa de aproximação entre a hipérbole e sua assíntota. O Abaqus (2020) recomenda um valor de excentricidade de $\epsilon = 0,1$, onde significa que o material tem quase o mesmo ângulo de dilatação para diferentes níveis de tensão de confinamento. Para valor de ângulo de dilatação baixo produz-se no material um comportamento frágil.

Outro parâmetro importante para o CDP é o ponto em que o concreto falha sob compressão biaxial. O f_{b0}/f_{c0} é a relação entre a resistência no estado biaxial e a resistência no estado uniaxial. O manual do programa Abaqus (2020) especifica um valor padrão de 1,16 para esta relação. Os estados de tensões uniaxial e biaxial podem ser observados na figura 30:

Figura 30 – Resistência do concreto sob tensão biaxial no CDP.



Fonte: Kmiecik & Kaminski (2011).

Tabela 11 – Parâmetros plásticos do modelo de dano com plasticidade (CDP)

CONCRETO (DCP)	
Ângulo de Dilatação	35°
Excentricidade	0,1
f_{bo} / f_{co}	1,16
K_c	0,667
Viscosidade	0,007985

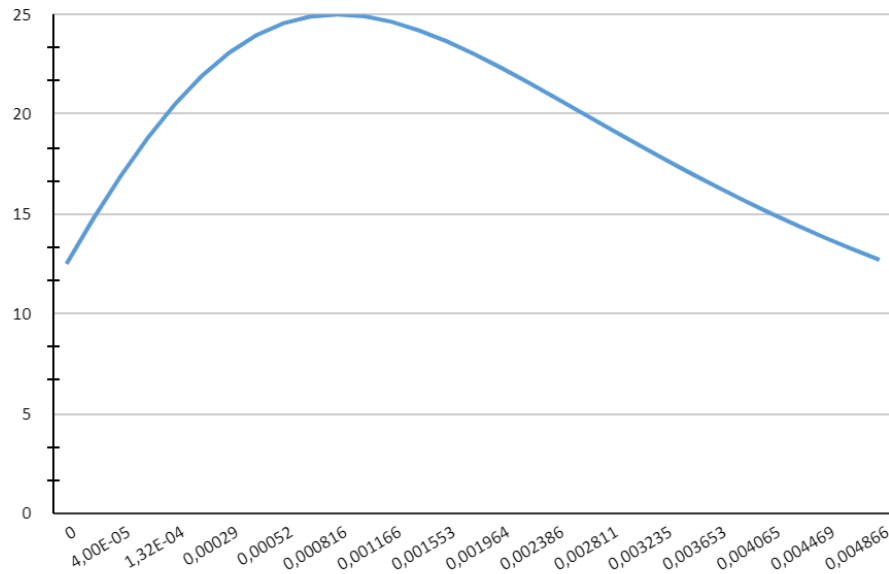
Fonte: ABAQUS (2020)

Devido ao fato de o CDP apresentar frequentemente dificuldades de convergência, recomenda-se adotar um valor de viscosidade ligeiramente superior a zero (MOREIRA, 2019). Desta forma, adotou-se um V de 0.007985, conforme utilizado por Najafgholipour *et al.* (2017), que trabalhou com simulações numéricas similares a deste trabalho.

O modelo de plasticidade danificada de concreto (CDP) é um dos modelos de concreto mais promissores para a simulação de falha de concreto (LAMBERT, 2019). Sendo assim, além destes parâmetros citados acima, é necessário definir o comportamento do concreto à compressão e à tração, definindo as relações entre tensão e deformação.

Para definição do comportamento do concreto na compressão e na tração, foram obtidos valores a partir da tabela elaborada por Lambert (2019) que obedece aos gráficos 05 e 06 de tensão-deformação.

Gráfico 05 –Diagrama tensão - deformação inelástica do concreto de acordo com os valores adotados no ABAQUS para este trabalho (Compressive Behavior)



Fonte: Lambert (2019)

De acordo com Moreira (2019), no Abaqus é possível determinar o comportamento do concreto à tração após fissuração de duas maneiras, a primeira, pode ser feito através da tensão-deformação inelástica, entretanto o comportamento pode variar em função do tamanho da malha adotada no modelo numérico. Desta forma, o método mais eficaz é pelo método baseado na energia de fratura do concreto, idealizado por Hillerborg, Modéer e Petersson (1976). A energia necessária para se abrir uma fissura é considerado como um parâmetro para se determinar o comportamento dos materiais.

Reinhardt *et al* (1986) *apud* Lambert (2019) determinaram experimentalmente a relação entre tensão de tração e a abertura de fissura por uma lei coesão, chegando a expressão da equação 14.

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left[1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] \exp \left(-c_2 \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (14)$$

onde $c_1 = 3$; $c_2 = 6,93$; σ_t é a tensão de tração uniaxial; f_t é a tração uniaxial inicial da resistência do concreto; w o valor da abertura da fissura; e w_c a abertura crítica de fissura determinado por:

$$w_c = 5,136 \frac{G_F}{f_t} \quad (15)$$

G_F é a energia de fratura por unidade de área. Ajustando os resultados experimentais, Bazant e Becq-Giraudon (2002) *apud* Lambert (2019), propuseram a energia de fratura do concreto como:

$$G_F = \alpha_a \left(\frac{\sigma_{cu}}{0,051} \right)^{0,46} \left(1 + \frac{d_a}{11,27} \right)^{0,22} (w/c)^{-0,30} \quad (16)$$

Sendo d_a o tamanho máximo do agregado em mm; w/c é a relação água/cimento em massa; e $\alpha_a = 1,0$ para agregado arredondado ou $\alpha_a = 1,44$ para agregado triturado.

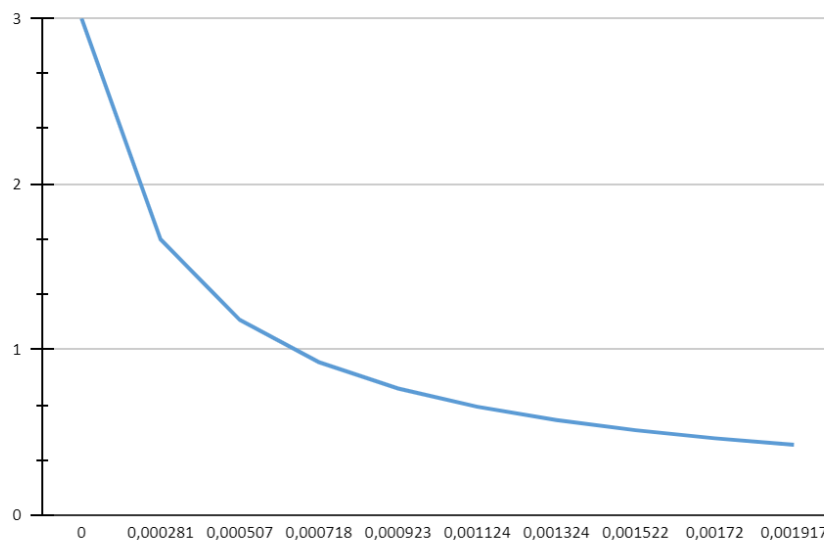
Sendo assim, a Equação 17 pode ser resumida na seguinte fórmula:

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = 1 - \frac{w}{w_{ec}} \quad (17)$$

onde a abertura crítica de fissura equivalente é determinado por:

$$w_{ec} = \frac{2G_F}{f_t} \quad (18)$$

Gráfico 06 –Diagrama tensão versus abertura de fissuras do concreto de acordo com os valores adotados no Abaqus para este trabalho (Tensile Behavior)



Fonte: Lambert (2019)

4.5.2. Modelo constitutivo aço

A seguir estão resumidas as principais características dos aços.

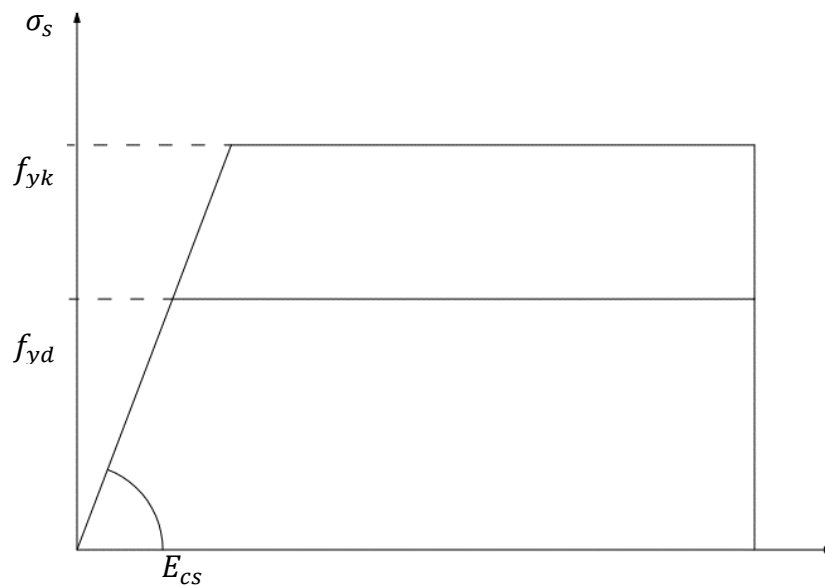
Tabela 12 –Parâmetros para o comportamento do aço

CARACTERÍSTICAS	AÇO CA-50	AÇO CA-60
Modulo de elasticidade	21000 kN/cm ²	21000 kN/cm ²
Coeficiente de Poisson	0.3	0.3
f_{yk}	50 kN/cm ²	60 kN/cm ²

Fonte: Autora (2021).

Quanto ao comportamento tensão - deformação das armaduras passivas, a simulação baseou-se na configuração de material elasto-plástico perfeito, que seguem o seguinte diagrama representado no gráfico 07:

Gráfico 07– Diagrama Tensão x Deformação idealizado



Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

4.5.3. Modelo construtivo bambu

O bambu é um material natural com grandes variações em suas resistências, pois depende de fatores como teor de umidade, espécie, idade entre outros fatores já citados no capítulo 3 desta monografia. Tendo em vista todas estas variáveis, neste

trabalho serão considerados valores médios, encontrados na literatura, como mostrado na tabela 13.

Tabela 13 –Parâmetros para o comportamento do bambu

BAMBU		
f_{ct}	Resistência à tração	86.96 MPa
E_t	Modulo de elasticidade	14.59 GPa
ν	Coeficiente de Poisson	0,26

Fonte: Autora (2021).

O comportamento tensão de tração x deformação do bambu, foi considerado elástico linear até a ruptura; assim, as tensões nas varas de bambu podem ser definidas com base na equação 19:

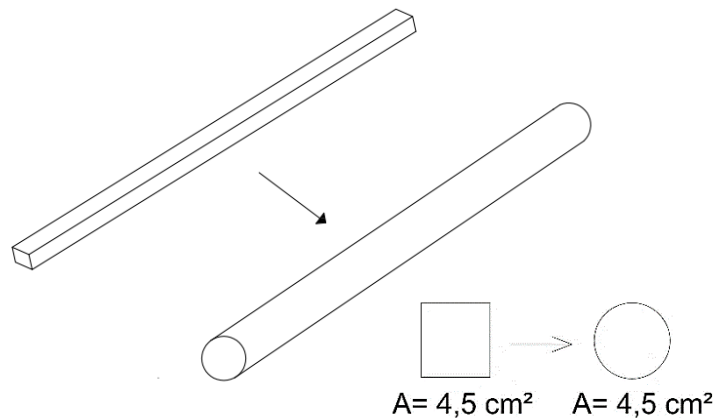
$$\sigma_b = E_b \cdot \varepsilon_b \quad \varepsilon_b \leq \varepsilon_{cr} \quad (19)$$

em que E_b é o módulo de elasticidade da vara de bambu, ε_b é a deformação no bambu e ε_{cr} é a deformação de ruptura das varas de bambu.

Para modelagem da viga armada com bambu aplicando a condição de contato entre o bambu e o concreto pelo comando EMBEDDED REGION, foi necessário transformar a seção retangular da ripa de bambu em uma seção circular (barra). Desta forma, foi utilizada a seguinte formulação:

$$\frac{A_r}{2} = \pi r^2 \quad (20)$$

Sabendo que a área das duas armaduras de bambu corresponde ao valor de $A_r = 4,50 \text{ cm}^2$, encontrando um valor de $r = 0,84628$ e $\phi = 1,69125$, como mostrado na figura 31.

Figura 31– Transformação da área

Fonte: Autora (2021).

4.6 MALHA

Esta é umas das etapas mais importantes no procedimento de análise no método dos elementos finitos, que consiste em definir a discretização das regiões em elementos finitos. Esses elementos variam em forma, distribuição e tipo.

A tabela 14 mostra os números de incrementos adotados para as vigas, após a realização de algumas tentativas, chegando a um valor que obtivesse resultados com maior precisão. Esses foram valores de número de incrementos de carga; incremento inicial, mínimo e máximo; este passo é importante por resultaram em análises mais estáveis numericamente.

Tabela 14 –Parâmetros usados na criação de incrementos

PARTE	TEMPO	NÚMERO MÁXIMO DE INCREMENTOS	TAMANHO DO INCREMENTO		
			INICIAL	MÍNIMO	MÁXIMO
VIGA DE BAMBU	1,0	300	1	1E-06	1
VIGA DE CONCRETO	1,0	300	1	1E-06	1

Fonte: Autora (2021).

Neste modelo, foram adotados tamanhos de 1 cm para a viga e 4.6 para as barras, como mostrado na figura 32. Para que uma modelagem obtenha resultados precisos, não é interessante a adoção de elementos muito grandes ou muito

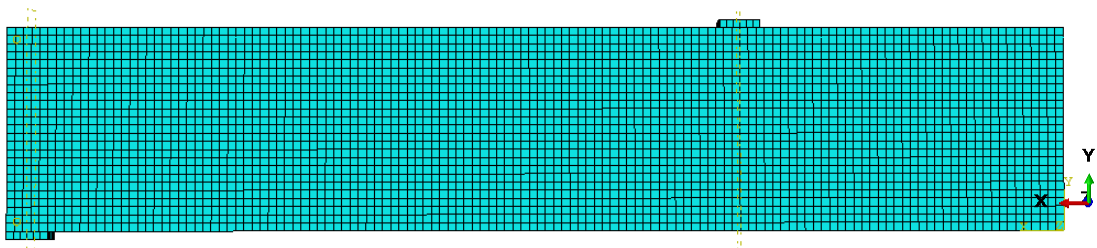
pequenos, visto que ao se utilizar tamanhos maiores a simulação pode não convergir ou gerar valores imprecisos, contudo se forem utilizados tamanhos muito pequenos irá gerar esforço computacional desnecessário. Na tabela 15 são mostrados os tamanhos adotados para os elementos da malha de cada parte do modelo.

Tabela 15 – Tamanho das malhas adotados para cada parte.

PARTE	TAMANHO GLOBAL APROXIMADO (cm)
VIGA	1
Apoio	1
Barras longitudinais	4.6
Taliscas de bambu	4.6
Barras porta estribo	4.6
Estribos	2.3

Fonte: Autora (2021).

Figura 32– Malha



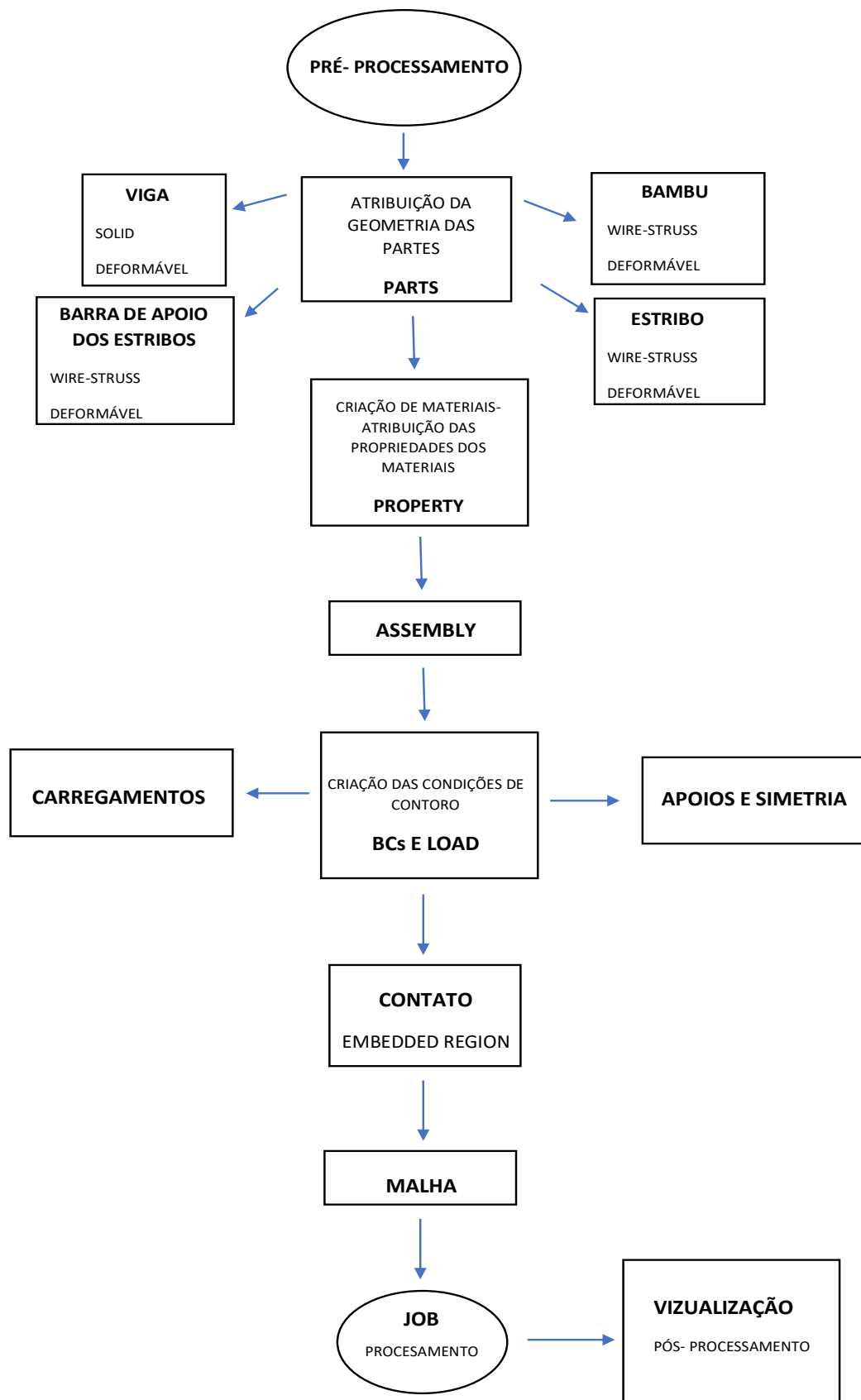
Fonte: Autora (2021).

Após configuradas todas as variáveis da simulação, definição dos materiais, esforços solicitantes, condições de contorno, contatos e a malha de elementos finitos, foram realizadas as simulações.

4.7 FLUXOGRAMA

No intuito de facilitar o entendimento do funcionamento do programa, foi elaborado um fluxograma (figura 33) resumindo os comandos e passos utilizados no Abaqus para modelagem da viga armada com bambu.

Figura 33– Fluxograma: resumo da metodologia adotada

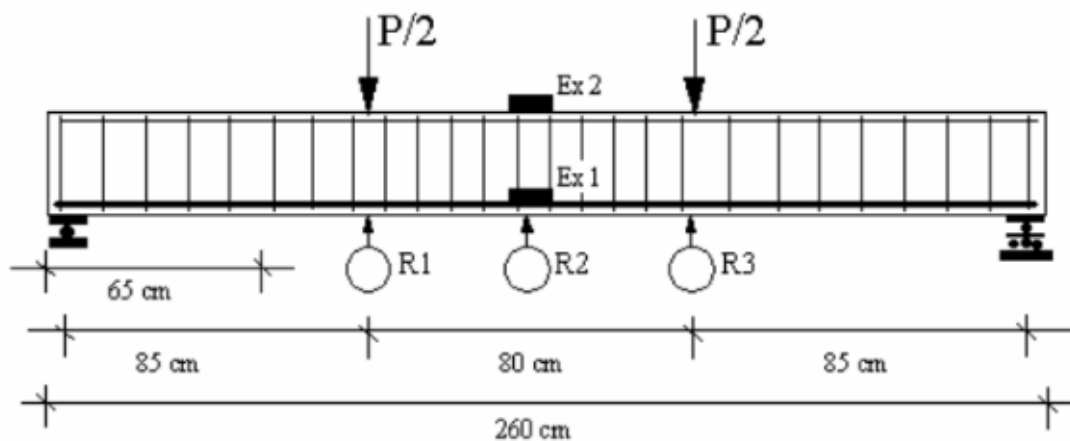


Fonte: Autora (2021).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No experimento realizado por Lima *et al.* (2005), o comportamento das vigas foi observado por medições das deformações na fibra mais comprimida do concreto e na armadura longitudinal, na seção central, com o auxílio de extensômetros elétricos de resistência. Também foram utilizados medidores de deslocamento mecânicos com sensibilidade de 0,01mm, para avaliar as deflexões abaixo dos pontos de aplicação das forças e na seção transversal central das vigas. Além disso, também foram realizadas leituras de abertura de fissuras de cisalhamento e flexão com fissurômetro, como mostrado na figura 34. Para fins de comparação, os resultados obtidos pela simulação serão confrontados com os obtidos em laboratório.

Figura 34– Detalhes da instrumentação utilizado por Lima (2005).



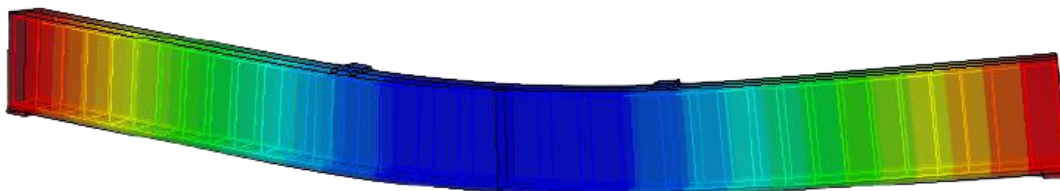
Fonte: Lima *et al.* (2005).

Foram realizadas duas análises distintas. Na primeira análise, a viga modelada com armadura principal de tração em aço CA-60, na segunda análise foi realizada a modelagem de uma viga com armadura principal de bambu, afim de fazer comparações também entre a viga referência (armadura de aço) e a viga com reforço em bambu simuladas numericamente.

Todos os modelos analisados tiveram o comportamento esperado, com os maiores deslocamentos e deformações no meio do vão, assim como no experimento realizado por Lima *et al.* (2005). As figuras 35 e 36 mostram o mapa de cores para o

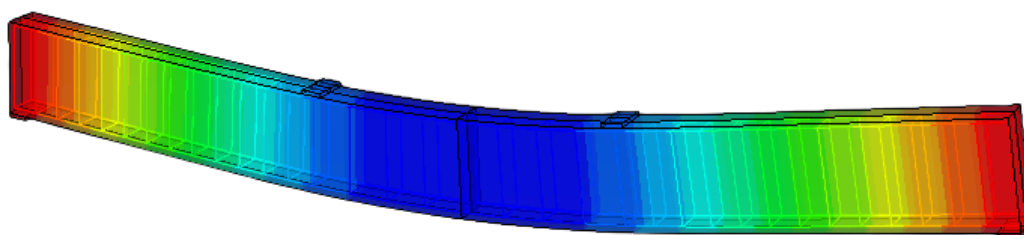
deslocamento vertical da viga, assim como sua configuração deformada, para a viga inteira, lembrando que a simulação foi realizada em apenas um quarto da viga.

Figura 35– Descolamentos verticais da viga de concreto armado com bambu.



Fonte: Autora (2021).

Figura 36– Deslocamentos verticais da viga de concreto armado com aço



Fonte: Autora (2021).

Através da análise dos resultados, foi possível verificar que os valores dos deslocamentos verticais ficaram próximos dos resultados experimentais, tendo uma variação (numérico em relação ao experimental) para a viga de aço de 4,651%, e de 4,179% para a viga armada com bambu. Esses valores foram para a carga última de 39 e 34 KN, respectivamente, como mostrado na tabela 16.

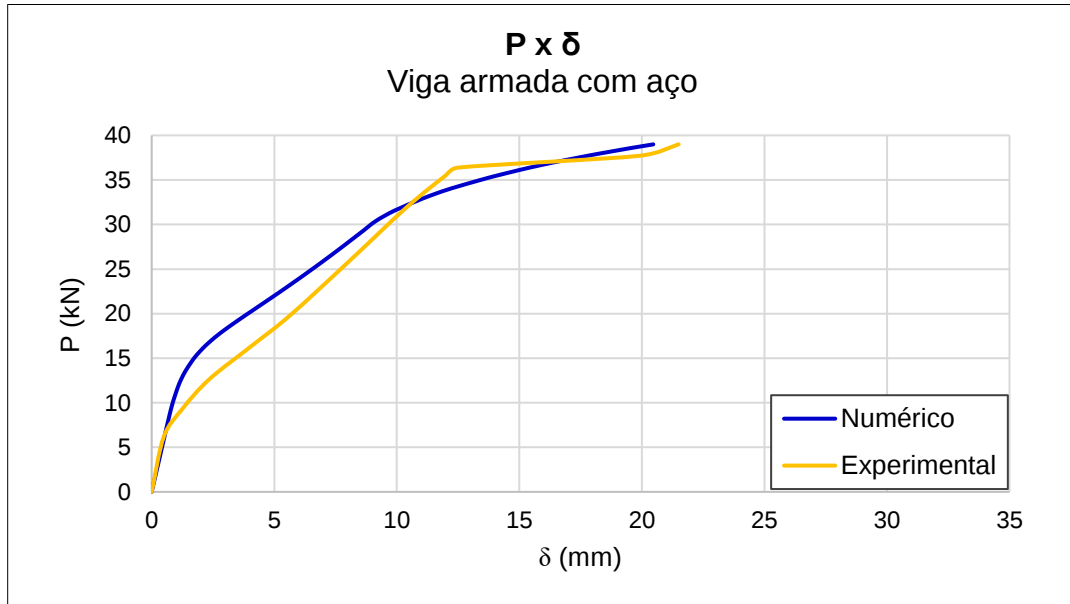
Tabela 16 – Comparação dos resultados numéricos com experimental dos deslocamentos verticais

VIGA	DESLOCAMENTO O EXPERIMENTAL	DESLOCAMENTO NÚMÉRICO (ABAQUS Model)	DIFERENÇA DE PERCENTUAL ENTRE MODELO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO
Viga armada com aço	20,46 mm	21,5 mm	4,65%
Viga armada com bambu	33,5 mm	32,10 mm	4,17%

Fonte: Autora (2021).

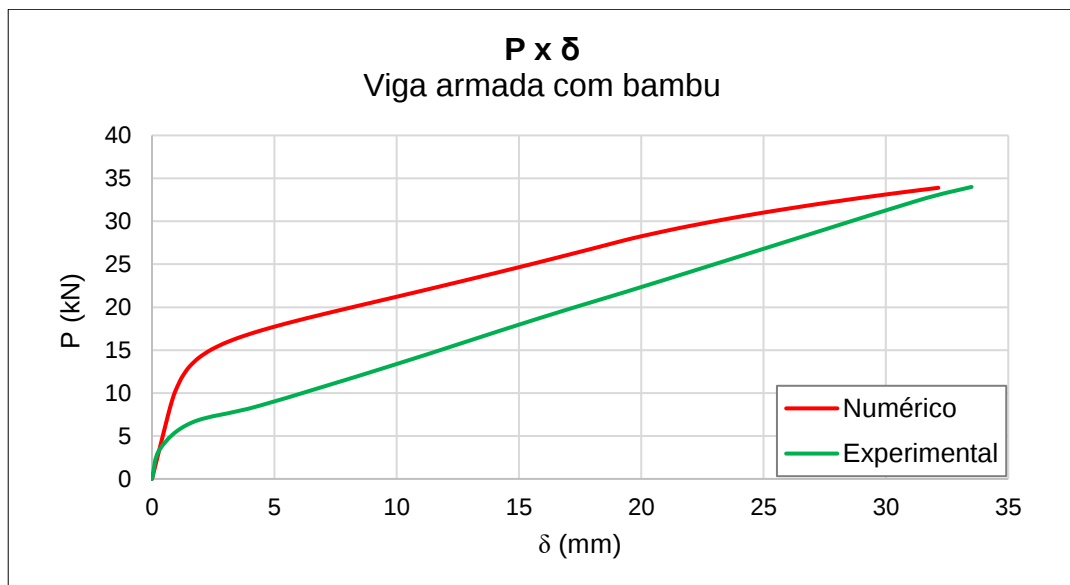
Os gráficos 08 e 09 representam as curvas Carga x Deslocamento obtidas pela simulação numérica através do software ABAQUS usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) juntamente com a curva obtida no modelo experimental.

Gráfico 08 – Diagrama de Carga vs deslocamento do aço.



Fonte: Autora (2021).

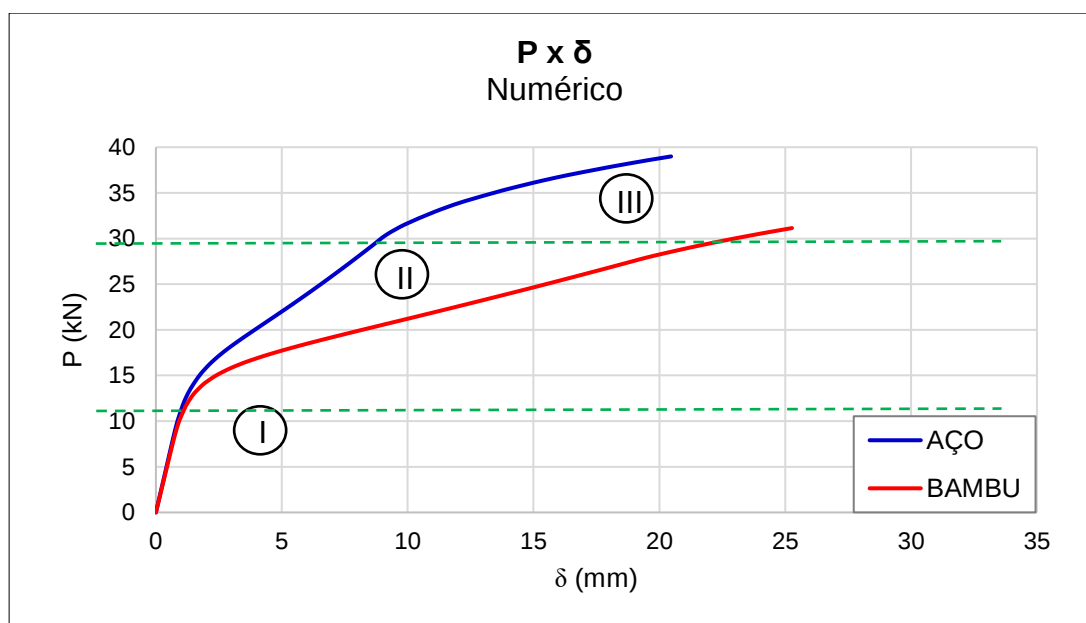
Gráfico 09 –Diagrama de Carga vs deslocamento do bambu.



Fonte: Autora (2021).

Conforme pode ser observado, os modelos apresentam comportamento linear até antes de 15 kN (trecho I), isso se deve as considerações das propriedades dos materiais constitutivos que foram considerados para os carregamentos iniciais. Também é possível notar que a viga armada com aço apresentou uma maior rigidez, sendo um resultado esperado, visto que o módulo de elasticidade do aço é cerca de 15 vezes maior que o do bambu, como mostrado no gráfico 10.

Gráfico 10 –Comparação entre os Diagrama de Carga vs deslocamento do aço e do bambu.

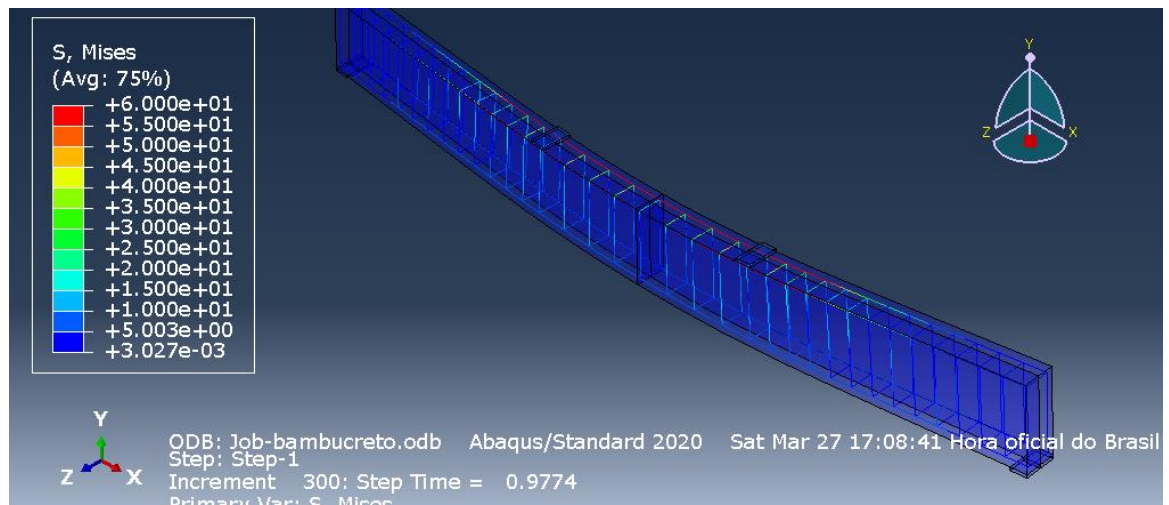


Fonte: Autora (2021).

O trecho I dos gráficos 08 e 09 acaba no momento em que o concreto inicia sua fissuração. Seguidamente a armadura longitudinal começa a trabalhar na tração na parte inferior da viga, comportando-se como mostrado no trecho II. Observando-se também, que os modelos numéricos apresentaram comportamento semelhante ao obtido em laboratório.

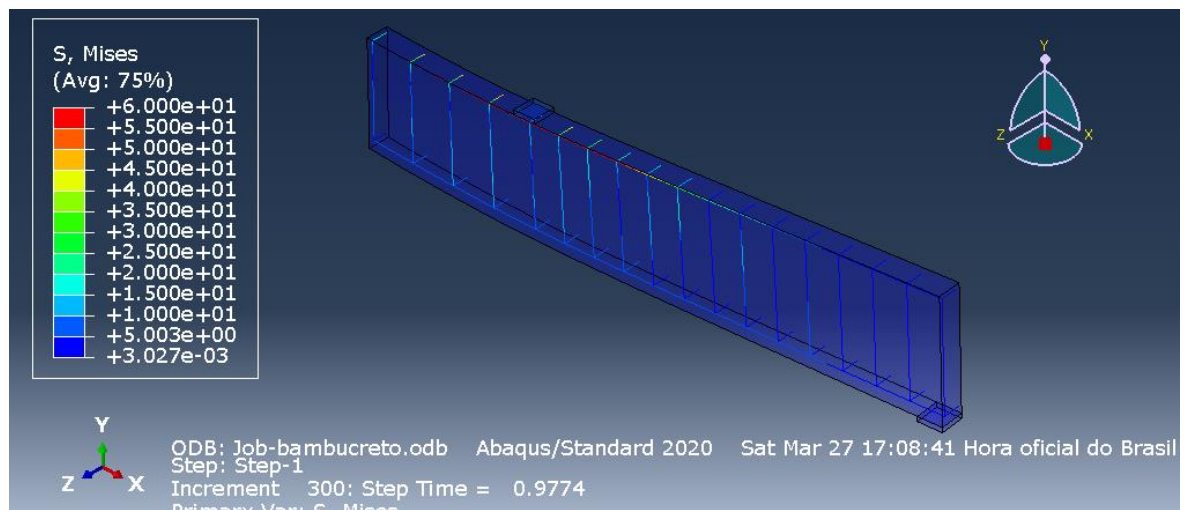
As vigas atingem o estado de limite último (trecho III) quando uma força de 34 kN, para a reforçada com bambu, e uma de 39 kN, para a armada com aço, são aplicadas. Neste ponto, os deslocamentos da viga começam a aumentar a uma taxa mais elevada, além disto, a capacidade da viga distribuir as tensões na seção crítica reduz muito, causando maiores deflexões. A figura 37 e 38 mostra as tensões de von Mises para a carga última para a viga armada com bambu.

Figura 37 – Tensões de von Mises para a carga última



Fonte: Autora (2021).

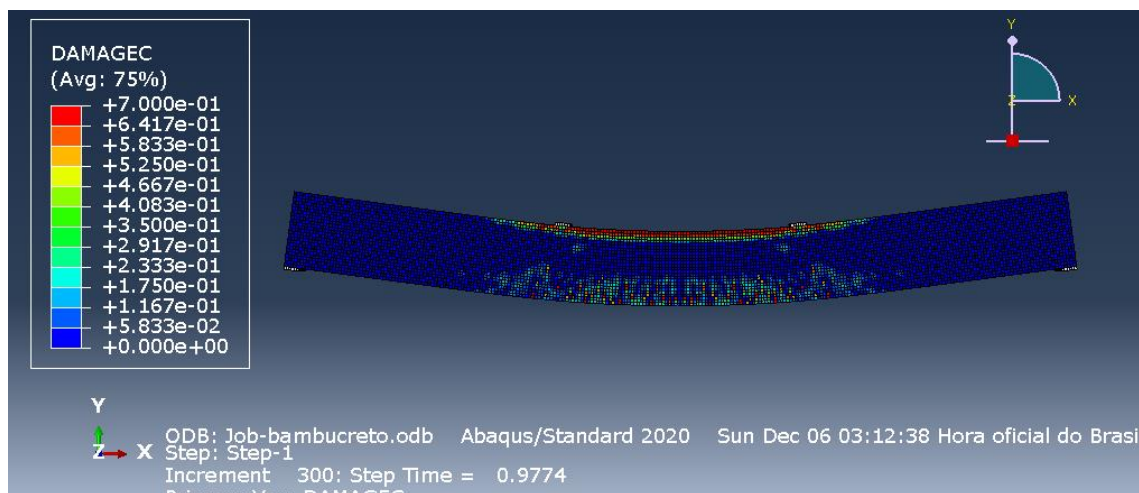
Figura 38– Detalhamento das tensões de von Mises para a carga última



Fonte: Autora (2021).

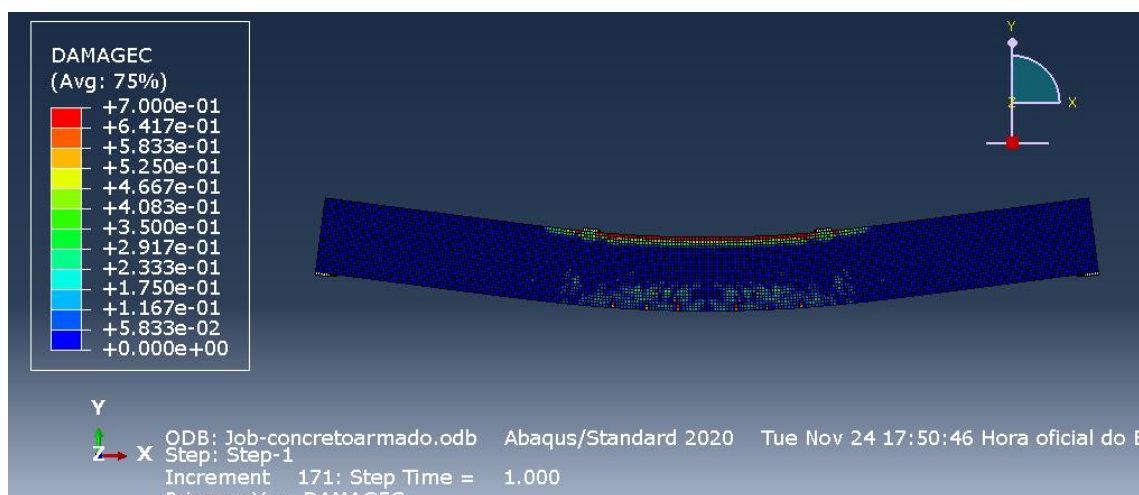
Nas figuras 39, 40, 41 e 42 apresentam, respectivamente, os danos à compressão e à tração para cada uma das vigas investigadas.

Figura 39– Dano por compressão da viga de bambu.



Fonte: Autora (2021).

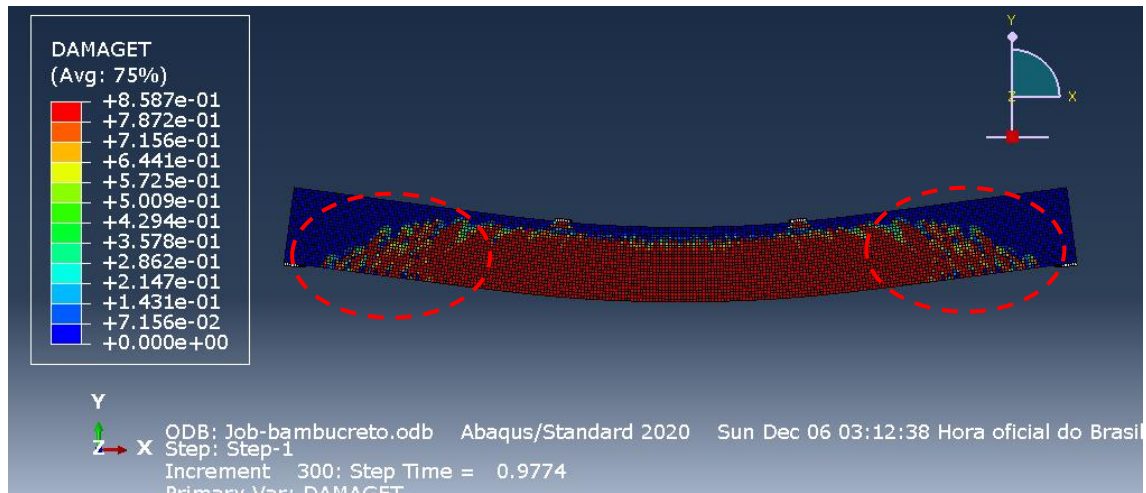
Figura 40– Dano por compressão da viga de aço.



Fonte: Autora (2021).

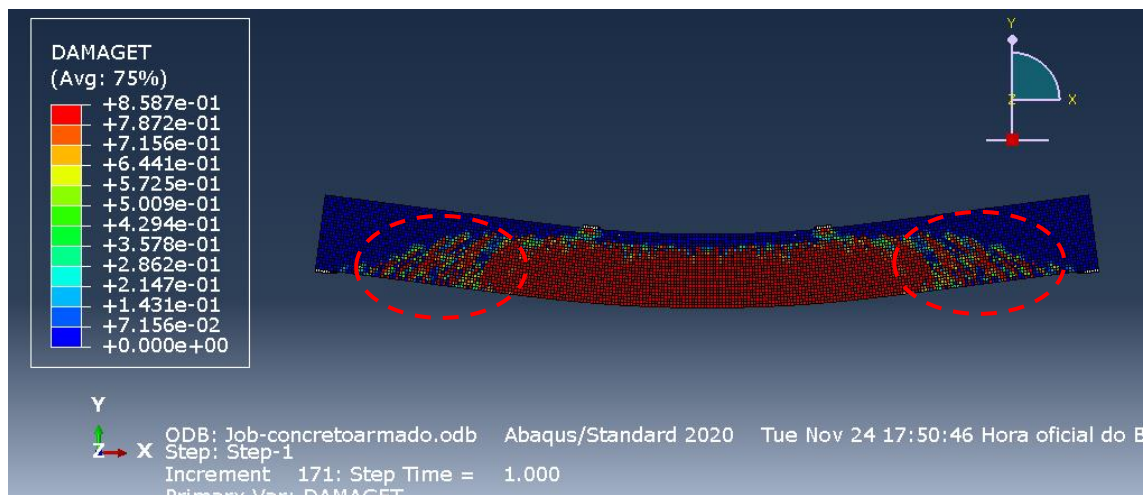
Percebe-se que a ordem de grandeza de dano também é coerente, sendo que o concreto obteve nas duas vigas, uma magnitude de dano por compressão em torno de 0,7. Conforme ilustra as figuras 39 e 40, entre os modelos investigados, não houve redução do dano à compressão. Tal resultado era esperado, uma vez que a resistência à compressão do concreto não foi alterada. Porém é possível perceber que a viga armada com bambu apresenta uma maior concentração de tensões compressão na região inferior da viga. Isso ocorre por conta do efeito Poisson, dado que as vigas armadas com bambu apresentaram maiores deformações longitudinais de alongamento, também experimentaram maiores deformações de encurtamento da direção da largura da seção.

Figura 41– Dano por tração da viga armada com bambu.



Fonte: Autora (2021).

Figura 42– Dano por tração da viga armada com aço



Fonte: Autora (2021).

Por outro lado, no que diz respeito ao dano por tração, a viga armada com aço apresentou uma redução significativa nas extremidades (Figura 42) quando comparadas à viga com reforço de bambu (Figura 41). Tal fato é corroborado pela menor quantidade de elementos que foram sujeitos à uma falha irreversível durante o processo de fratura, visto que, o aço apresenta além de uma perfeita aderência com o concreto, uma rigidez maior que o bambu.

Na tabela 17 são apresentados, para cada viga modelada, alguns valores que retratam o comportamento das mesmas em comparação ao experimental até o momento do início do escoamento da armadura longitudinal, de acordo com as hipóteses adotadas.

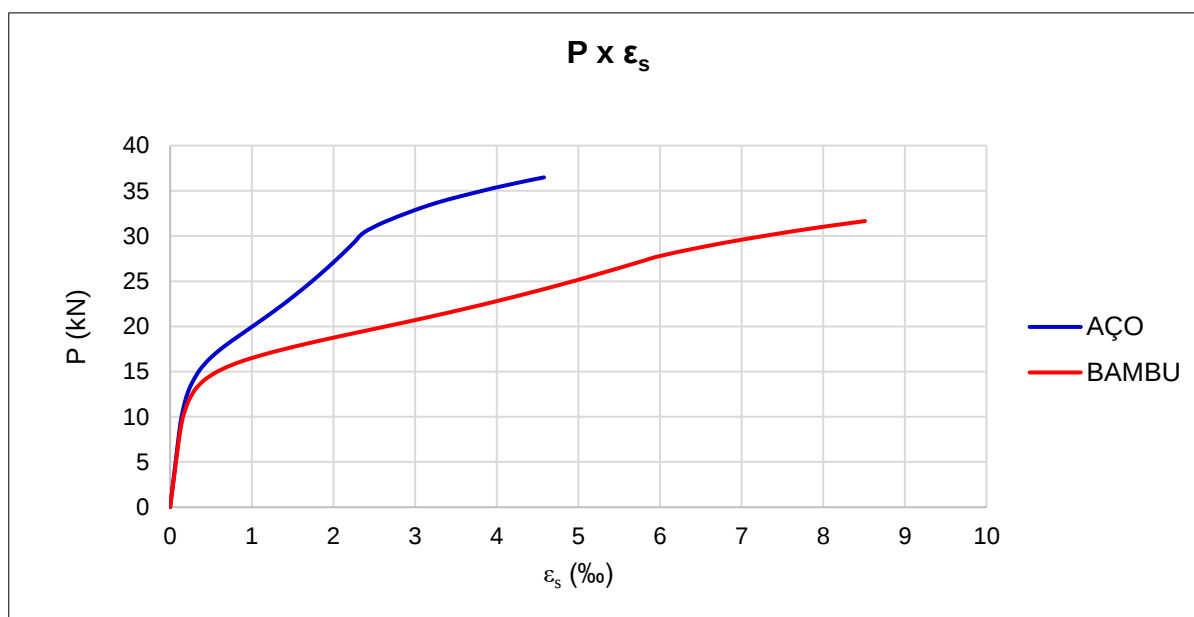
Tabela 17 – Comportamento das vigas modeladas no ABAQUS (diferença de percentual).

VIGA	VIGA AÇO	VIGA BAMBU
Área média de reforço (cm ²)	1,00	4,5
Carga ruptura experimental (kN)	37	32
Carga ruptura numérico (kN)	37	32
$\epsilon_{s,m\acute{a}x}$ (‰) numérico	4,58	8,51
$\epsilon_{s,m\acute{a}x}$ (‰) experimental	4,2	9
Diferença entre numérico e experimental ($\epsilon_{s,m\acute{a}x}$) (%)	8,29	5,44
$\epsilon_{c,m\acute{a}x}$ (‰) numérico	1,51	1,37
$\epsilon_{c,m\acute{a}x}$ (‰) experimental	1,66	0,84
Diferença entre numérico e experimental ($\epsilon_{c,m\acute{a}x}$) (%)	9,03	38,68
Desl. Vertical máx (mm) numérico	21,05	32,10
Desl. Vertical máx (mm) experimental	20,4649	33,5
Diferença entre numérico e experimental (desl. Vertical) (%)	4,81	4,179
Ruptura experimental	Escoamento	Escoamento
Ruptura numérico	Escoamento	Escoamento

Fonte: Autora (2021).

No gráfico a seguir (gráfico 11), é apresentado os dados obtidos das deformações específicas das armaduras das vigas modeladas numericamente.

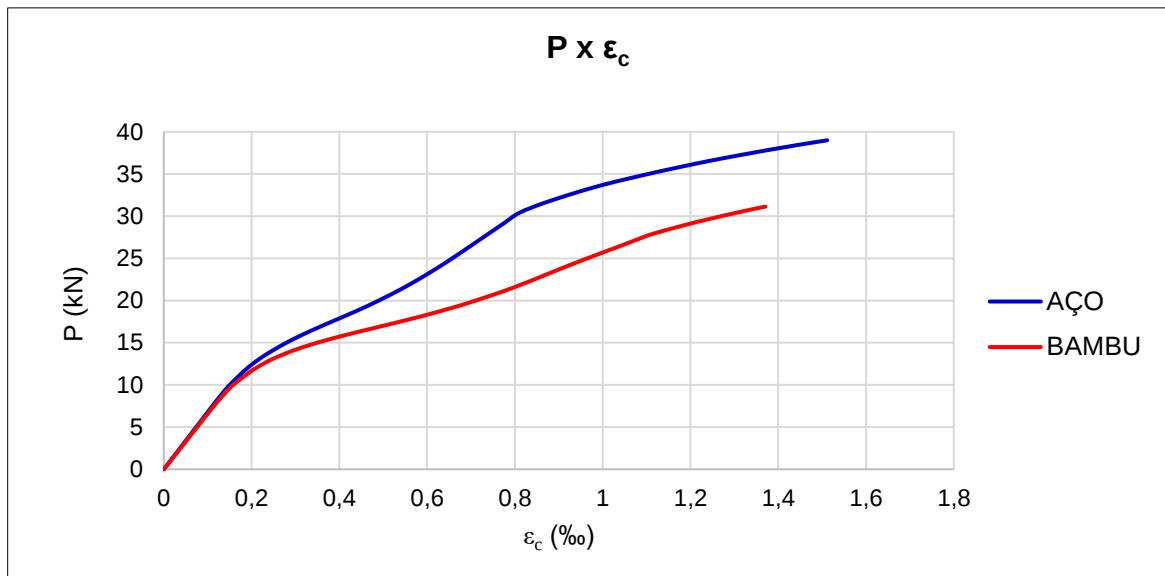
Gráfico 11 – Comparação entre os Diagramas de Carga vs deformação específica da armadura longitudinal do aço e do bambu dos resultados numéricos.



Fonte: Autora (2021).

Uma primeira análise dos resultados mostrou a eficiência do bambu quando utilizado como armadura longitudinal. A partir dos resultados, observou-se que o escoamento das armaduras de aço e bambu ocorreu em 37 kN e 32 kN, respectivamente. Como esperado, o início do escoamento da armadura de aço ocorreu com carga superior à do bambu, com uma diferença entre o valor de carga de ruptura de aproximadamente 13,51%. Diferente do diagrama de deformação específica da armadura, a deformação do concreto (gráfico 12) apresentou comportamento similar com uma diferença de $\epsilon_{c,máx}$ (‰) de aproximadamente 9,03 %, porém o valor entre o experimental e o numérico da viga de bambu obteve um diferença de 38,68%, ressaltando que assim como no experimental, a deformação do concreto nos dois casos, não ultrapassou o valor de 2‰. No diagrama a seguir é mostrado os valores encontrados para as deformações específicas do concreto de cada viga.

Gráfico 12 – Comparação entre os Diagramas de Carga vs deformação específica do concreto da viga armada com aço e a viga armada com bambu dos resultados numéricos.

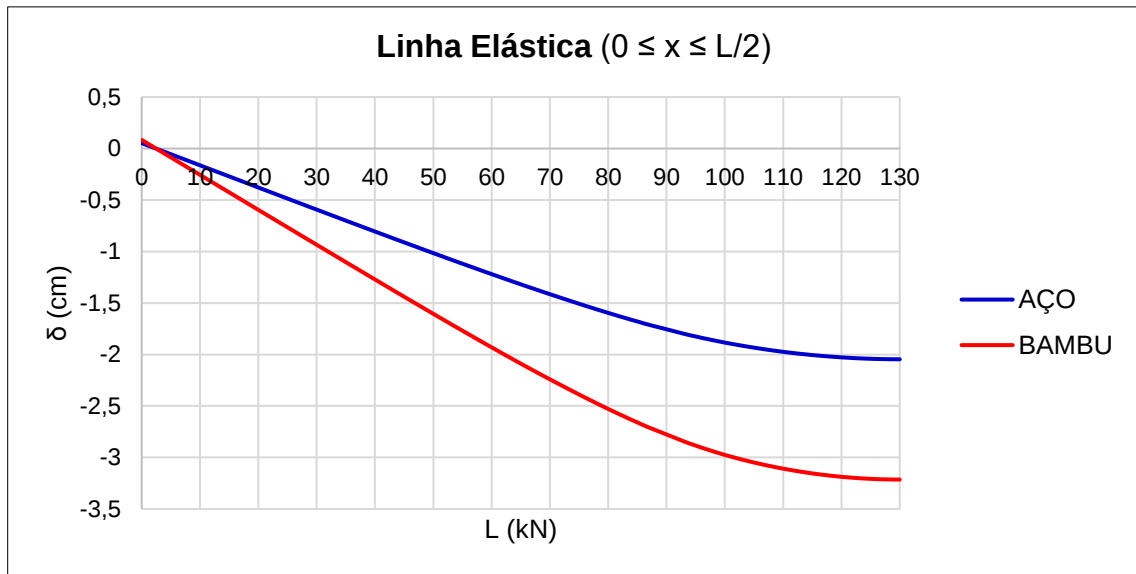


Fonte: Autora (2021).

As divergências entre os valores obtidos nos ensaios realizados por Júnior *et al.* (2005) e a modelagem numérica, como também a diferenças de valores últimos para as armaduras de aço e as de bambu ocorreram devido a não existência de uma aderência perfeita entre o bambu e o concreto, porém mesmo apresentando essa limitação, as varas de bambu apresentaram um bom desempenho. Diante disto, pode-se afirmar que a viga armada com bambu apresentou um bom comportamento diante das hipóteses adotadas, tendo em vista que é necessário um estudo mais aprofundado sobre a aderência entre o bambu e o concreto, como também a possibilidade de aplicar um fator redutor na resistência última.

É possível também verificar a deformada da viga através da linha elástica, traçada com a ajuda do próprio Abaqus, sendo assim, podemos verificar o comportamento das vigas em relação aos apoios e carregamentos. Como mostrado no gráfico 13.

Gráfico 13 – Comparação entre as linhas elásticas das vigas armadas com aço e bambu.



Fonte: Autora (2021).

Analisando-se esses diagramas, assim como no experimental e no numérico, também foi possível constatar que existe a compatibilidade de deformações em vigas de concreto armado com bambu. Evidentemente, as vigas de aço mostraram-se mais rígidas, apresentando deslocamento menor ao longo do comprimento.

Com o resultado, nota-se que o modelo constitutivo CDP possibilita a obtenção de resultados similares aos do experimental, sendo mais rígidos para carregamentos iniciais e mais flexíveis nas cargas finais, porém sem pontos de alteração brusca de deslocamentos. Comparando os resultados numéricos das duas vigas reforçadas neste trabalho estudadas, observou-se que todas possuíam valores coerentes com os valores experimentais encontrados por Lima *et al.* (2005), entretanto o modelo numérico de viga reforçada com bambu mostrou-se mais rígido do que o experimental.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, após a obtenção dos resultados das vigas, observa-se que as respostas do modelo numérico estão de acordo com o esperado, apresentando maiores deslocamentos verticais nas partes centrais da viga, assim como uma distribuição de tensões semelhante à de uma viga biapoiada. Pode-se concluir que as condições de contorno aplicadas para um quarto da viga foram satisfatórias, possibilitando uma economia de tempo de processamento das simulações.

O modelo computacional adotado apresentou com boa acuracidade, na descrição do comportamento das vigas reforçadas com bambu, tanto para as deformações específicas como para o deslocamento. A diferença entre o modelo físico e o modelo numérico das forças últimas foi menor que 10 % nas duas vigas, desta forma, nota-se que a precisão do modelo numérico para simulação de vigas de bambu é equivalente a precisão as armadas de aço.

O mecanismo de falha do reforço da viga de concreto é modelado de forma eficaz pelo método dos elementos finitos, sendo as cargas últimas previstas muito próximas das cargas últimas obtidas durante os ensaios experimentais realizados por Lima *et. al.* Sendo assim, é possível a utilização dos programas de modelagem e simulação de concreto armado para analisar o comportamento das vigas armadas com bambu, considerando-se um comportamento elástico linear até a ruptura do bambu e um modelo de dano para o concreto, reforçando o que FERREIRA (2002) afirmou, que: é possível dimensionar vigas de concreto reforçadas com bambu utilizando a teoria de flexão das vigas armada com aço.

Pode-se concluir que a utilização do bambu como armadura na área tracionada em vigas de concreto é viável do ponto de vista estrutural, para estruturas de pequeno porte, dado que apresentou um bom desempenho, com diferenças aceitáveis em comparação ao aço. Mostra-se necessário adotar coeficientes de segurança maiores, devido ao fato de o bambu ser um material natural e possuir variações em suas propriedades físicas e mecânicas. É importante ressaltar que é preciso estudos mais aprofundados para uma melhor avaliação da aderência entre o bambu e o concreto, e também conhecer melhor a sua fragilidade em relação a umidade, para que seu desempenho seja melhorado.

Assim, espera-se que este trabalho possa contribuir para uma melhor compreensão do comportamento das vigas de concreto armadas com bambu e que

sirva de estímulo para outros trabalhos nesta área, utilizando-se modelagem computacional.

Devido à limitação do tempo análises adicionais não foram realizadas neste trabalho, e, portanto, institui-se, como propostas para trabalhos futuros. As propostas sugeridas são:

- Modelagem de vigas de bambu para diferentes taxas de armadura e com armadura mista (aço e bambu);
- Análise e modelagem da aderência bambu- concreto;
- Modelagem de outros elementos estruturais de concreto com reforço de bambu, tais como pilares e lajes;
- Estudos de durabilidade do material bambu-concreto.

REFERÊNCIAS

ABAQUS Version 6.11, User's Manual. RI: Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc, 2012.

ABAQUS, User's Manual. RI: Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc, 2017.

AFFONSO, Italo Dourado. **Estudo sobre o domínio de aplicação de soluções analíticas para o problema de contato entre cilindros sob condições de fretting utilizando o ABAQUS**. 2012. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

ALFARAH, B.; LÓPEZ-ALMANSA, F.; Oller, S., 2017. **New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures**. Engineering Structures, Elsevier, v. 132, p. 70–86.

ÁLVARO, F. M. Azevedo. **Método dos elementos finitos**. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013. 248p.

ALVES, L. M., **Métodos dos Elementos Finitos**. Apostila organizada como resultado do estudo das aulas para obtenção de créditos da Disciplina de Método dos Elementos Finitos do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

AMADO BORDA, Ricardo Arturo. **Análise experimental de vigas parede de concreto reforçado com bambu** / Ricardo Arturo amado Borda; orientador: Khosrow Ghavami.- Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

AMADA, S.; ISHIKAWA, Y.; MUNEKATA, T.; NAGASE,Y. & SHIMIZU, H. **Fiber rexture and mechanical graded structure of bamboo**. Composites Part B,28B, 1997.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318R: **Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary**. Detroit, 2014, 520 p.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. Rio Grande. Editora Dunas, v.l. 3 ed. 2010.

ARGOLLO, André Munhoz de. **Taliscas de bambu em matrizes de concreto: características físico-mecânicas**. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR. 8522: **Concreto–Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASTM C469/C469M-14: **Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, 2019.

BATISTA, Raquel Dantas. **Simulação numérica de vigas T em concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósito de fibra de carbono (CFRP) utilizando o modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

BENETTI, Andressa Berno, et al. **O uso do Bambu na Construção Civil. Projeto apresentado à disciplina de Construção Civil II**, UFPR, Curitiba/PR, 2009. 19f

BERALDO, A. L., "APUAMA", História do Brasil. 2017. Disponível em: <http://apuama.org/historiabambu/>

BERALDO AL, Zoulalian A. Bambu: **material alternativo para construções rurais**. In: **Anais do V Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira** [CD-ROM]; 1995; Belo Horizonte. Belo Horizonte: EEUFGM; 1995

BERALDO, A. L.; FREIRE, W. J. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. São Paulo. Editora Unicamp, 2003.

BOAKYE, Emmanuel, et al. **Finite Element Modelling of Bamboo Reinforced Concrete Beams**. University of Science and Technology. Journal of Construction and Building Materials Engineering. Vol. 4. Kumasi, Ghana, 2018.

BOLETIM ABNT, n 161 v.15. Jan/Fev 2018

BRAGA et. Al. **CONSTRUÇÕES DE BAMBU: Análise estrutural de um edifício de bambu**. Centro Universitário Do Instituto Mauá De Tecnologia. SÃO CAETANO DO SUL, 2011.

CASTRO E SILVA, A.L.R. **Análise numérica não-linear da flambagem local de perfis de aço estrutural submetidos à compressão uniaxial**. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CEB. **Fip model code 1990 - Final draft.**, London, Comité Euro International du Béton, 1990.

CEB-FIP. **CEB-FIP Model Code 2010**. London, LDN, UK: Thomas Telford, 2010.

CERQUEIRA FILHO, Ilton José de. **Alberto Santos Dumont: a história da invenção do avião**. Arquivo do Estado de São Paulo, São Paulo, ano 38, n. 34, 24 ago. 2005. Disponível em: <http://www.historica.arquivoestado.sp.gov.br/materias/anteriores/edicao12/materia02/texto 02.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2019.

CHUST, R.; RODRIGUES, J. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. São Carlos: EdUFSCar, 2016.

CULZONI, R.A.M. **Características dos bambus e sua utilização como material alternativo no concreto**. Deptº de Engenharia Civil, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 1986. 134p. (Tese de mestrado).

DRUMOND e WIEDMAN. Patrícia Maria. Guilherme. **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia** -1. ed. - Rio de Janeiro : ICH, 2017.655 p.

EFFTING, Elisa da Fonseca. **Construção civil sustentável: em estudo sobre a utilização do bambu**. Universidade do sul de Santa Catarina- UNISUL. Palhoça, 2017.

FERREIRA, G. C. S. **Vigas de concreto armadas com bambu**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 2002.

FERREIRA GCS. **Vigas de concreto armadas com taliscas de bambu Dendrocalamus giganteus**. Tese de doutorado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2007. 195 p.

FILGUEIRAS, T. S.; GONÇALVES, A. P. **A checklist of the basal grasses and bamboos in Brazil**. *Bamboo Science and Culture; The journal of the American Bamboo Society*. 18(1):7-18, 2004.

FILHO, A.C.B et al. **Comportamento estrutural de vigas de concreto reforçadas com ripas de bambu cravejadas de pinos**. Campina Grande, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. V.14, p. 1115-1122, 2010.

FIRrone, Tiziana. **IL BAMBÙ: Tecnologia dei materiali per un'architettura sostenibile**, 2015. p.108.

FONSECA. Ana Paula da. **O uso do bambu na construção de habitações de interesse social**. Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2012).

GATOÓ A, SHARMA B, BOCK M, MULLIGAN H, RAMAGE M. **Sustainable structures: bamboo standards and building codes**. *Proc ICE Eng Sustainability* 2014;167(5):189–96

GHAVAMI, K.; Souza, M.V. de. **Propriedades mecânicas do bambu**. Rio de Janeiro: Relatório Interno apresentado ao PIBIC, PUC-Rio. Ago., 2000.

GHAVAMI, K. **Cement composites reinforced with bamboo and vegetable fibres**. In: **International Conference on Concrete and Development**, 1, 2001, Tehran. *Proceedings...* Tehran: Building and Housing Research Centre, 2001, p.445-461, v.2.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. **Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua Angustifolia**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.1, p.107-114, 2005.

GHAVAMI, K. **Bambu: um material alternativo na engenharia**. Revista do Instituto de Engenharia, São Paulo, 1992.

GRECO, Silva. **Il bambù italiano: prove meccaniche e connessioni assiali per prospettive sostenibili**. alma mater studiorum - Università di Bologna, 2017.

GUIMARÃES Júnior, M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R. **Caracterização anatômica da fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos**. Revista Iberoamericana de Polímeros, v. 11(7), p. 442-456, 2010. Disponível em: <<http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/DIC10/guimaraes.pdf>>. Acesso em: 20 agosto. 2020.

JANSSEN, J. J. A. **Designing and building with bamboo**. In: INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN (INBAR). Technical report. n. 20. Beijing, China. 2000.

JANSSEN, J.J.A. **Building with Bamboo**. London, UK. Intermediate Technology Publications, 65p. 1995.

JANSSEN, J. J. A. **Bamboo in Building Structures Thesis**, Technische Hogeschool Eindhoven, 1981.

JANKOWIAK, T; LODYGOWSKI, T. **Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model**. Foundations of civil and environmental (6): 53-69. Poznan University of Technology, Institute of Structural Engineering (ISE), 2005.

JUNIOR., Lima H.C.; DALCANAL, P.R.; WILLRICH, F.L.; BARBOSA, N.P. **Características mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus*: análise teórica e experimental**. In: Barbosa, N.P.; Swamy, R.N. and Lynsdale, C. (eds.). Sustainable construction into the next millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials. João Pessoa, 2000.

JUNIOR., Lima H.C.; MESQUITA Ligia P. FABRO, Gilmar.; WILLRICH, F.L.; CZARNIESKI, Cleber J. **Vigas de concreto reforçadas com bambu *Dendrocalamus giganteus*. I: Análise experimental**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.4, p.642-651, 2005. Campina Grande, PB, DEAg/UFCG - <http://www.agriambi.com.br>

KMIECIK, P., KAMINSKI M. **Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation Taken into Consideration**. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011.

LAMBERT, Xian-Xing. SATO, Catherine Wang. **Framework for Dynamic Analysis of Radioactive Material Transport Packages under Accident Drop Conditions**. Pickering, Ontario, Canada, 2019.

Formal publication: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110480>

LEE, J.; FENVES, G. L.,. **Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures**. Journal of engineering mechanics. American Society of Civil Engineers, v. 124, n. 8, 1998.

LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms**. INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN (INBAR). 1998. China. Technical Report 20. China, 1998.

LUBLINER, J.; OLIVER, J.; Oller, S.; ONATE, E. **A plastic-damage model for concrete**. *International Journal of solids and structures*, Elsevier, v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.

LÓPEZ, O. H. **Manual de construcción con bambú. Estudios Técnicos Colombianos Ed.** Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Centro de Investigación de Bambu y Madera – CIBAM, 1974.

LÓPEZ, O. H. **Bamboo, the gifts of the gods. Colombia**, Bogota: D'vinni Ltda, 2003.

MARÇAL, V. H. S. (2018). **Análise comparativa de Normas Técnicas Internacionais para o emprego do bambu – colmo em estruturas prediais**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 178p.

MARQUES. Eduardo A. F. ARAÚJO Tereza D. P. **Modelagem numérica do comportamento de pilares de concreto armado reforçados com PRFC usando o modelo constitutivo Concrete Damaged Plasticity**. Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering Suzana Moreira Ávila (Editor), ABMEC, Brasília, DF, Brazil, November 6-9, 2016

MASANI, N. J., Dhamani, B. C. and Bachan Singh, **Studies on Bamboo Concrete Composite Construction**, 1977.

MELO NETO, Antonio A. de; HELENE, Paulo R. L. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos**. São Paulo: IBRACON, 2002.

MENDES, T. M. P. **Análise não-linear física e geométrica de sistemas aporticados com elementos de rigidez variável em concreto armado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na área de concentração em Construção Metálica, Escola de Minas, PROPEC, 2017.

MOREIRA, Domingos Sávio Lima. **Análise Numérica de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com PRFC**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2019.

NUNES, Ricardo. **Construindo com a Natureza – Bambu: Uma Alternativa de Ecodesenvolvimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Sergipe, 2005.

NAJAFGHOLIPOUR, M.A. *et al.* **Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam-Column Connections with Governing Joint Shear Failure Mode**. Faculty of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Article in *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2017.

PADOVAN, Roberval Bráz. **O bambu na arquitetura: desing de conexões estruturais**. 2010. 181 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/89702>>.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal 6, 2007.

RADASKIEVICZ, Tiago. **Influência do tipo de ligação no desempenho estrutural de treliças de bambu Mosô**. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Curitiba, 2016.

RIBEIRO, G.S., **Análise do comportamento termoelástico de um freio a tambor, utilizando o método dos elementos finitos**. 2015. 156p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SILVA, Aline F. **Contribuição ao estudo da não-linearidade física em vigas de concreto armado**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.

Schlangen, E., Van Mier, J. G. M., (1992). **Simple Lattice Model for Numerical Simulation of Fracture of Concrete Materials and Structures**. *Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 534-542.

SPOLIDORO, P. V. **Características dendrométricas e propriedades físicas dos colmos de Bambusa vulgaris e Bambusa tuldooides**. 55 f. (Dissertação) Seropédica – Rio de Janeiro, Dezembro 2008. p. 8 e 12.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de Análise Estrutural**. V. 1. 8a Edição Editora Globo. Porto Alegre, 1984.

TROINA, L. M. B. **Comportamento não linear de estruturas de concreto armado com aplicação a análise de vasos de pressão de usinas nucleares**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1981.