

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

**Simulação pelo método dos elementos finitos
de peças em concreto têxtil**

Marcelo Ferreira de Souza Bezerra Araújo

Porto Alegre
2019

MARCELO FERREIRA DE SOUZA BEZERRA ARAÚJO

**SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS
DE PEÇAS EM CONCRETO TÊXTIL**

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

Porto Alegre
2019

CIP - Catalogação na Publicação

Araújo, Marcelo Ferreira de Souza Bezerra
Simulação pelo método dos elementos finitos de
peças em concreto t ê xtil / Marcelo Ferreira de Souza
Bezerra Araújo. -- 2019.
220 f.
Orientador: Américo Campos Filho.

Coorientadora: Paula Manica Lazzari.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2019.

1. Concreto t ê xtil. 2. Modelagem numérica. 3.
Tension stiffening. I. Campos Filho, Américo, orient.
II. Lazzari, Paula Manica, coorient. III. Título.

MARCELO FERREIRA DE SOUZA BEZERRA ARAÚJO

**SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS
DE PEÇAS EM CONCRETO TÊXTIL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração (Estruturas), e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 31 de maio de 2019

Prof. Américo Campos Filho
Dr. pela Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
orientador

Profª. Paula Manica Lazzari
Drª. pela Universidade Federal do
Rio Grande do Sul
co-orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)
Dr. pela Pennsylvania State University

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Dr. pela Leeds University

Prof. Mauro Vasconcellos Real (FURG)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profª. Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)
Drª. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Marcus Vinícius e Maria do Carmo, e aos meus irmãos, Thiago e Raphael.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marcus Vinicius Almeida de Araújo e Maria do Carmo Ferreira de Souza Bezerra Araújo, pela determinação, luta e apoio na minha formação e dos meus irmãos, fazendo amparar os ensinamentos disseminados pelos meus avós.

Agradeço aos meus irmãos, Thiago Ferreira de Souza Bezerra Araújo e Raphael Ferreira de Souza Bezerra Araújo que, por mais difíceis que fossem as circunstâncias e a distância, sempre se fizeram presente de alguma maneira.

Agradeço aos meus colegas de curso e com certeza futuros excelentes profissionais, que sempre me ajudaram quando precisava. Em especial, gostaria de destacar os amigos Camila Westphalen, Daniel Farias, Luísa Rossini, Mariana Varela e Matheus Benica, os quais foram, sem sombra de dúvidas, os melhores presentes que recebi ao longo destes dois anos.

Não poderia deixar de agradecer, também, aos meus amigos que, através do companheirismo, carinho, autenticidade e amizade, prestaram apoio e motivação para que fosse possível a realização desta caminhada.

Agradeço a todos professores que desempenharam com maestria e dedicação as aulas ministradas ao longo do curso de pós-graduação da UFRGS. Faço agradecimento especial ao meu orientador, Américo Campos Filho, e minha co-orientadora, Paula Manica Lazzari, que sempre se mostraram disponíveis e instigados a ajudar ao longo de toda a dissertação, além de transmitirem seus conhecimentos com perfeição.

Agradeço a Felipe Pinto da Motta Quevedo e a Rebeca Jéssica Schmitz que disponibilizaram a programação da *usermat*, além de terem me auxiliado para correta utilização do código.

Agradeço a todos os funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que permitiram um melhor ambiente de aprendizado ao longo do curso de pós-graduação.

Agradeço a CAPES e ao CNPq pela bolsa de estudos que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.

Albert Einstein

RESUMO

ARAÚJO, M. F. S. B. **Simulação pelo método dos elementos finitos de peças em concreto têxtil.** 2019. 220f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

A utilização do concreto armado na Engenharia Civil, iniciada por volta do meio do século XIX, se mantém, até os dias atuais, em constante evolução. Com um consumo anual médio de concreto estimado em 11 bilhões de toneladas (2009), juntamente à crescente preocupação ambiental, torna-se vital a busca por soluções estruturais que minimizem a agressão ao ambiente. Assim, diante da necessidade de estruturas com melhor sustentabilidade, desempenho, durabilidade e menor necessidade de manutenção, o Concreto Têxtil (TRC) surge como alternativa ao concreto armado. O TRC é formado pela união do concreto fino, em geral de alta resistência à compressão, com um reticulado têxtil de elevada resistência à tração feito à base de fibras de basalto, carbono ou vidro. A compreensão do comportamento deste novo compósito exige métodos de análise mais refinados. Dentre os métodos existentes, este trabalho deu enfoque a utilização do método dos elementos finitos (MEF), o qual possibilita desenvolver análises não lineares de estruturas em concreto têxtil. Para tanto, foi utilizado o programa comercial ANSYS versão 17.2, no qual se customizou a subrotina USERMAT para implementação dos modelos constitutivos do concreto. As não linearidades físicas e geométricas são incluídas ao modelo, de maneira que as respostas obtidas podem ser avaliadas desde os primeiros estágios de carga até a ruptura. Por meio do MEF, foi realizada a modificação e calibração do *Tension Stiffening* para peças em concreto têxtil. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise numérica de peças solicitadas à tração uniaxial e flexão simples, de maneira a se obter um melhor entendimento do comportamento estrutural deste novo compósito. Para tanto, foi utilizado como base os experimentos realizados por Kulas (2013). Ao total, foram simulados quatorze ensaios de tração uniaxial, dezesseis de flexão simples em lajes e seis de flexão simples em vigas I. Os modelos numéricos apresentaram comportamento condizente ao identificado por meio dos ensaios experimentais.

Palavras-chave: *concreto têxtil; modelagem numérica; tension stiffening.*

ABSTRACT

ARAÚJO, M. F. S. B. **Simulação pelo método dos elementos finitos de peças em concreto têxtil.** 2019. 220f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

The usage of reinforced concrete in Civil Engineering, which has begun during the 19th century, is still in steady development. With an average annual concrete consumption of 11 billion tons, in addition to a growing environmental concern, it is vital to search for structural solutions that minimize environmental aggression. Therefore, in view of the need for structures with better sustainability, performance, durability and less maintenance, Textile Concrete (TRC) has been found as a great alternative to reinforced concrete. The TRC is formed through the combination of fine concrete, usually of high compressive strength, with a textile reinforcement of high tensile strength made of Basalt, Carbon or Glass fibers. To understand the behavior of this new composite, it is required a refined analysis' method. Among the current methods, this work has focused on the finite element method (FEM), which allows the development of nonlinear analysis for textile concrete structures. Therefore, the commercial program ANSYS version 17.2 was used, wherein the USERMAT subroutine was adapted to implement the concrete's constitutive models. The physical and geometric nonlinearities are included in the model, by doing that, the structures' outcomes can be evaluated from the first stages of loading until rupture. Through the MEF, the *Tension Stiffening* was modified and calibrated according to the textile concrete. Thus, the objective of this work is to perform a numerical analysis of textile structures under uniaxial tensile and bending test, in order to obtain a better structural behavior understanding from this new composite. To do so, the experiments performed by Kulas (2013) was chosen to be numerically modelled. At last, it was simulated fourteen uniaxial tensile tests, sixteen slabs under bending test and six I – beams under bending tests. The numerical models had shown behavior similar to the ones identified through experimental tests.

Key-words: textile concrete; numerical modelling; tension stiffening.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Passarela executada combinando TRC, concreto protendido e barras não metálicas.....	24
Figura 1.2 – Representação do delineamento da pesquisa.....	30
Figura 2.1 – Opções de reforço para concreto: (a) concreto armado; (b) CFRP (c) TRC.....	32
Figura 2.2 – Tipos de reforços têxteis: (a) tecido; (b) tela; (c) malha.....	33
Figura 2.3 – Processo de obtenção das fibras de carbono.....	37
Figura 2.4 – Tipos de costura: (a) Pilar; (b) Tricô.....	39
Figura 2.5 – Transpasse do tipo “guia warp”	40
Figura 2.6 – Processo de impregnação da malha.....	43
Figura 2.7 – Fios impregnados com: (a) Epóxi; (b) SBR.....	43
Figura 2.8 – Níveis para análise malhas têxteis não impregnadas.....	44
Figura 2.9 – Comportamento à tração de malhas têxteis.....	45
Figura 2.10 – Modelo anelar da qualidade de aderência.....	48
Figura 2.11 – Deslizamento dos filamentos internos em relação aos externos.....	49
Figura 2.12 – Distribuição de tensões ao longo da seção do fio (a) sem e (b) com impregnação.....	50
Figura 2.13 – Comportamento padrão do ensaio de arrancamento.....	51
Figura 2.14 – Comportamento tensão-deslizamento idealizado por: (a) Banholzer; (b) Richter.....	52
Figura 2.15 – Ensaio de tração uniaxial.....	53
Figura 2.16 – Comportamento idealizado de TRC com malhas sem impregnação.....	53
Figura 2.17 – Comportamento à tração de elemento em TRC.....	54
Figura 2.18 – Deslizamento da malha em relação ao concreto.....	56
Figura 2.19 – Experimentos em: (a) Lajes; (b) Vigas seção I.....	57
Figura 2.20 – Efeito das pressões transversais na malha têxtil.....	58
Figura 2.21 – Distribuição de tensão e deformação na seção transversal.....	65

Figura 2.22 – Fluxograma para obtenção do momento fletor resistente e do estado de deformação.....	66
Figura 2.23 – Modelo de interface discreto utilizado por XU.....	69
Figura 2.24 – Modelo tensão-deslizamento de Xu	69
Figura 2.25 – Modelo utilizado por Kruger.....	70
Figura 3.1 – Possíveis modelos constitutivos atribuídos à malha.....	72
Figura 3.2 – Comportamento de malhas têxteis.....	73
Figura 3.3 – Superfície de ruptura tridimensional.....	76
Figura 3.4 - Meridianos de compressão, de tração e de cisalhamento da superfície de ruptura e planos desviadores.....	76
Figura 3.5 – Diagrama de tensão-deformação do concreto comprimido.....	80
Figura 3.6 – Curva tensão deformação para o concreto tracionado.....	86
Figura 3.7 – Modelo de Kelvin Generalizado.....	88
Figura 3.8 – Representação das deformações do concreto.....	89
Figura 4.1 – Elemento SOLID186.....	98
Figura 4.2 – Pontos de integração do elemento SOLID186.....	99
Figura 4.3 – Efeito <i>hourglassing</i>	99
Figura 4.4 – Características adotadas para o elemento SOLID186.....	100
Figura 4.5 – Elemento SHELL281: (a) configuração geométrica; (b) pontos de integração no plano.....	101
Figura 4.6 – Características adotadas para o elemento SHELL281.....	102
Figura 4.7 – Entrada de dados para utilização da USERMAT3D para o concreto.....	104
Figura 4.8 – Entrada de dados do comportamento da malha têxtil.....	105
Figura 4.9 – Esquema de funcionamento do ANSYS.....	106
Figura 4.10 – Processo Newton Raphson: (a) para primeira iteração; (b) para vários subpassos.....	108
Figura 4.11 – Resumo da modelagem.....	109
Figura 5.1 – Comportamento do concreto sob compressão uniaxial.....	111
Figura 5.2 – exemplo para concreto esmagado.....	111

Figura 5.3 – Comportamento do concreto para diferentes <i>Tension Stiffening</i>	112
Figura 5.4 – Modelagem da malha têxtil T01.....	114
Figura 5.5 – Modelagem do ensaio de tração uniaxial.....	119
Figura 5.6 – Malhas de elementos finitos testadas.....	120
Figura 5.7 - Refinamento da malha de elementos finitos para V3-T01-K1	121
Figura 5.8 – fluxograma utilizado para determinação do número de <i>substeps</i> mínimo..	124
Figura 5.9 – Instantes para apresentação das distribuições da tensão e deformação.....	146
Figura 5.10 – Modelo da laje.....	153
Figura 5.11 – Malha de elementos finitos utilizada para modelagem da laje.....	154
Figura 5.12 – Instantes para apresentação das distribuições da tensão e deformação..	169
Figura 5.13 – Modelo da viga I.....	174
Figura 5.14 – Seção transversal viga I.....	175
Figura 5.15 – Refinamento da malha de elementos finitos viga I.....	177
Figura 5.16 – Instantes para apresentação das distribuições da tensão e deformação V5-T01-K1	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Sub-rotinas dentro da USERMAT.....	102
Tabela 5.1 – Malhas têxteis analisadas.....	113
Tabela 5.2 – Ensaio de tração uniaxial analisados.....	115
Tabela 5.3 – Ensaio de flexão em laje.....	116
Tabela 5.4 – Ensaio de flexão em vigas I.....	117
Tabela 5.5 – Refinamento das malhas de elementos finitos.....	120
Tabela 5.6 – Calibração do número de <i>substeps</i>	122
Tabela 5.7 – Calibração da umidade.....	124
Tabela 5.8 – Grupos de malhas utilizados para calibração do <i>Tension Stiffening</i>	127
Tabela 5.9 – <i>Tension Stiffening</i> calibrados de acordo com os grupos de malha.....	128
Tabela 5.10 – Resultados das análises de TRC sob tração uniaxial.....	142
Tabela 5.11 – Características das lajes em TRC.....	154
Tabela 5.12 – Resultados das análises de lajes em TRC sob flexão.....	165
Tabela 5.13 – Características particulares Vigas I.....	176
Tabela 5.14 – Momentos máximos obtidos para Vigas I.....	181

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Faixas de propriedades para diferentes tipos de fibras.....	35
Quadro 2.2 – Valor redutor para tipos de malhas.....	41
Quadro 2.3 – Propriedades de diferentes traços de concreto.....	47
Quadro 2.4 – Coeficiente “ k_2 ”	60
Quadro 3.1 - Valores de parâmetros para concreto de acordo com o f_{ck}	81
Quadro 5.1 – Comparação para calibração do número de <i>substeps</i> mínimo para V3-T01-K1 ...	123
Quadro 5.2 – Comparação para calibração da umidade através do V3-T01-K1	126
Quadro 5.3 – Comparação para calibração do <i>Tension Stiffening</i> do grupo 1 através do V3-T01-K1	129
Quadro 5.4 – Comparação para calibração da <i>Tension Stiffening</i> do grupo 2 através do V3-T15-S2	130
Quadro 5.5 – Comparação para calibração da <i>Tension Stiffening</i> do grupo 3 através do V3-T52-K2	131
Quadro 5.6 – Comparação para calibração da <i>Tension Stiffening</i> do grupo 4 através do V3-T82-S3	132
Quadro 5.7 – Resultados dos experimentos V3-T01-K1 e V3-T01-K2	134
Quadro 5.8 – Resultados dos experimentos V3-T01-K3 e V3-T15-S2	135
Quadro 5.9 – Resultados dos experimentos V3-T15-S3 e V3-T52-K1	136
Quadro 5.10 – Resultados dos experimentos V3-T52-K2 e V3-T52-K3	137
Quadro 5.11 – Resultados dos experimentos V3-T52-S1 e V3-T61-K3	138
Quadro 5.12 – Resultados dos experimentos V3-T61-K4 e V3-T61-S3	139
Quadro 5.13 – Resultados dos experimentos V3-T82-K3 e V3-T82-S3	140
Quadro 5.14 – Resultados dos experimentos V3-T01 e V3-T15	143
Quadro 5.15 – Resultados dos experimentos V3-T52 e V3-T61	144
Quadro 5.16 – Resultados dos experimentos V3-T82	145
Quadro 5.17 – Evolução da distribuição de deformação no concreto para o caso V3-T01-K1 ...	147
Quadro 5.18 – Evolução da distribuição de tensão no concreto para o caso V3-T01-K1	148

Quadro 5.19 – Evolução da distribuição de deformação na malha para o caso V3-T01-K1	150
Quadro 5.20 – Evolução da distribuição de tensão na malha para o caso V3-T01-K1	151
Quadro 5.21 – Resultados dos experimentos V4-T01-K1 e V4-T01-K2	156
Quadro 5.22 – Resultados dos experimentos V4-T01-K3 e V4-T01-K4	157
Quadro 5.23 – Resultados dos experimentos V4-T02-K2 e V4-T02-K2a	158
Quadro 5.24 – Resultados dos experimentos V4-T52-K1 e V4-T81-K2	159
Quadro 5.25 – Resultados dos experimentos V4-T81-K3 e V4-T81-S1	160
Quadro 5.26 – Resultados dos experimentos V4-T81-S2 e V4-T81-S3	161
Quadro 5.27 – Resultados dos experimentos V4-T82-K2 e V4-T82-K3	162
Quadro 5.28 – Resultados dos experimentos V4-T82-K4 e V4-T82-K8	163
Quadro 5.29 – Resultados dos experimentos V4-T01 e V4-T02	166
Quadro 5.30 – Resultados dos experimentos V4-T52 e V4-T81	167
Quadro 5.31 – Resultados dos experimentos V4-T82	168
Quadro 5.32 – Evolução da distribuição de deformação no concreto.....	170
Quadro 5.33 – Evolução da distribuição de tensão no concreto.....	171
Quadro 5.34 – Evolução da distribuição de deformação na malha.....	172
Quadro 5.35 – Evolução da distribuição de tensão na malha.....	173
Quadro 5.36 – Resultados dos experimentos V5-T01-K1 e V5-T02-K1	178
Quadro 5.37 – Resultados dos experimentos V5-T15-S1 e V5-T15-S2	179
Quadro 5.38 – Resultados dos experimentos V5-T52-S1 e V5-T61-S3	180
Quadro 5.39 – Resultados dos experimentos V5	182
Quadro 5.40 – Evolução da distribuição de deformação no concreto.....	184
Quadro 5.41 – Evolução da distribuição de tensão no concreto.....	185
Quadro 5.42 – Evolução da distribuição de deformação na malha.....	187
Quadro 5.43 – Evolução da distribuição de tensão na malha.....	188

LISTA DE SIGLAS

ANSYS	– <i>Analysis Systems Incorporated</i>
APDL	– <i>ANSYS Parametric Design Language</i>
CFRP	– Concreto Reforçado com Fibras Poliméricas
DFG	– <i>German Research Foundation</i>
DLL	– <i>Dynamic-link library</i>
<i>fib</i>	– <i>Fédération Internationale du Béton</i>
FIHP	– <i>Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado</i>
MEF	– Método dos Elementos Finitos
PPGEC	– Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
SBR	– Estireno-butadieno
TRC	– <i>Textile Reinforced Concrete</i>
UFRGS	– Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UPF	– <i>User Programmable Features</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

$A_{t,warp}$: área da seção transversal na direção <i>warp</i> ;
$A_{t,weft}$: área da seção transversal na direção <i>weft</i> ;
A_t	: área de seção transversal do reforço têxtil;
E_{ci}	: módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias;
E_{cm}	: módulo de elasticidade médio do concreto;
E_{cl}	: módulo secante correspondente à máxima tensão de compressão;
E_{fil}	: módulo de elasticidade do filamento;
F_{ctu}	: capacidade à tração do reforço têxtil;
F_t	: força máxima a tração;
$H_{t,c}$: distância entre os pontos de captação da deformação do concreto e malha têxtil.
I_1	: primeiro invariante do tensor de tensões;
J_2 e J_3	: segundo invariante do tensor desviador de tensões;
J_2 e J_3	: terceiro invariante do tensor desviador de tensões;
M_u	: momento máximo resistente;

S_3	: deslizamento no momento que há apenas tensão de aderência por atrito;
T	: temperatura em °C;
T_0	: Temperatura de 1°C;
T_i	: temperatura, em °C;
$V_{Rm,c}$: componente referente à contribuição do concreto à resistência;
$V_{Rm,f}$: componente referente à contribuição da malha têxtil destinada à absorção do cortante;
V_{Rm}	: capacidade total resistente ao cisalhamento;
S_{xx} , S_{yy} , e S_{zz}	: tensões desviadoras;
$E(t')$: módulo de elasticidade da mola isolada para idade do concreto t' sem ajuste da temperatura;
$E(t)$: módulo de elasticidade da mola isolada para idade do concreto t' com ajuste da temperatura;
$J(t, t')$: função de fluência considerando o envelhecimento;
RH_0	: umidade considerada como 100%.
RH	: umidade do ambiente (%).

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a	: distância da carga concentrada até o apoio;
$a_{t,w}$: área transversal da malha têxtil de cisalhamento;
$a_{tw,0^\circ}$: área transversal da armadura ao cisalhamento longitudinal;
$a_{tw,90^\circ}$: área transversal da armadura ao cisalhamento vertical;
a_{tw}	: área transversal da armadura ao cisalhamento;
$b_{s,eff}$: largura efetiva da alma;
b_w	: largura da alma;
d	: altura útil;
dt	: diâmetro dos fios;
f_{c2m}	: resistência à compressão biaxial do concreto (MPa);
f_{cm}	: resistência média à compressão do concreto;
f_{cm0}	: 1 MPa;
f_{cm28}	: resistência média à compressão uniaxial do concreto aos 28 dias, em MPa;

f_{ctm}	: resistência média à tração do concreto (MPa);
f_{fil}	: resistência à tração do filamento;
$f_{t,u}$: resistência a tração da malha têxtil de cisalhamento;
$f_{t,warp}$: resistência a tração da malha têxtil nas direções <i>warp</i> ;
$f_{t,weft}$: resistência a tração da malha têxtil nas direções <i>weft</i> ;
f_{yk}	: 500 N/mm ² ;
h	: espessura fictícia da peça de concreto (mm);
h_0	: 100 mm;
$h_{f,i}$: altura da mesa.
k	: número plástico;
k	: fator de escala com “ <i>d</i> ” em milímetros;
$k_{0,\alpha}$: coeficiente de orientação do reforço;
k_1	: coeficiente de eficiência;
k_2	: coeficiente para carregamento biaxial;
k_f	: coeficiente redutor para TRC com malha sem impregnação;
$k_{fl,p}$: fator de carregamento à flexão;
k_v	: fator decorrente da contração transversal do fio têxtil;
n	: número de diâmetros de reforço têxtil;
s	: fator dependente do tipo de cimento;
t	: idade atual do concreto;
$t'_{1,T}$: 1 dia;
t_1	: 1 dia;
t'_T	: idade do concreto quando foi aplicada a carga ajustada devido ao efeito temperatura;
t'	: idade do concreto no momento da aplicação da carga;
t'_{aj}	: idade do concreto no momento da aplicação da carga ajustada devido ao efeito da temperatura e tipo de cimento;
t_s	: idade do concreto no início da retração quando se finaliza o período de cura úmida do concreto;
z	: braço de alavanca interno;

LETRAS GREGAS

α	: fator relacionado com o tipo de cimento;
α	: ângulo entre a direção da força de tração e o alinhamento dos fios;
α_c	: fator de redução estabelecido como 0,297;
β_{sc}	: fator dependente do tipo de cimento;
$\beta_s(t, t_s)$: coeficiente de retração devido ao tempo que o concreto está sofrendo retração;
β_r	: ângulo de fissuração decorrente do esforço cortante;
$\beta_{cc}(t)$: fator de correção dependente da idade do concreto;
β_T	: coeficiente que considera o efeito de temperaturas diferentes de 20°C em β_h .
β_{SRH}	: fator relacionado com a umidade do ambiente, considerado para cálculo de β_{RH} ;
β_{RH}	: fator relacionado com a umidade do ambiente;
$\beta_E(t)$: fator de correção dependente da idade do concreto;
ε_s	: fator ligado à resistência média à compressão do concreto;
ε_{ctu}	: parâmetro que indica a deformação limite a partir da qual a colaboração do concreto entre fissuras não deve mais ser considerada;
ε_{cs0}	: coeficiente de retração básica;
$\varepsilon_{cs}(t, t')$: deformação do concreto por retração;
ε_c	: deformação de compressão;
ε_{c1}	: deformação do concreto no momento que se atinge a tensão de f_{cm}
ε_{cu}	: deformação última de compressão;
ε_{cl}	: deformação na máxima tensão de compressão;
σ_c	: tensão no concreto;
σ_{ref}	: tensão interpolada correspondente à deformação ε_{ref} ;
σ_x	: tensão longitudinal.
σ_{com}, τ_{com}	: ponto de tensão de compressão triaxial sobre o meridiano de compressão.
η	: relação entre deformações atual e máxima;
τ_{mf}	: tensão máxima de aderência.
τ_m	: tensão de aderência pelo mecanismo de adesão;
τ_f	: tensão de aderência pelo mecanismo de atrito;
ρ_l	: taxa de reforço longitudinal em %.
η_1	: fator de correção para concreto leve.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	25
1.1.1	Estudos destacáveis sobre o Concreto Têxtil	25
1.1.2	Estudos destacáveis sobre a utilização do ANSYS na UFRGS	27
1.2	MOTIVAÇÕES	27
1.3	OBJETIVOS	28
1.3.1	Objetivo principal	28
1.3.2	Objetivos secundário	28
1.4	LIMITAÇÕES	28
1.5	DELINEAMENTO DA PESQUISA	29
2	CONCRETO TÊXTIL	31
2.1	DEFINIÇÃO	31
2.2	MALHA TÊXTIL	34
2.2.1	Tipos de fibras	34
2.2.1.1	Fibra de Aramida	35
2.2.1.2	Fibra de Basalto	35
2.2.1.3	Fibra de Carbono	36
2.2.1.4	Fibra de Vidro Álcali-Resistente (AR-glass)	37
2.2.2	Técnicas para formação dos fios e malhas	38
2.2.3	Impregnação	41
2.2.4	Comportamento	43
2.3	MATRIZ	45
2.3.1	Composição da matriz	46
2.4	COMPORTAMENTO DO TRC	47
2.4.1	Interface	48
2.4.2	Comportamento em ensaio de tração uniaxial	52
2.4.3	Comportamento em ensaio de flexão	56

2.4.4	Comportamento em ensaio ao cisalhamento	58
2.5	MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DIMENSIONAMENTO.....	59
2.5.1	TRC com malha sem impregnação	59
2.5.1.1	Tração.....	59
2.5.1.2	Momento fletor.....	60
2.5.1.3	Cortante	61
2.5.2	TRC com malha impregnada	64
2.5.2.1	Tração.....	64
2.5.2.2	Momento fletor.....	65
2.5.2.3	Cortante	67
2.6	MODELAGENS NUMÉRICAS PELO MEF	68
3	MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS	72
3.1	MODELO CONSTITUTIVO PARA A MALHA TÊXTIL.....	72
3.2	MODELO CONSTITUTIVO PARA CONCRETO.....	73
3.2.1	Comportamento instantâneo	74
3.2.1.1	Modelo para concreto comprimido	74
3.2.1.2	Modelo para concreto tracionado.....	84
3.2.2	Comportamento Diferido	88
3.2.2.1	Modelo para fluência: <i>CEB-FIP Model Code 2010</i>	89
3.2.2.2	Modelo para retração: <i>CEB-FIP Model Code 1990</i>	94
4	MODELAGEM COMPUTACIONAL NO ANSYS	96
4.1	ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS.....	97
4.1.1	SOLID186.....	98
4.1.2	SHELL281	100
4.2	USERMAT E MODELOS UTILIZADOS.....	102
4.2.1	USERMAT.....	102
4.2.2	Modelos de dano	104
4.3	PROCEDIMENTO DE ANÁLISE NÃO LINEAR DO ANSYS	105
4.4	RESUMO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL	109
5	ANÁLISE DE NÚMÉRICA DE ELEMENTOS EM TRC.....	110

5.1	VALIDAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS.....	110
5.2	RESUMO DOS MODELOS ANALISADOS.....	115
5.3	ANÁLISE DE ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL.....	118
5.3.1	Estudo do refinamento de malha.....	119
5.3.2	Calibração do número de <i>Substeps</i>	121
5.3.3	Calibração retração e fluência.....	124
5.3.4	Calibração <i>Tension Stiffening</i>	127
5.3.5	Resultados	133
5.3.5.1	Curvas tensão <i>versus</i> deformação	133
5.3.5.2	Tensões e deformações no concreto V3-T01-K1	145
5.3.5.3	Tensões e deformações na malha V3-01-K1	149
5.4	ANÁLISE DE ENSAIOS DE FLEXÃO	152
5.4.1	Lajes	152
5.4.1.1	Resultados	155
5.4.1.2	Curvas momento <i>versus</i> curvatura	155
5.4.1.3	Tensões e deformações no concreto V4-T01-K1	168
5.4.1.4	Tensões e deformações na malha do exemplo V4-01-K1	171
5.4.2	Vigas I.....	174
5.4.2.1	Resultados	177
5.4.2.2	Curvas momento <i>versus</i> curvatura	177
5.4.2.3	Tensões e deformações no concreto do exemplo V5-T01-K1	182
5.4.2.4	Tensões e deformações na malha do exemplo V5-01-K1	186
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	189
6.1	CONCLUSÕES.....	189
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	190
	REFERÊNCIAS	191
	APÊNDICE A – SCRIPT TRAÇÃO UNIAXIAL	197
	APÊNDICE B – SCRIPT FLEXÃO LAJE	204
	APÊNDICE C – SCRIPT FLEXÃO VIGA I	211

1 INTRODUÇÃO

A utilização do concreto armado na Engenharia Civil iniciada por volta do meio do século XIX (ELLIS, 1996), se mantém, até os dias atuais, em constante evolução. Com um consumo anual médio de concreto estimado em 11 bilhões de toneladas, segundo a *Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado* (FIHP, 2009 apud PEDROSO, 2009), juntamente à crescente preocupação ambiental, torna-se vital a busca por soluções estruturais que minimizem os impactos ambientais. Assim, diante da necessidade de estruturas com melhor sustentabilidade, desempenho, durabilidade e menor necessidade de manutenção, surgiu, no final do século XX, na Alemanha, uma alternativa ao concreto armado, o Concreto Têxtil (*Textile Reinforced Concrete*, TRC).

Este novo compósito, amplamente estudado e caracterizado nos centros de pesquisa de Aachen e Dresden através do financiamento pela *German Research Foundation* (DFG), destaca-se pela ausência de elementos metálicos, o que propicia a criação de estruturas mais esbeltas, leves e resistentes à corrosão. Assim, além da redução do gasto referente a manutenção de elementos oxidados, estima-se que a utilização de TRC possa gerar economia na massa de concreto em até 80% (KULAS, 2015).

Originado a partir do Concreto Reforçado com Fibras Poliméricas (CFRP), o TRC é formado pela união do concreto fino, em geral de alta resistência à compressão, com um reticulado têxtil feito a base de fibras de basalto, carbono ou vidro. No compósito estudado, os elementos têxteis atuam como principal reforço na promoção da resistência à tração, diferentemente do CFRP, no qual as fibras têxteis são curtas e atuam como reforço secundário às barras de aço, de maneira que promovem, apenas, o controle à fissuração. A nomenclatura “concreto fino”, utilizada ao longo deste trabalho, foi traduzida a partir do trabalho de Brockmann (2007), o qual se refere a matriz cimentícia por *fined grained concrete*.

Há, ainda, a possibilidade de o material têxtil passar por um procedimento durante a sua fabricação chamado de impregnação, onde se promove a solidarização das fibras e o seu consequente enrijecimento. Embora haja aumento considerável da resistência à tração, o processo induz perda na flexibilidade do material, o que compromete a sua utilização em estruturas curvas.

De acordo com Kulas (2013), em decorrência da maior resistência à tração do composto têxtil em relação às barras de aço, aliada às qualidades do compósito já citadas, a utilização do TRC tornou-se atraente tanto do ponto de vista econômico, como estético e estrutural. Na Figura 1.1 é apresentada a passarela para pedestres, em Albstadt (Alemanha), feita através da combinação de TRC com malha impregnada de epóxi, cabos de protensão metálicos e barras não metálicas.

Figura 1.1 – Passarela executada combinando TRC, concreto protendido e barras não metálicas



(Fonte: KULAS, 2013)

Sendo um compósito recém descoberto, o TRC ainda apresenta algumas deficiências e incertezas no que se refere as suas propriedades, em específico do reticulado têxtil. O número restrito de pesquisas sobre o TRC, especialmente no Brasil, ainda é um empecilho para a sua utilização no país. Opostamente à produção do aço, inexistente um órgão ou norma reguladora sobre o processo de fabricação do reforço têxtil, o que provoca uma não uniformidade das características dos produtos finais de cada fabricante. Outro fator problemático na utilização do TRC é referente a aderência concreto-malha. Essa interface é considerada como uma região crítica nas peças em TRC, uma vez que pode haver escorregamento de parte das fibras mais internas em relação às externas.

Esse comportamento adicionado à fissuração, à diferença entre as resistências à tração e compressão do concreto e a outros fatores como a fluência e retração, resulta em uma resposta

extremamente não-linear à medida que se solicita o TRC. Em situações como esta, onde a consideração da não-linearidade torna-se necessária, o Método dos Elementos Finitos (MEF) surge como instrumento renomado e de eficiência comprovada na análise estrutural. Nesse âmbito, este presente trabalho realizará a simulação numérica pelo MEF de elementos estruturais em TRC empregando o *software* comercial ANSYS versão 17.2.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Neste tópico serão citados os principais estudos referentes ao concreto têxtil e a utilização do *software* ANSYS como ferramenta para análise numérica de problemas complexos.

1.1.1 Estudos destacáveis sobre o Concreto Têxtil

O estudo do uso de fibras para melhoramento do concreto iniciou-se por volta dos anos 1960s. Em específico, pode-se destacar a pesquisa realizada por Romualdi e Mandel (1964 apud TRÜB 2011) sobre o incremento na resistência à tração e redução da fissuração do concreto ao se adicionar fibras curtas em sua composição. Dando sequência às pesquisas referentes a essa área, Jesse e Curbach (1999), pioneiros no estudo do Concreto Têxtil, caracterizaram o comportamento de lajes e vigas vazadas de TRC, além de confirmar as vantagens da sua utilização.

Em 2004, Jesse realizou diversas investigações experimentais em corpos alongados de TRC, a fim de qualificar o maior número possível de variáveis que influenciam na resistência do elemento, além de quantificar os seus respectivos efeitos. Desse modo, Jesse confirmou que, apesar da utilização do concreto fino, a matriz cimentícia utilizada no TRC não preenche todos os vazios existentes entre as fibras da malha têxtil não impregnada, o que impede, assim, a perfeita solidarização.

Sendo a caracterização da interface do elemento têxtil com o concreto de extrema importância para o entendimento do comportamento do Concreto Têxtil, Shilang Xu et al., ainda em 2004, estabeleceram a relação tensão-deslizamento para as interfaces de diferentes tipos de reforços têxteis através de ensaios de arrancamento. Dentre os reforços testados, Xu et al. (2004) concluíram que, ao se utilizar de um processo de impregnação a base de epóxi durante a fabricação, as malhas apresentavam um melhoramento considerável na resistência de arrancamento em decorrência da solidarização entre as fibras.

Em 2005, Tanja Brockmann pesquisou sobre o comportamento do concreto fino utilizado em elementos de TRC. O estudo abrange desde a análise do comportamento do concreto fino submetido à compressão e tração uniaxial à possíveis efeitos de escala em decorrência da utilização de peças estruturais consideravelmente esbeltas.

Continuando os estudos realizados em 2005, Matthias Molter, na Faculdade de Engenharia de Aachen, deu continuidade ao estudo do TRC ao realizar e analisar experimentos em vigas em I e U em TRC submetidas a cargas de flexão e cisalhamento.

Já em 2008, Stefan Voss, por meio de investigações experimentais e teóricas, desenvolveu modelos de dimensionamento que registram eficientemente o comportamento do TRC sob tração, flexão e tensão de cisalhamento. Nos métodos propostos são utilizados parâmetros referentes às propriedades do material e situação de carregamento.

Já com um conhecimento maior do comportamento do TRC, Jens Uwe Hartig, em 2011, desenvolveu numericamente, na Faculdade de Engenharia da Universidade Técnica de Dresden, o comportamento do Concreto Têxtil submetido a tensão uniaxial por meio do Método dos Elementos Finitos.

Percebendo que o compósito (concreto + reforço têxtil) não usufruía da capacidade máxima do material têxtil, Christian Hubert Kulas, em 2013, realizou um estudo experimental e teórico completo sobre o comportamento de elementos em TRC com malhas têxteis impregnadas por epóxi e estireno-butadieno (SBR). Kulas (2013) caracterizou desde o comportamento dos fios submetidos à tração uniaxial às respostas de lajes e vigas I submetidas a carregamentos de flexão e cisalhamento. Adicionalmente, Kulas, baseado em Voss (2008), propôs um novo modelo de dimensionamento para casos de TRC com malhas impregnadas.

Dando continuidade a aplicação do Método de Elementos Finitos para o estudo do TRC, Natalie Williams Portal realizou, em 2015, análises numéricas de lajes em Concreto Têxtil, através do programa comercial DIANA, para confrontar com os resultados experimentais realizados no mesmo estudo.

Na UFRGS, destacam-se os estudos pioneiros, no Brasil, realizados por Denardi (2016) e Morassutti (2016). O primeiro autor realizou uma ampla revisão bibliográfica a respeito do concreto têxtil, abrangendo aspectos sobre aplicações, perspectivas de estudos e possíveis empregos no Brasil. O último autor, além de apresentar a revisão bibliográfica, executou um

estudo comparativo das metodologias de dimensionamento de passarelas em concreto têxtil e armado.

1.1.2 Estudos destacáveis sobre a utilização do ANSYS na UFRGS

A modelagem de elementos em concreto armado e protendido através do ANSYS tem sido estudada recentemente a fundo dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFRGS. Dentre os trabalhos acadêmicos frutos desta linha de pesquisa, pode-se destacar Kunzler (2013), que iniciou a linha de pesquisa com a utilização do ANSYS para análise paramétrica de vigas de concreto armado e protendido pré-tracionadas com abertura na alma; Fiore (2015), que implementou através do sistema de customização do ANSYS um modelo viscoelástico tridimensional para modelagem de túneis; Lazzari (2015), que realizou análise numérica de estruturas de concreto armado e protendido com ou sem aderência submetidos a cargas de curta e longa duração; Lazzari (2016), que implementou novos modelos constitutivos para o concreto e o aço, a fim de analisar numericamente as etapas construtivas de pontes estaiadas; Schmitz (2017), que utilizou os elementos SOLID186 e SHELL281 na simulação de uma ponte composta por estrutura mista aço-concreto; e Quevedo (2017), que implementou, ao ANSYS, os modelos constitutivos referentes ao comportamento diferido do concreto.

1.2 MOTIVAÇÕES

Diante da grande preocupação ambiental, o emprego do TRC tem sido explorado internacionalmente como alternativa sustentável ao concreto armado. Entretanto, por ainda se tratar de uma solução inovadora, a quantidade de estudos referentes ao TRC ainda é limitada. Nesse aspecto, destaca-se o número reduzido de pesquisas internacionais que simularam numericamente o comportamento de elementos estruturais em concreto têxtil, principalmente quando se utiliza malha impregnada. Em nível nacional, os estudos sobre esse material são ainda mais raros, o que se torna um empecilho para a sua utilização.

Neste contexto, o presente estudo pretende dar continuidade a linha de pesquisa desenvolvida no PPGEC/UFRGS, utilizando implementações no sistema de customização do *software* ANSYS para realização das simulações numéricas, como também expandir os estudos referentes à utilização do MEF na análise numérica de TRC com malha têxtil impregnada.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa, apresentados a seguir, são divididos como principal e secundários.

1.3.1 Objetivo principal

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo computacional para simulação numérica de peças em concreto têxtil aplicando o método dos elementos finitos.

1.3.2 Objetivos secundário

Dentre os objetivos secundários deste estudo, pode-se destacar os seguintes itens:

- a) desenvolvimento do conhecimento estrutural de peças em TRC;
- b) identificar vantagens, desvantagens e limitações do modelo criado;
- c) estudo aprofundado sobre as funcionalidades do programa em elementos finitos ANSYS, versão 17.2;
- d) aplicação dos modelos constitutivos dos materiais, concreto e malha têxtil;
- e) validação do modelo implementado através de comparações de soluções numéricas x dados experimentais por meio de resultados obtidos com a modelagem de estruturas em TRC.

1.4 DELIMITAÇÕES

Este estudo apresenta as limitações listadas a seguir:

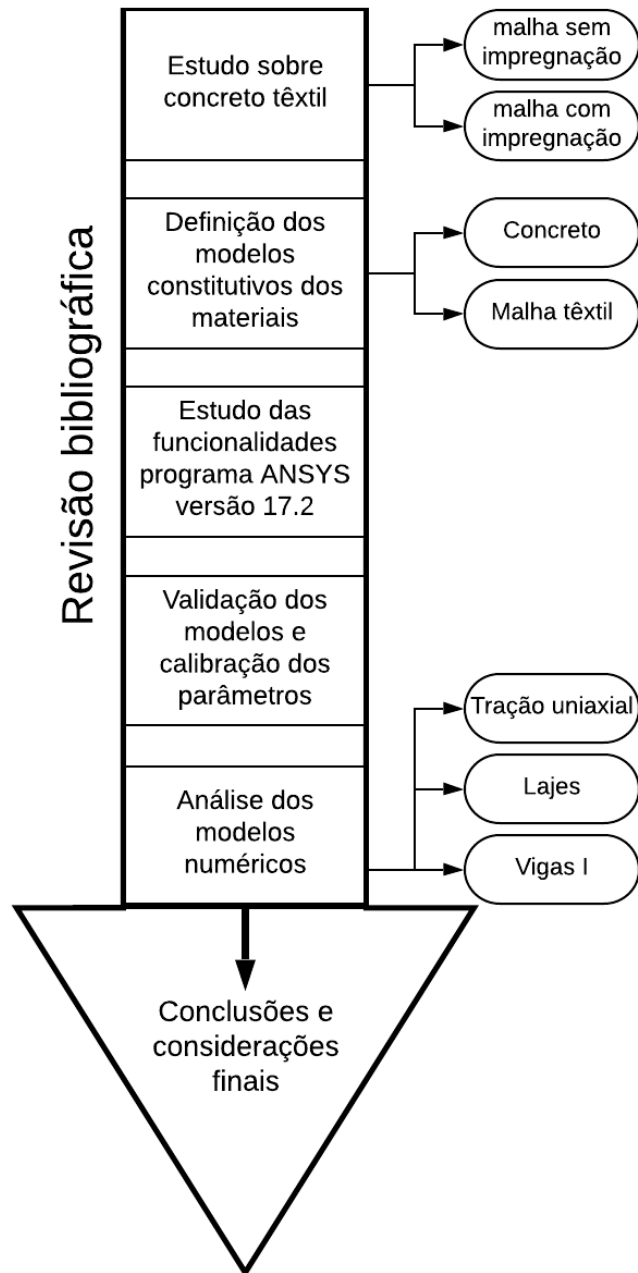
- a) serão estudadas apenas peças de TRC com malhas de fibras de vidro álcali-resistente (AR-Glass) e carbono;
- b) o estudo limita-se a análise de peças compostas por malhas impregnadas com resina epóxi ou butadieno-estireno;
- c) não serão abordados na análise numérica fatores como a fadiga e possível relaxação da malha têxtil;

- d) os fios têxteis, que formam a malha, são considerados como monolíticos e com comportamento linear;
- e) A análise numérica limita-se ao emprego do *software* ANSYS, versão 17.2.

1.5 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O estudo referente à análise numérica de peças em TRC foi realizado por meio das etapas indicadas na Figura 1.2. O presente trabalho foi dividido em 6 capítulos, sendo o **Capítulo 1** responsável por apresentar uma introdução a respeito do concreto têxtil, as motivações que impulsionaram a pesquisa, os objetivos principal e secundário do estudo, as delimitações impostas e, por fim, o delineamento do trabalho. Em seguida, no **Capítulo 2**, conforme ilustrado no fluxograma, apresenta-se a revisão bibliográfica acerca do novo material intitulado concreto têxtil. A princípio, foi dado enfoque nas propriedades mecânicas e aspectos estruturais e construtivos relatados cientificamente. Em seguida, pesquisou-se sobre as modelagens numéricas já realizadas deste compósito. O **Capítulo 3** apresenta os modelos constitutivos dos materiais, concreto e malha têxtil empregados. Os aspectos referentes a modelagem computacional através do programa ANSYS, versão 17.2, são abordados no **Capítulo 4**. Nesta seção são apresentados os elementos finitos utilizados, como também o processo de análise não-linear utilizado pelo ANSYS para solução do problema numérico. Posteriormente, no **Capítulo 5** são descritos os exemplos estudados, além de se apresentar a validação e calibração dos modelos constitutivos adotados. Por fim, nesta mesma seção, apresentam-se os resultados obtidos através das análises numéricas realizadas. Por último, o **Capítulo 6** apresenta as considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Figura 1.2 – Representação do delineamento da pesquisa



(Fonte: elaborada pelo autor)

2 CONCRETO TÊXTIL

Este tópico introduzirá as características gerais do TRC, destacando a definição do concreto têxtil, a caracterização da malha e matriz, o comportamento de elementos TRC, os métodos de dimensionamento e modelagens computacionais validadas através de experimentos em elementos estruturais.

2.1 DEFINIÇÃO

Os aspectos negativos do concreto armado provocados pela utilização do aço, como o alto custo de compra e transporte, armazenamento e a corrosão, originaram a procura por uma solução alternativa ao aço. Nesse contexto, em 1960, fibras curtas de basalto, carbono e vidro começaram a ser utilizadas como reforço secundário em peças de concreto armado por serem alcali-resistentes, aderentes a matriz cimentícia e apresentarem alta resistência à tração (BÄHR, 2016).

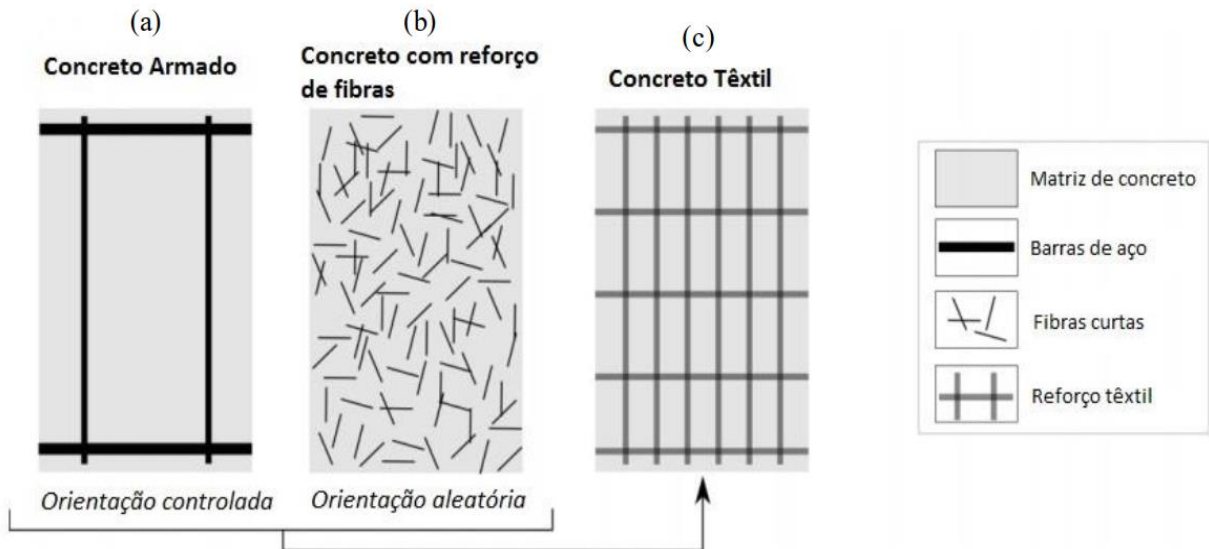
A criação do Concreto Reforçado com Fibras Poliméricas (CFRP) teve como foco o aumento da resistência do concreto, redução da fissuração e do peso próprio das peças estruturais (ZOLLO, 1997). Entretanto, em decorrência da utilização de fibras curtas com orientação aleatória na matriz de concreto, o CFRP apresentou apenas melhoria no que se refere ao controle da fissuração, não havendo, assim, acréscimo significativo na resistência última dos elementos estruturais (KULAS, 2013).

Com a continuação de pesquisas sobre a utilização de fibras têxteis em elementos de concreto, surge o TRC. Essa técnica promove orientação de fibras longas de alto desempenho dispostas segundo as tensões solicitantes e as agrupa nas regiões mais solicitadas à tração, como é apresentado na Figura 2.1. Essa peculiaridade permite um melhor aproveitamento das propriedades das fibras e, conseqüentemente, viabiliza a substituição das barras de aço por um reforço têxtil nas regiões tracionadas. (PORTAL, 2015).

Desta maneira, Naaman (2010) define concreto têxtil como um tipo de concreto reforçado constituído de uma matriz cimentícia de baixa granulometria que envolve um reforço têxtil, bidimensional ou tridimensional, feito por fibras de alto desempenho, as quais podem ser classificadas como sintéticas, metálicas ou orgânicas.

Brameshuber (2006, apud KULAS, 2013) estabelece que fibras utilizadas na confecção dos reforços têxteis devem possuir módulo de Young superior ao do concreto, boa aderência a matriz cimentícia, resistência a ambientes alcalinos e, também, alta tensão e deformação na ruptura.

Figura 2.1 – Opções de reforço para concreto: (a) concreto armado; (b) CFRP (c) TRC

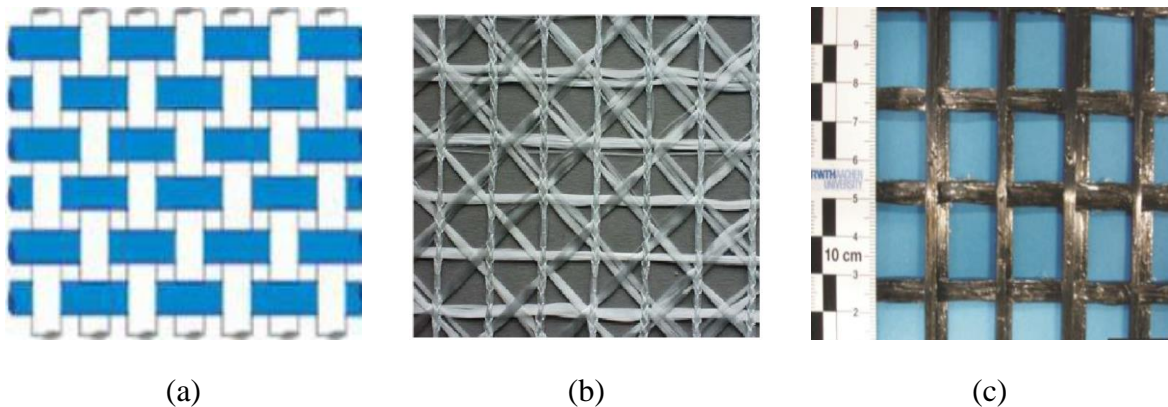


(Fonte: Adaptado de HEGGER et al., 2006)

Os reforços têxteis utilizados no TRC podem ser classificados em tecidos, telas e malhas a partir de sua geometria, conforme apresentado a seguir e ilustrado na Figura 2.2:

- tecidos: Elemento têxtil formado a partir do entrelaçamento de fios sem que haja considerável espaçamento entre eles;
- telas: Reforço têxtil manufaturado a partir da superposição de fios em diversas orientações, formando, assim, uma tela reticulada de fios;
- malhas: Esse tipo de reforço têxtil apresenta característica similar às telas, entretanto a superposição dos fios ocorre apenas de forma perpendicular. Dessa maneira, as malhas podem ser classificadas como telas quadriculadas com considerável espaçamento entre fios.

Figura 2.2 – Tipos de reforços têxteis: (a) tecido; (b) tela; (c) malha.



(Fonte: (a) PAAXA, 2016; (b) GRIES et al., 2006; (c) KULAS, 2013)

Hartig (2011) destaca a importância do reforço têxtil possuir fios suficientemente espaçados, a fim de garantir a boa permeabilidade e o completo envelopamento das fibras. Deste modo, este presente trabalho, seguindo a tendência das pesquisas de Molter (2005), Voss (2008), Hartig (2011), Kulas (2013), Portal (2015) e Bähr (2016), abordará apenas o conteúdo referente a elementos em concreto têxtil reforçados por malha têxtil. O enfoque dado pelas pesquisas citadas é decorrente do melhor comportamento estrutural junto ao concreto das malhas em relação às demais opções de peças têxteis.

Para melhor entendimento dos demais tópicos, lista-se a terminologia baseada de acordo com Gries et al. (2006):

- a) filamentos: fibras contínuas com determinada orientação;
- b) fios: filamentos ordenados agrupados por meio de torção, impregnação ou outro tipo de técnica;
- c) malha: conjunto de fios interligados formando uma tela quadriculada;
- d) *warp* (urdume): conjunto de fios da malha têxtil que possuem mesma direção e são ligados perpendicularmente ao *weft*. Em geral, o *warp* é orientado na direção de maior comprimento da peça, podendo, em alguns casos, ser utilizado na direção de menor comprimento;
- e) *weft* (trama): conjunto de fios da malha têxtil que possuem mesma direção e são ligados perpendicularmente ao *warp*. Em geral, o *weft* é orientado na

direção de menor comprimento da peça, podendo, em alguns casos, ser utilizado na direção de maior comprimento;

- f) *tex*: unidade para expressar a densidade linear (g/km) e pode ser obtido através do diâmetro do fio e de sua massa específica.

2.2 MALHA TÊXTIL

A malha têxtil, produzida a partir do processamento de fibras de alto desempenho, fornece ao TRC ductilidade e resistência às tensões de tração solicitantes (ALRSHOUDI, 2015). De maneira geral, as malhas têxteis podem se diferenciar quanto a sua geometria, tipo de fibra e técnica utilizada na formação dos fios e malhas. Esse conjunto de características influenciam, diretamente, suas propriedades.

2.2.1 Tipos de fibras

De acordo com Alrshoudi (2015), as fibras podem ser classificadas como artificiais ou naturais quanto a sua origem. Levando em conta as propriedades mecânicas e químicas das fibras existentes, como tensão de ruptura à tração, módulo de Young, aderência ao concreto, durabilidade e reatividade química, destacam-se como propícias para a confecção de malhas têxteis para construção civil, as fibras de aramida, basalto, carbono e vidro álcali-resistente (KULAS, 2013).

Apesar dos estudos iniciais terem tido enfoque no desenvolvimento de malhas com fibras de vidro álcali-resistentes (AR-glass), Portal (2015), afirma que, com o reconhecimento de melhores propriedades mecânicas e químicas das fibras de carbono, como a sua maior resistência a tração e inércia química, as recentes pesquisas têm priorizado o uso deste tipo de fibra como componente principal das malhas.

Kulas (2013) apresenta, de maneira geral, faixas para determinadas propriedades de fibras de aramida, basalto, carbono e vidro álcali-resistente, como pode ser visto no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Faixas de propriedades para diferentes tipos de fibras

Tipo de fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	$\sigma_{\text{Máx}}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{\text{Máx}}$ (‰)	E (N/mm^2)
Aramida	12	1,5	3400 a 3600	20 a 40	80000 a 186000
Basalto	5 a 25	2,6	990 a 4800	15 a 32	64000 a 89000
AR-Glass	9 a 24	2,7	1300 a 2000	20 a 43	21000 a 74000
Carbono	5 a 10	1,8	2000 a 6000	3,5 a 21	180000 a 650000

(Fonte: Adaptado de KULAS, 2013)

2.2.1.1 Fibra de Aramida

Apesar de Kulas, 2013, citar como características positivas a alta resistência à tração e o alto módulo de elasticidade das fibras de aramida, Ehrenstein (2006, apud KULAS, 2013), relata que a resistência à tração do material reduz consideravelmente quando posto em ambiente com pH acima de 8,0. Em concordância ao estabelecido por Ehrenstein (2006, apud KULAS, 2013), Büttner (2012) afirma que a utilização de fibras de aramida em concreto fino, cujo pH é superior a 12, ocasiona uma redução na faixa de 60% da resistência da fibra. Ademais, diferentemente das fibras de carbono, vidro e basalto, fibras de aramida tendem a absorver água, o que afeta negativamente na adesão fibra-matriz. Diante dos aspectos citados, Kulas (2013) afirma que as fibras de aramida não ganharam aceitação na atual indústria de concreto têxtil.

2.2.1.2 Fibra de Basalto

Fibras de basalto podem ser categorizadas como de origem mineral não-orgânica ou artificial. A primeira, por ter origem vulcânica, apresenta uma maior variabilidade em suas propriedades, algo que não é observado em fibras artificiais. Como resultado, as pesquisas sobre utilização de fibras têxteis na construção civil têm dado enfoque, apenas, às artificiais (PORTAL, 2015). O uso deste tipo de fibra na engenharia civil data de meados dos anos 1990 (KULAS, 2013). Em 2005, Sim et al. estudaram a durabilidade do respectivo material em ambientes alcalinos com soda cáustica e concluiu que, após 28 dias, houve perda de 80% na resistência das fibras. Kulas, 2013, atesta que essa característica decorre da redução da seção transversal das fibras em ambientes alcalinos. De maneira similar ao que ocorre com as fibras de aramida, fibras de basalto ainda não são bem aceitas no setor da construção civil.

2.2.1.3 Fibra de Carbono

As fibras de carbono, por apresentarem baixa densidade, alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade, são mundialmente utilizadas nas indústrias esportiva, espacial, de construção e embarcação (KULAS, 2013). Adicionalmente a isso, destaca-se a alta resistência a ataques químicos apresentada pelas fibras de carbono (BÄHR, 2016).

As fibras de carbono são elementos sintéticos que podem ser produzidos a partir do petróleo ou do polímero poliácrlonitrila (PAN) (PORTAL, 2015). Em ambos métodos de produção, buscam-se fibras que contenham um mínimo de 90% de carbono em sua composição (GRIES et al., 2006). Autores como Brameshuber (2006, apud KULAS, 2013), Kulas (2013) e Portal (2015) abordam, exclusivamente, em seus respectivos estudos, as fibras provenientes do PAN.

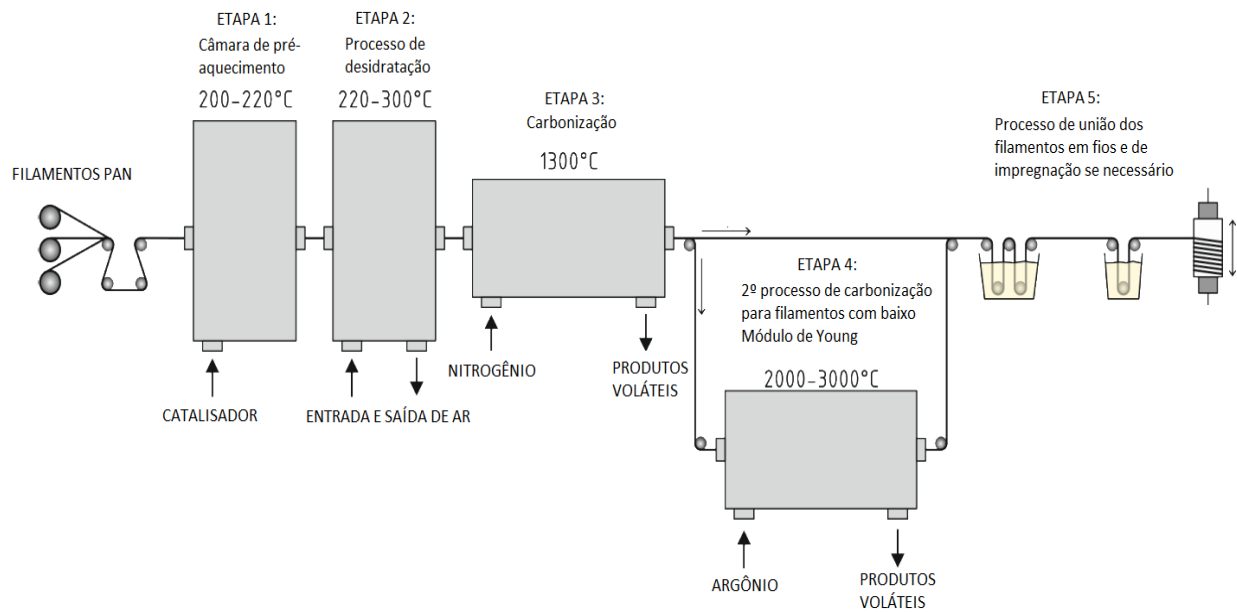
A produção deste tipo de fibra ocorre por meio de um processo termal de múltiplas etapas. A rigidez e resistência à tração obtidas no final do processo são diretamente dependentes da temperatura utilizada em cada etapa do tratamento (KULAS, 2013).

De acordo com Brameshuber (2006, apud KULAS, 2013), a produção de fibras de carbono com PAN envolve os passos listados abaixo e apresentados na Figura 2.3:

- a) as fibras poliméricas PAN são inicialmente umedecidas e esticadas em uma câmara exposta a temperaturas 200-220° C. Nesta câmara, há a introdução de determinado catalisador para agilizar as reações químicas;
- b) em seguida, as fibras resultantes do processo são expostas a temperatura entre 220-300° C, o que permite a remoção de átomos de hidrogênio por meio da oxidação;
- c) dando prosseguimento, realiza-se a carbonização do material a uma temperatura de 1300° C. Nesta etapa atinge-se a resistência à tração final das fibras de carbono e um módulo de elasticidade entre 250-300 kN/mm².
- d) havendo necessidade de um maior módulo de Young, as fibras passam por mais uma etapa termicamente controlada. Nesta técnica, utiliza-se uma câmara repleta de argônio com temperatura entre 2000-3000° C para elevar o modulo de Young das fibras a até 650 kN/mm²;

- e) com as propriedades finais já obtidas, as etapas seguintes são restritas a formação dos fios têxteis, podendo haver ou não um processo de impregnação.

Figura 2.3 – Processo de obtenção das fibras de carbono



(Fonte: Adaptado de KULAS, 2013)

2.2.1.4 Fibra de Vidro Álcali-Resistente (AR-glass)

A utilização de fibras de vidro como fonte de reforço em elementos estruturais não é algo novo. A sua utilização junto ao concreto, durante muito tempo, foi limitada por conta de sua baixa durabilidade. Em ambientes altamente alcalinos, como o concreto, os filamentos de vidro são decompostos ao longo do tempo (KULAS, 2013). Spauszus (1974, apud HARTIG, 2011), estabelece que essa pequena resistência decorre da reação de íons de hidróxidos (OH-) com íons de sílica, o que provoca a destruição da configuração tetraédrica típica de uma fibra de vidro.

Na tentativa de melhoramento desta propriedade, surge a fibra de vidro álcali-resistente (AR-Glass). O aperfeiçoamento da resistência química é obtido, de acordo com Büttner (2012), através da introdução de óxido de zircônio no processo de fabricação das fibras de vidro, criando, assim, uma proteção adicional aos ataques de álcalis. Este processo permite que a perda de resistência seja reduzida para apenas 40% após 50 anos de vida útil do elemento (BÜTTNER

e RAUPACH, 2013). Kulas (2013) afirma, ainda, que esta perda pode ser reduzida pela metade em caso de utilização de impregnação. Destaca-se, também, que a utilização de materiais impermeáveis na impregnação, como resina epóxi, resulta em uma melhor durabilidade quando comparado com materiais permeáveis, como o estireno-butadieno (SBR).

A produção dos filamentos de fibra AR-glass é detalhada a seguir, conforme Portal (2013):

- a) derretimento e mistura do vidro com óxido de zircônio a temperatura entre 1250-1350 °C;
- b) em seguida, a mistura derretida passa pela placa separadora de filamentos a 1200 °C. Nesta etapa ocorre a formação dos filamentos e a determinação de sua espessura;
- c) os filamentos passam, então, por uma etapa de resfriamento e jateamento de água;
- d) com as propriedades finais já obtidas, as etapas seguintes são restritas a formação dos fios têxteis, podendo haver ou não um processo de impregnação.

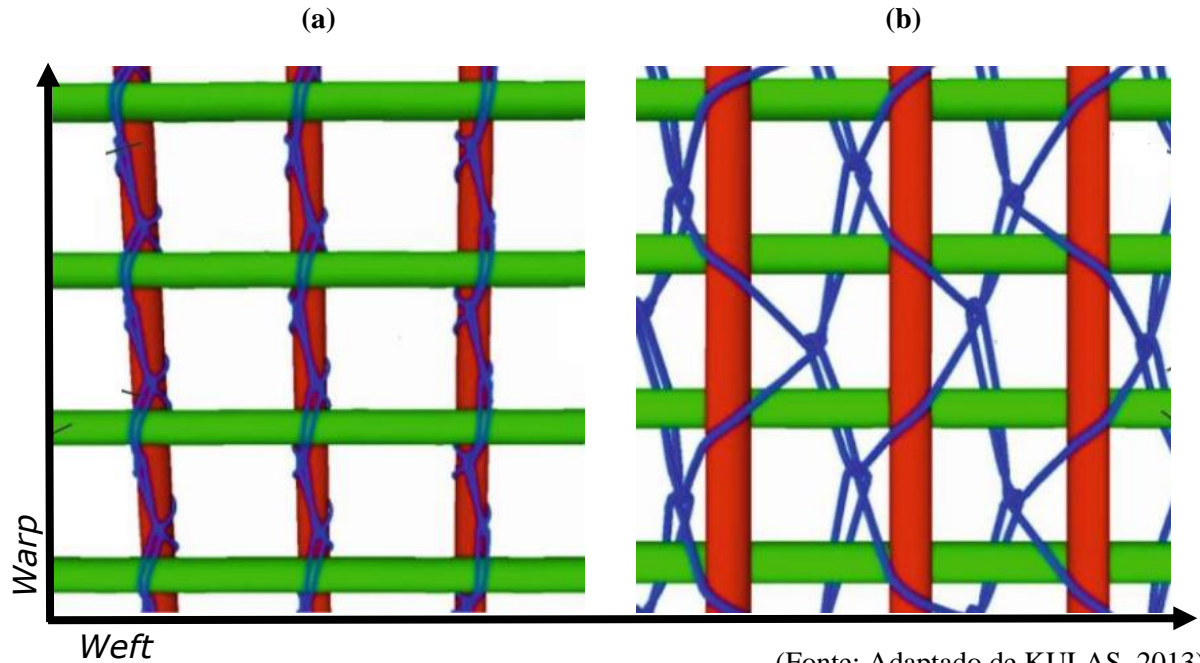
2.2.2 Técnicas para formação dos fios e malhas

As malhas têxteis são telas quadriculadas formadas a partir da interligação de fios têxteis. Esses, por sua vez, originam-se do agrupamento de filamentos de diâmetro reduzido. O processo para conexão dos filamentos e fios pode ser feito a partir do transpasse, entrelaçamento ou costura dos mesmos (KULAS, 2013).

Alrshoudi (2015) conclui, em seu trabalho, que as propriedades finais da malha têxtil estão intrinsicamente ligadas às características da concepção dos fios e em como estes são interligados. Ainda, o autor citado afirma que a geometria e técnica utilizada na concepção da malha têxtil afetam, além das propriedades exclusivas à malha, na aderência matriz-malha e, conseqüentemente, na performance do compósito de TRC.

Dessa maneira, Koch et al. (2015) listam em seu trabalho diversas técnicas de pontos de costura, dentre as quais pode-se destacar os tipos pilar e tricô. Para melhor entendimento, estes dois tipos de ponto de costura são ilustrados na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Tipos de costura: (a) Pilar; (b) Tricô

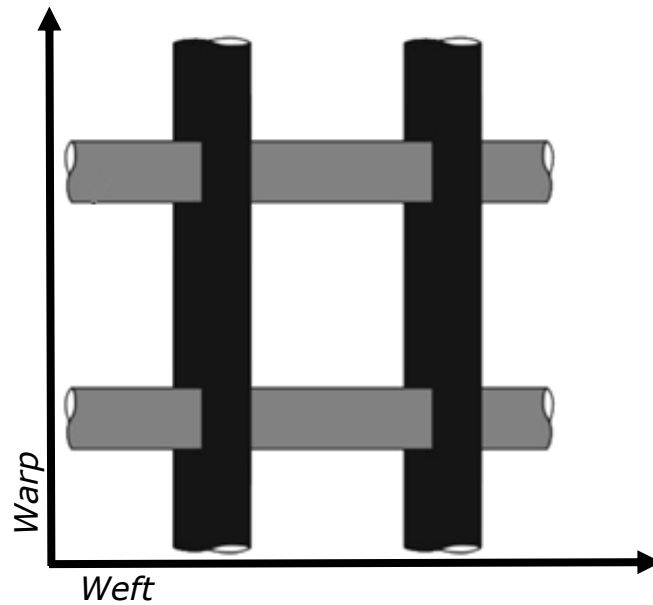


(Fonte: Adaptado de KULAS, 2013)

Como já explicitado, o tipo de ponto de costura selecionado para confecção da malha têxtil pode promover alterações positivas ou negativas nas propriedades do concreto têxtil. Dessa forma, Koch et al. (2015) afirma que malhas não impregnadas geradas a partir do tipo de costura pilar apresentam filamentos na direção *warp* mais unidos, o que dificulta a penetração do concreto no interior dos fios. Assim, Voss (2008) conclui que malhas têxteis não impregnadas concebidas através da técnica de tricô fornecem tensão de ruptura à tração maior que as apresentadas pelo tipo pilar.

Além dos procedimentos relatados por Koch et al. (2015), Kulas (2013) cita a técnica de transpasse tipo “*guia warp*” como alternativa à utilização dos métodos de costura. Esse procedimento consiste na passagem de fios *weft* por dentro dos fios *warp* nos pontos de intersecção, como ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Transpasse do tipo “guia warp”



(Fonte: adaptado de KULAS, 2013)

Técnicas de entrelaçamento com serpeio (movimento em zigue-zague) dos fios podem ser utilizadas na confecção das malhas. Entretanto, Hegger et al. (2006) afirma que esse tipo de procedimento apresenta desvantagens na aplicação em peças de concreto têxtil, uma vez que surgem esforços não paralelos à direção longitudinal dos filamentos. Dentre os aspectos negativos provenientes deste tipo de entrelaçamento, destacam-se a menor resistência e maior espaçamento entre fissuras. (AVESTON et al., 1971 apud ALRSHOUDI, 2015).

Como resultado de sua pesquisa, Kulas (2013) comprova que a técnica de entrelaçamento tipo “*guia warp*” tratada com impregnação resulta em resistências superiores às apresentadas por malhas impregnadas concebidas através de pontos de costura do tipo pilar e tricô. Outro aspecto vantajoso observado para este tipo de malha sem ponto de costura, refere-se a semelhança entre os resultados obtidos, para as direções *warp* e *weft*, de resistência e módulo de elasticidade.

Kulas (2013) afirma que a utilização de pontos de costura é especialmente importante na estabilidade da geometria das malhas têxteis não impregnadas, uma vez que este método assegura, além do correto posicionamento das fibras e fios até o possível processo de impregnação, o aumento da resistência ao deslizamento.

2.2.3 Impregnação

O processo de impregnação desenvolvido para aperfeiçoamento das malhas têxteis tem como objetivo promover a melhoria na solidarização entre os filamentos internos e externos, bem como homogeneizar a seção transversal do fio têxtil.

Diante disso, Kulas (2013) declara que os reforços têxteis não impregnados, quando comparados aos impregnados, exibem um pior comportamento de adesão ao concreto, o que é explicado pela penetração parcial das partículas do concreto fino no interior dos fios. Dessa maneira, enquanto os filamentos mais externos possuem contato direto com a matriz cimentícia e são ativados com a solicitação da peça de TRC, os filamentos internos, não envolvidos por concreto, permanecem inativos (BRUCKERMANN, 2007).

Voss (2008) apresenta, conforme o Quadro 2.2, fatores de redução de resistência decorrentes da não ativação de todos filamentos da malha. Segundo a autora em questão, esses fatores devem ser multiplicados pela resistência dos filamentos para, assim, se obter a resistência da malha têxtil. Pettersson e Thorsson (2014) afirmam que os fatores de eficiência apresentados por Voss podem ser melhorados a partir da aplicação de um processo impregnativo.

Quadro 2.2 – Valor redutor para tipos de malhas

Tipo de fibras	Tex	Tipo de costura	Comp. da costura (mm)	K1
AR-Glass	1200 tex	Tricô	2,1	0,32
			4,2	0,33
			6,3	0,36
		Pilar	2,1	0,22
			4,2	0,29
			6,3	0,27
	2400 tex	Tricô	2,1	0,27
			4,2	0,26
			6,3	0,23
		Pilar	2,1	0,24
			4,2	0,23
Carbono	1600 tex	Tricô	6,4	0,19
		Pilar	2,1	0,22

(Fonte: Adaptado de VOSS 2008).

Diante dos aspectos citados, Kulas (2013) explicita que a utilização de malhas têxteis não impregnadas se tornou economicamente inviável. Portanto, a técnica de impregnação, ao

promover melhoria na coesão malha-matriz e entre os próprios filamentos, surge como opção para aperfeiçoamento das propriedades dos reforços têxteis.

Diferentemente do concreto fino, a substância impregnativa, por possuir partículas com menores dimensões, consegue penetrar no interior dos fios e promover, assim, a solidarização entre os filamentos externos e internos (RAUPACH et al., 2006). Como consequência, Xu et al. (2004) relata que o melhoramento por impregnação promove a criação de um fio mais homogêneo e, possivelmente, rígido.

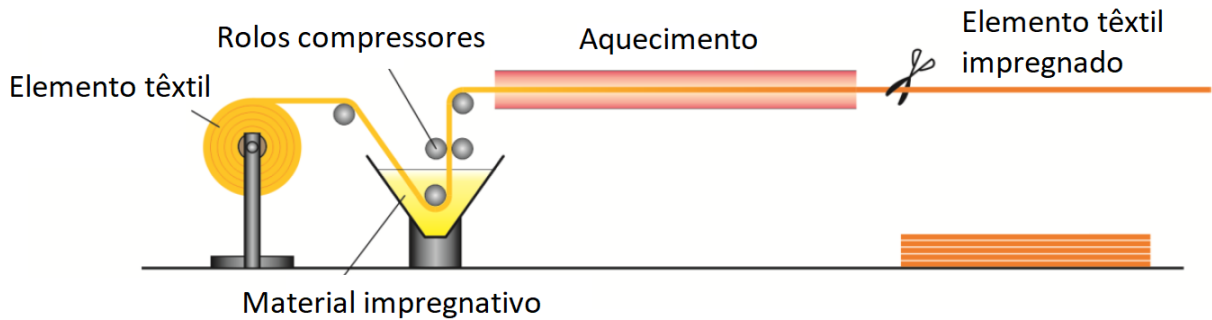
De acordo com Kulas (2013), o material impregnativo deve possuir as características listadas a seguir:

- a) baixa viscosidade antes da cura para penetração no centro do fio;
- b) alto módulo de elasticidade após cura;
- c) baixo coeficiente de difusão quando utilizado em AR-glass (BÜTTNER, 2012);
- d) temperatura de uso por volta de 80 °C;
- e) alta resistência ao fogo.

Schleser (2008) investigou materiais impregnantes feitos a partir de epóxi, resinas ativas (resina de poliéster e ester-vinílicas) e dispersão em acrilato. Dentre os citados, o autor afirma que a indústria de malha têxtil utiliza, quase em sua totalidade, apenas resinas de epóxi e estireno-butadieno (SBR).

Ainda em sua pesquisa, Schleser detalha que o processo de impregnação individualizado dos fios e da malha têxtil como um todo são idênticos. Inicialmente, é feita a passagem da malha ou do fio por meio de um reservatório repleto de líquido polimérico. Em seguida, ocorre a retirada do excesso de material líquido por meio da pressão exercida por rolos. A finalização do processo ocorre com a cura da malha a 160°C de temperatura, conforme a Figura 2.6.

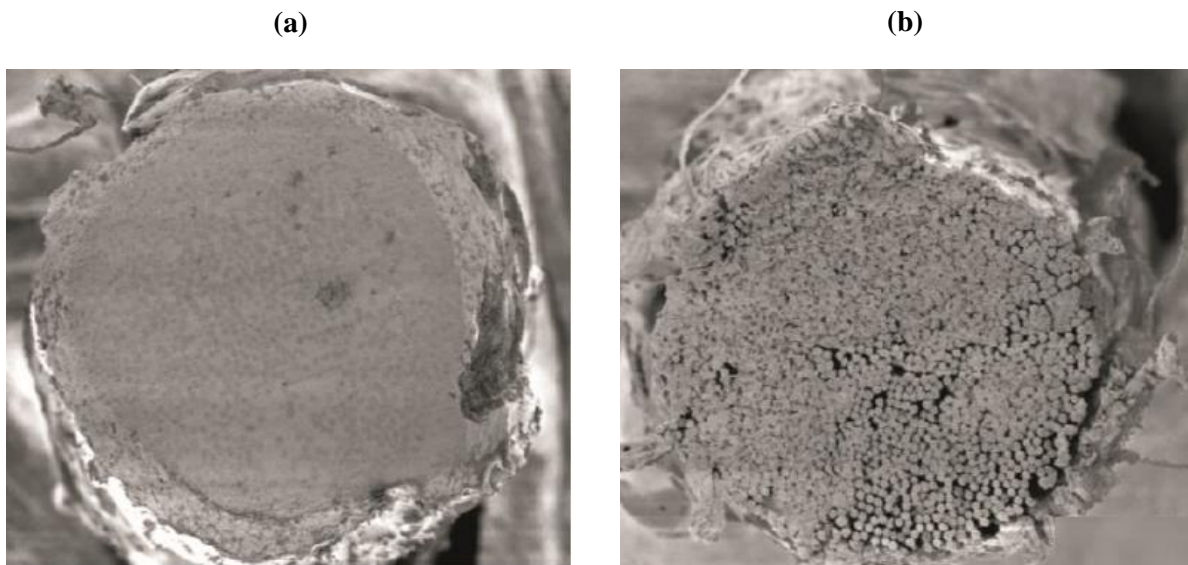
Figura 2.6 – Processo de impregnação da malha



(Fonte: Adaptado de KULAS, 2013)

Através do processo de impregnação detalhado, obtêm-se resultados próximos a completa adesão dos filamentos internos e externos. Análises por meio de microscópio eletrônico de varredura mostram que fios com impregnação por meio de butadieno-estireno apresentam pequenos vazios sem contato com o material, enquanto que fios com resina epóxi apresentam completa saturação, como visto na Figura 2.7 (SCHLESER, 2008).

Figura 2.7 – Fios impregnados com: (a) Epóxi; (b) SBR



(Fonte: SCHLESER, 2008)

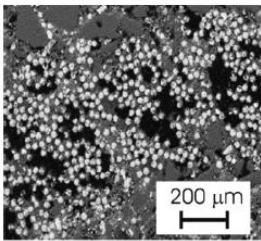
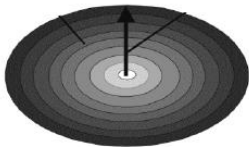
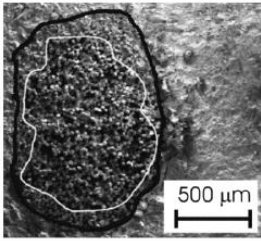
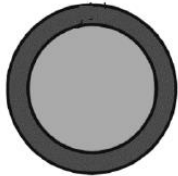

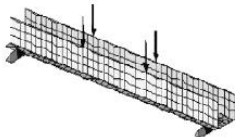
2.2.4 Comportamento

Em decorrência da particularidade das características dos fios têxteis e de sua heterogeneidade, o comportamento estrutural da malha têxtil se diferencia consideravelmente do apresentado por

barras de aço. Modelos numéricos para dimensionamento utilizados em análises de concreto armado com barras de aço não são facilmente adaptadas para concreto têxtil. Como a complexidade dos fios têxteis deve ser levada em conta durante a análise, Bruckermann (2007) sugere o estudo das malhas têxteis não-impregnadas em três níveis: micro, meso e macro.

A nível de análise da microestrutura, as interações filamento-filamento, filamento-resina e filamento-concreto devem ser consideradas, de maneira que a modelagem é realizada com diversos níveis de aderência. Para mesoestrutura, os filamentos não são mais considerados e a análise é feita a partir da caracterização dos fios. A esse nível, a utilização e discretização de cada filamento impossibilita a análise computacional pelo aumento considerável de esforço computacional. Dessa maneira, Bruckermann (2007) discretiza e caracteriza o fio em duas camadas: externa e interna. Já a macronível, a análise é feita a partir da discretização da malha com diversos fios, homogêneos, distribuídos ao longo da peça em concreto. A Figura 2.8 ilustra os diferentes níveis de análise.

Figura 2.8 – Níveis para análise malhas têxteis não impregnadas

Nível	Estrutura	Modelo idealizado
Microestrutura		
Mesoestrutura		
Macroestrutura		

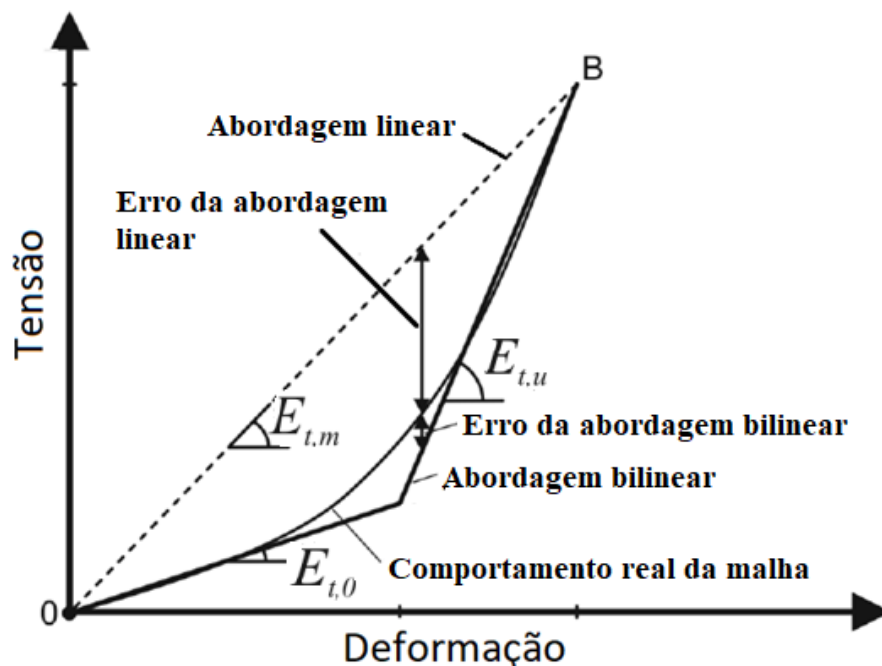
(Fonte: adaptado de BRUCKERMANN, 2007)

Para malhas têxteis não impregnadas, Brameshuber (2006, apud KULAS, 2013) indica que há diferença considerável entre a tensão de ruptura obtida em testes de tração uniaxial de filamentos e das malhas. O autor em questão justifica este tipo de comportamento a partir da

possível perda de resistência durante o processamento do fio e da malha e da distribuição não uniforme de tensão ao longo da seção do fio. Para malhas impregnadas, Kulas (2013) afirmou que a diferença entre a tensão de ruptura da malha e filamento reduz consideravelmente, podendo, de acordo com o tipo de fibra e material impregnativo, ser até inexistente. Desta maneira, os dados utilizados para análise numérica deste trabalho baseiam-se nos resultados obtidos a partir dos experimentos de tração uniaxial das malhas.

O comportamento das fibras, fios e malhas têxteis podem ser considerados como linear-frágil, de maneira que se atinge a tensão máxima sem que haja plasticidade do material (YIN, XU e WANG, 2015). Kulas (2013), ao experimentar diversos tipos de malhas têxteis, conclui que, dependendo do modo de técnica utilizada na confecção da malha, o comportamento pode ser considerado linear ou bilinear, conforme apresentado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Comportamento à tração de malhas têxteis



(Fonte: adaptado de KULAS, 2013)

2.3 MATRIZ

A matriz cimentícia utilizada no TRC difere da tipicamente utilizada em concreto armado por meio de sua granulometria. Enquanto o concreto comum possui agregado graúdo e miúdo com diâmetro máximo de grãos de até 32 mm, a matriz utilizada na confecção do TRC é produzida, apenas, com agregado miúdo de diâmetro máximo de até 8 mm (KULAS, 2013). Essa

peculiaridade da matriz do TRC é justificada, tanto pela necessidade da total penetração do concreto nos vazios existentes dentro dos fios têxteis não impregnados, como pelo fato dos elementos estruturais em concreto têxtil serem excessivamente esbeltos. Em adição a isso, deve-se buscar um concreto auto adensável e que apresente propriedades mecânicas de alta performance (NGUYEN, 2014).

As peculiaridades deste tipo de matriz foram observadas por Brockmann (2006) através de análises referentes ao comportamento à compressão e tração uniaxial, onde se observou, também, aspectos relacionados a um possível efeito de escala existente entre os corpos de prova e as peças estruturais em TRC. Como resultado, Brockmann indica que o comportamento à compressão, baseado na resistência característica à compressão (f_{ck}), pode ser representado como exposto pelo *CEB-FIP Model Code 2010*, desde que os parâmetros de entrada como o módulo de elasticidade médio (E_{cm}), deformação observada na máxima tensão de compressão (ε_{c1}) e a deformação de compressão última (ε_{cu}) sejam obtidos experimentalmente, uma vez que os valores indicados pelo *CEB-FIP Model Code 2010*, a partir do f_{ck} , não condizem com os obtidos por Brockmann (2006). Ainda, Brockmann sugere que, para se evitar efeito de escala, os experimentos realizados para determinação do comportamento do concreto sob tração e compressão sejam realizados em corpos de prova prismáticos com dimensões 40mm x 40mm x 160mm.

2.3.1 Composição da matriz

Para que as características requeridas à matriz do TRC sejam atendidas, é de extrema importância a adequada definição da composição a ser utilizada no concreto fino de alto desempenho. Apesar de ser necessária a manutenção do padrão quanto a composição do concreto, principalmente no que se refere a granulometria do agregado, pode-se ajustar parte de sua composição para melhoramento de determinada característica do concreto, a exemplo da redução do cimento para melhoria na retração. Brockmann (2006) afirma que o alto consumo de aglomerante (cimento) e agregado fino na confecção do concreto para TRC pode ocasionar, além de uma menor ductilidade, uma redução no módulo de Young, quando comparado com um concreto convencional de mesma resistência. A utilização de plastificante e cinza volante, além de permitir uma redução na quantidade do cimento, pode ser necessária para aprimoramento da fluidez e durabilidade (BROCKMANN, 2006).

Autores como Brockmann (2006), Kulas (2013) e Portal (2015) determinaram, dentro de seus respectivos estudos sobre TRC, traços de concreto fino a serem utilizados como matriz de elementos em concreto têxtil.

Brockmann (2006) desenvolveu, após examinar as propriedades básicas de diversos concretos finos, uma matriz cimentícia utilizando diâmetro máximo de agregado de 0,6 mm e obteve resistência à compressão média (f_{cm}) de 87 MPa por meio do ensaio de compressão cilíndrico conforme o DIN EN 12390-1. Dando sequência aos estudos relativos à matriz, Kulas (2013) testou novas composições que resultaram nas propriedades apresentadas conforme o Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Propriedades de diferentes traços de concreto

Propriedades	Unidades	Traço de concreto			
		C1	C2	C3	C4
Resistência à compressão - ensaio cilíndrico ($f_{cm,cyl}$)	MPa	87	57	71	87
Resistência à compressão - ensaio cubo ($f_{cm,cube}$)	MPa	100	70	87	90
Módulo de Young (E_{cm})	MPa	45420	30065	33600	31200
Deformação à compressão (ϵ_{c1})	%	2,4	3,1	3,3	4,6
Resistência à tração (f_{ctm})	MPa	5,9	-	-	4

(Fonte: Adaptado de KULAS, 2013)

No que se refere as características da fluência e fadiga do concreto de fina granulometria, Voss (2008) afirma que o concreto fino apresenta comportamento similar ao do concreto convencional.

2.4 COMPORTAMENTO DO TRC

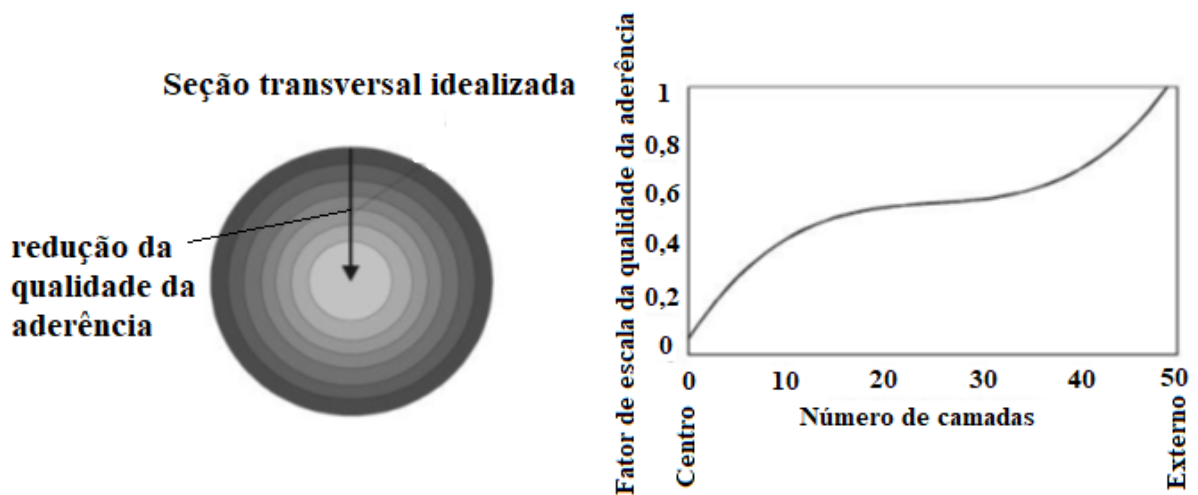
Neste tópico serão abordados os comportamentos obtidos para o TRC quando solicitado à tração e flexão, como também se caracterizará o comportamento relativo à interface malha-concreto.

2.4.1 Interface

A interface malha-concreto é de absoluta importância na transmissão das forças introduzidas no concreto para o material de reforço. A aderência do elemento têxtil à matriz cimentícia se diferencia, essencialmente, da apresentada entre as barras de aço-concreto por dois aspectos. O primeiro refere-se ao tipo de aderência predominante entre o reforço e a matriz. Enquanto os reforços têxteis apresentam superfícies lisas e, por isso, são vinculados somente pela adesão e atrito, elementos de barra possuem superfícies onduladas, o que promove a adição da aderência mecânica. O segundo aspecto é referente a não homogeneidade da seção transversal dos fios, em especial nas malhas não impregnadas (KULAS, 2013).

Como já mencionado para malhas não impregnadas, a análise da adesão fio-concreto pode ser feita a partir da divisão do fio em dois grupos de filamentos, externos e internos. Baseando-se neste conceito, Hegger, Bruckermann e Chudoba (2004) desenvolveram o modelo anelar apresentado na Figura 2.10 para análise da aderência fio-concreto ao longo da seção transversal do fio.

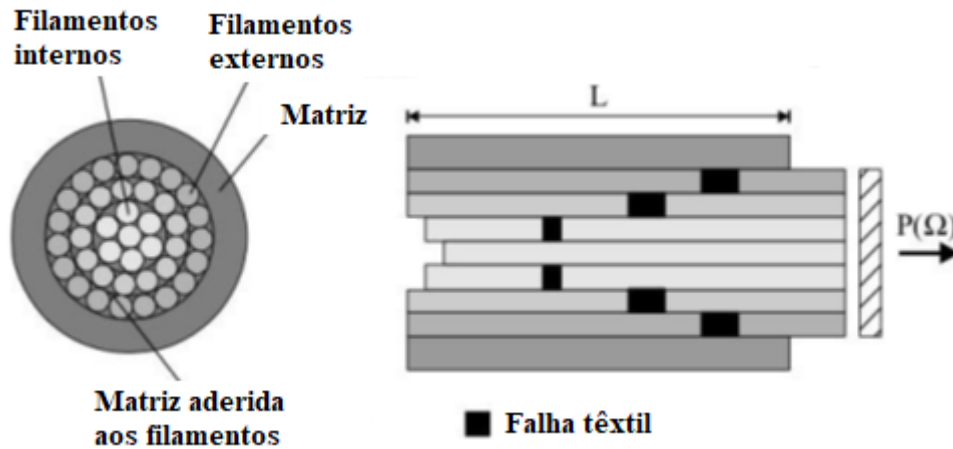
Figura 2.10 – Modelo anelar da qualidade de aderência



(Fonte: Adaptado ALRSHOUDI, 2015)

Para esse tipo de elemento têxtil, a dificuldade de representação numérica e analítica da sua interface com o concreto decorre-se do rompimento não simultâneo dos filamentos internos e externos, como apresentado na Figura 2.11. Pode-se afirmar, assim, que a resistência ao deslizamento, em fios não impregnados, é gerada, quase integralmente, pelos filamentos externos (ZHU e BARTOS, 1997 apud ALRSHOUDI, 2015).

Figura 2.11 – Deslizamento dos filamentos internos em relação aos externos



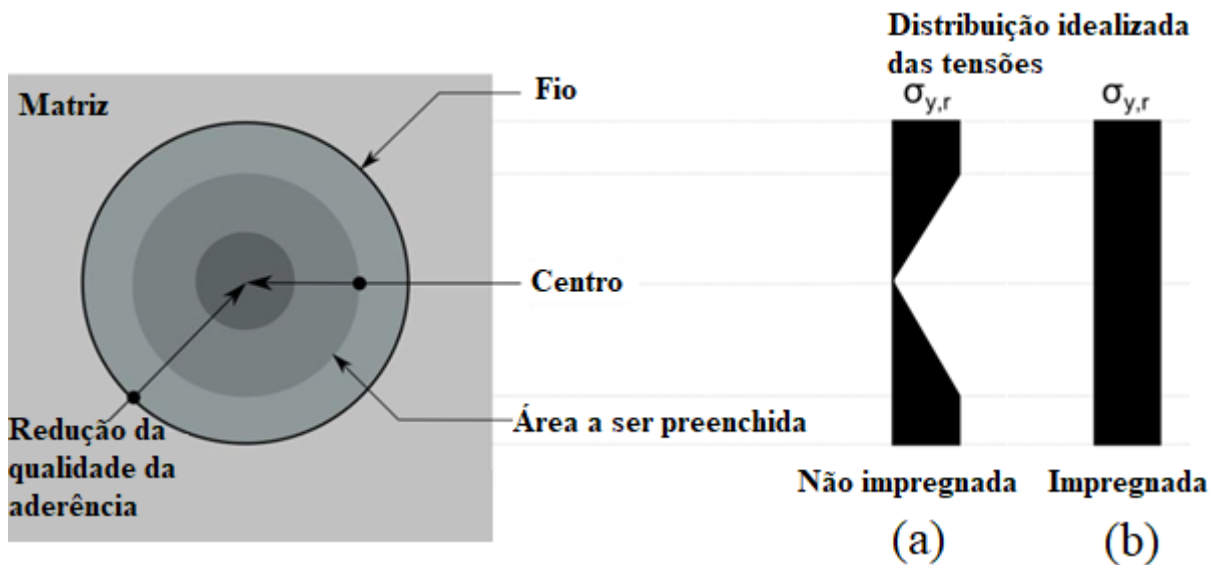
(Fonte: Adaptado ALRSHOUDI, 2015)

Alrshoudi (2015) cita que o deslizamento relativo entre as fibras externas e internas ocasiona a distribuição não uniforme das tensões. Williams Portal, Lundgren e Malaga (2014) consideram esse fenômeno como fator de direta influência no comportamento mecânico do TRC.

Peled, Bentur e Yankelevsky (1998) concluíram que, ao se particionar a área da seção transversal de uma malha em um maior número de fios, espera-se haver um ganho na adesão malha-matriz. Em adição a isso, Bruckermann (2007) estabelece que o aumento da seção transversal de fios não impregnados gera uma redução da sua aderência com o concreto.

Com a finalidade de impedir o deslizamento relativo entre as fibras internas e externas, alguns tipos de procedimento para melhoramento das malhas têxteis foram estudados ao longo dos últimos anos, dentre os quais, pode-se destacar o processo de impregnação. O aprimoramento por impregnação da aderência malha-concreto pôde ser observado através de experimentos realizados por pesquisadores como Xu (2004), Büttner et al. (2008), Scheffler et al. (2008) e Hartig et al. (2008). Este último estabelece o comportamento apresentado na Figura 2.12 para distribuição de tensões em fios com e sem impregnação.

Figura 2.12 – Distribuição de tensões ao longo da seção do fio (a) sem e (b) com impregnação

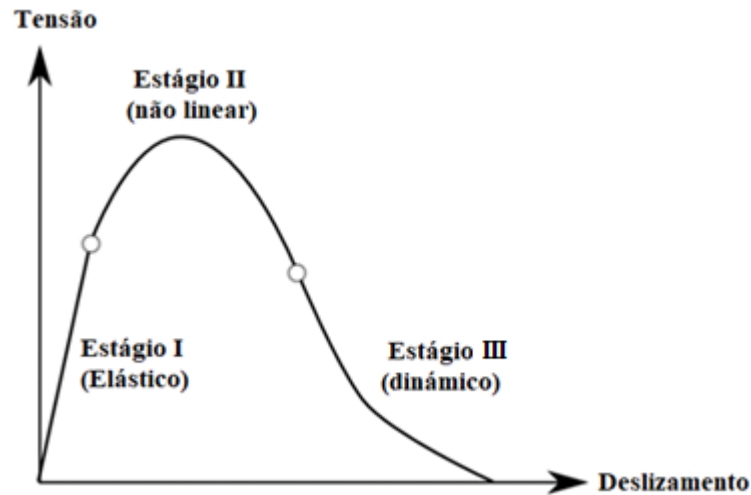


(Fonte: Adaptado de PORTAL, 2015)

A utilização de material impregnante gera fios mais homogêneos, o que implica na formação da interface de aderência mais uniforme entre o elemento têxtil e o concreto. De maneira idealizada, o objetivo da impregnação permite completa ativação dos filamentos do fio, o que representaria, além do aumento da força de arrancamento, uma distribuição de tensões uniforme (PORTAL, 2015).

Os mecanismos de transferência de tensão entre a matriz cimentícia e o reforço têxtil são identificados e caracterizados a partir do ensaio de arrancamento. Richter et al. (2002, apud PORTAL, 2015) e Mobasher (2012) identificaram o padrão de resposta para esse tipo de ensaio conforme a Figura 2.13

Figura 2.13 – Comportamento padrão do ensaio de arrancamento



(Fonte: PORTAL, 2015)

Como observado acima, os autores citados particionaram o comportamento em três regiões de acordo com o tipo de aderência predominante:

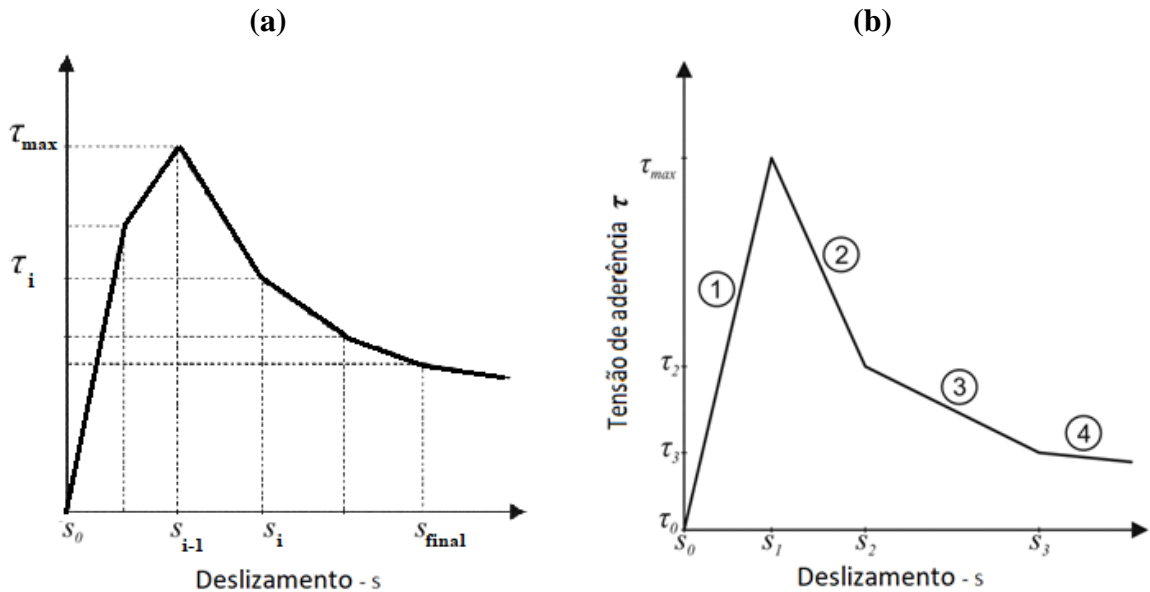
- estágio I: resposta linear, o que representa aderência perfeita entre concreto-malha. Nessa região a aderência por adesão é a predominante;
- estágio II: nesse ponto inicia-se o sucessivo rompimento da adesão com o concreto a partir dos filamentos externos. Inicia-se a mudança do mecanismo de aderência predominante, havendo redução da contribuição da adesão e o aumento da parcela de atrito;
- estágio III: os filamentos apresentam deslizamento em relação ao concreto e o mecanismo de aderência predominante é o atrito.

Em 2004, Xu pesquisou sobre a aderência de fios têxteis ao concreto. No trabalho em questão, o autor apresenta curvas tensão-deslizamento obtidas por meio de experimentos e análises numéricas. Xu comprova que a utilização de impregnação em fios têxteis aumenta consideravelmente a sua aderência ao concreto.

De maneira idealizada e simplificada, Banholzer (2004) estabeleceu que o comportamento representado na Figura 2.13 pode ser modelado conforme o gráfico multilinear indicado na Figura 2.14a. Através de ensaios *Pull out*, Richter (2005) comprova que, para correta representação dos 3 estágios identificados no comportamento da aderência malha-concreto, há necessidade de utilizar um mínimo de 4 regiões lineares, como ilustrado na Figura 2.14b.

A primeira região abrange o comportamento inicial até o ponto de tensão máxima de aderência malha-concreto. A segunda região é responsável pela representação da região descendente do estágio II até o início do estágio III. Já as duas últimas regiões lineares regem o comportamento identificado durante o início e fim do estágio III, respectivamente.

Figura 2.14 – Comportamento tensão-deslizamento idealizado por: (a) Banholzer; (b) Richter

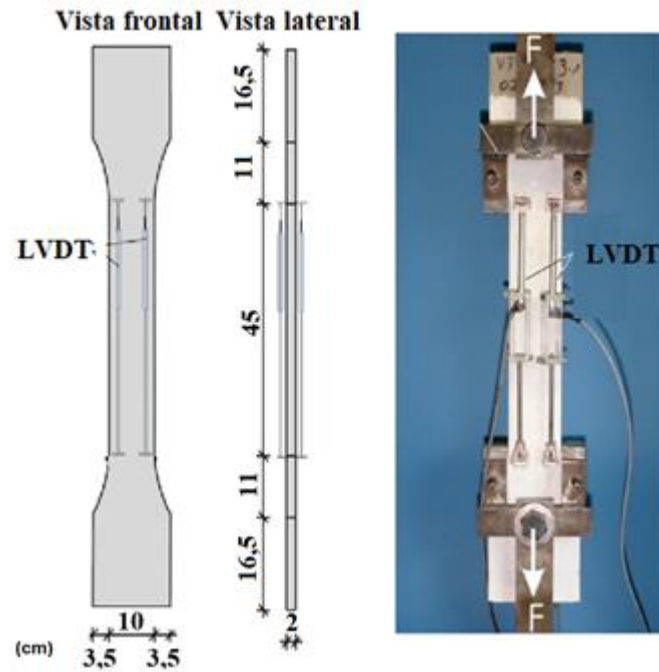


(Fonte: adaptado de KULAS, 2013)

2.4.2 Comportamento em ensaio de tração uniaxial

O comportamento do TRC com malhas impregnadas e não impregnadas sob tração uniaxial foi amplamente estudado por Jesse (2004), Molter (2005), Voss (2008) e Kulas (2013). Os corpos de prova utilizados para compreensão da resposta deste compósito, quando solicitado à tração uniaxial, são, em geral, elementos alongados, como apresentado na Figura 2.15.

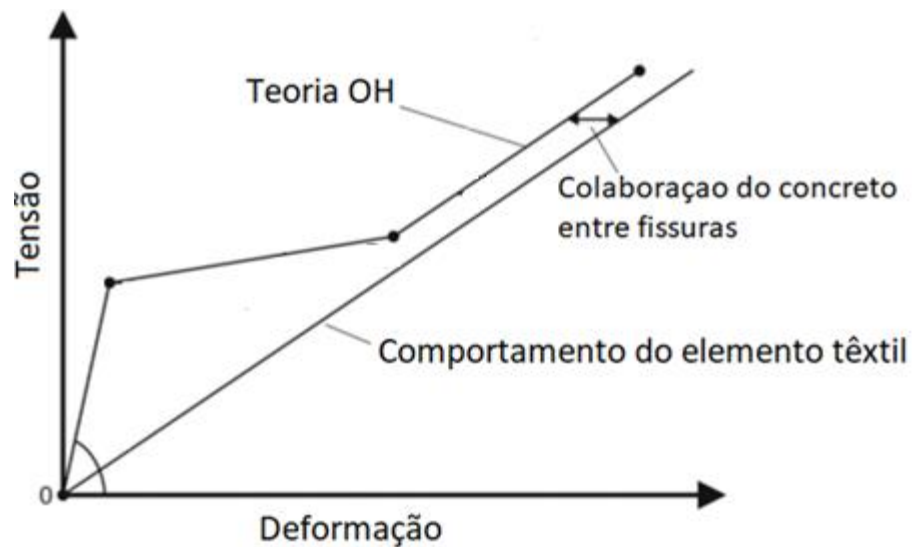
Figura 2.15 – Ensaio de tração uniaxial



(Fonte: Adaptado KULAS, 2013)

Os autores anteriormente citados, utilizaram, como base para entendimento da resposta à tração uniaxial do TRC, a teoria de comportamento OH idealizada por Ohno e Hannant (OHNO, 1994 apud KULAS, 2013) para elementos de concreto reforçados com fibras de polipropileno (Figura 2.16).

Figura 2.16 – Comportamento idealizado de TRC com malhas sem impregnação



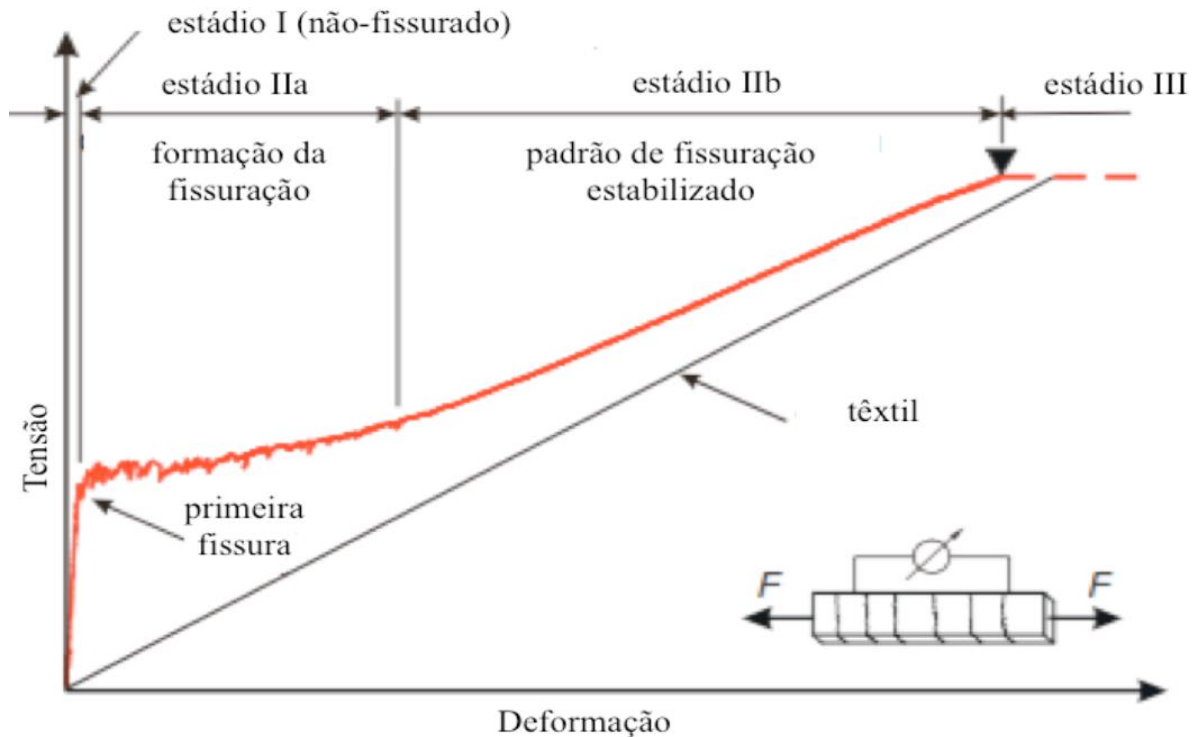
(Fonte: Adaptado ALRSHOUDI, 2013)

Baseando-se na teoria citada e nas respostas obtidas pelos experimentos em TRC, pode-se dividir o seu comportamento à tração em três estádios:

- a) estágio I: Região onde o concreto ainda não iniciou o processo de fissuração. Apesar de haver em quase sua totalidade comportamento linear, destaca-se que, próximo da transição para o estágio IIa, ocorre uma região de não-linearidade;
- b) estágio IIa: Nesta etapa inicia-se e desenvolve-se o processo de fissuração do concreto;
- c) estágio IIb: Na última etapa ocorre a estabilização da fissuração do concreto e o rompimento do elemento estrutural.

Deve-se destacar que, diferentemente dos elementos em concreto armado convencional, não há estágio III onde ocorreria a plastificação do material de reforço (aço). Essa característica é consequência do comportamento frágil linear do material têxtil e pode ser melhor entendido através da Figura 2.17.

Figura 2.17 – Comportamento à tração de elemento em TRC



(Fonte: Adaptado JESSE et al., 2005 apud DENARDI, 2016)

Durante o estágio I, assume-se que a matriz cimentícia e o elemento têxtil apresentam mesma deformação. Nesta condição, o comportamento da peça estrutural é, em sua maioria, determinado pelo concreto. Dessa maneira, o módulo de elasticidade do concreto têxtil pode ser obtido a partir da equação abaixo:

$$E_{comp} = \frac{E_t \cdot A_t + E_c \cdot A_c}{A_t + A_c} \quad (1)$$

Onde:

E_t e E_c : módulo de elasticidade da malha têxtil e do concreto, respectivamente;

A_t e A_c : área da seção transversal do têxtil e do concreto, respectivamente.

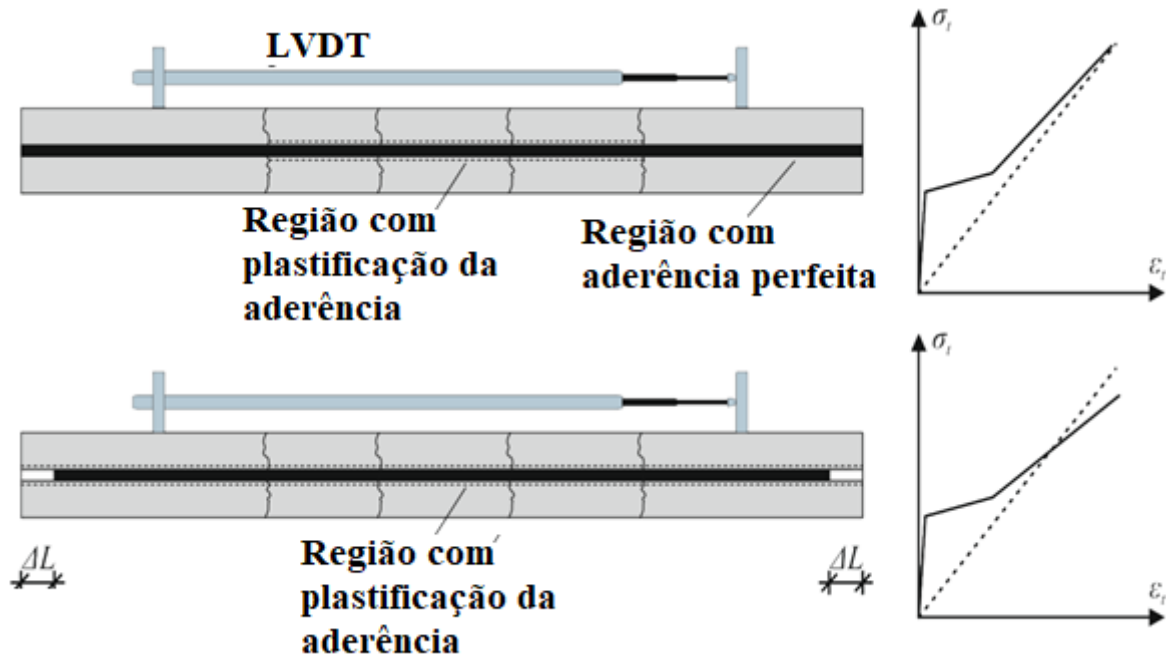
Com a ocorrência da primeira fissuração, inicia-se o estágio IIa. Nessa região, além do desenvolvimento do processo de fissuração, pode ocorrer um aumento das tensões no concreto têxtil (JESSE, 2004).

O início do estágio IIb caracteriza-se pela finalização do processo de fissuração. Nesse momento, a inclinação da curva tensão-deformação aumenta consideravelmente e mantém-se linear até a ruptura. A suposição da não formação de novas fissuras ao longo do estágio IIb não pôde ser comprovada por Jesse (2004), Voss (2008) e Kulas (2013), já que, ocasionalmente, foram detectadas novas fissuras nesta etapa. Bruckermann (2007) explica que a possível formação de fissuras no estágio IIb é consequência da má aderência malha-concreto.

Em adição às fissuras tardias, o estágio IIb caracteriza-se por apresentar uma tensão última e um módulo de elasticidade inferior ao obtido para o material de reforço têxtil utilizado, o que é justificado, por Jesse (2004), pela ruptura sucessiva dos filamentos externos. Entretanto, Kulas (2013), ao evidenciar este mesmo comportamento em peças de concreto têxtil com malhas impregnadas, contradiz o exposto por Jesse, uma vez que a utilização de impregnação impossibilita o processo de ruptura sucessiva dos filamentos externos. Deste modo, Kulas (2013) esclarece que o comportamento em questão decorre dos seguintes fatores: da contração transversal dos fios, a qual é intensificada pela diferença do coeficiente de Poisson entre a malha e o concreto; e da ocorrência de deslizamento relativo entre a malha-concreto na região que se aplica o deslocamento, como indicado na Figura 2.18. Por fim, Kulas (2013) relata que, além dos fatores citados, a diferença do tamanho do componente têxtil utilizado nos ensaios de tração

uniaxial da malha e do TRC pode proporcionar um possível efeito de escala e a consequente redução na tensão última do estágio IIb.

Figura 2.18 – Deslizamento da malha em relação ao concreto



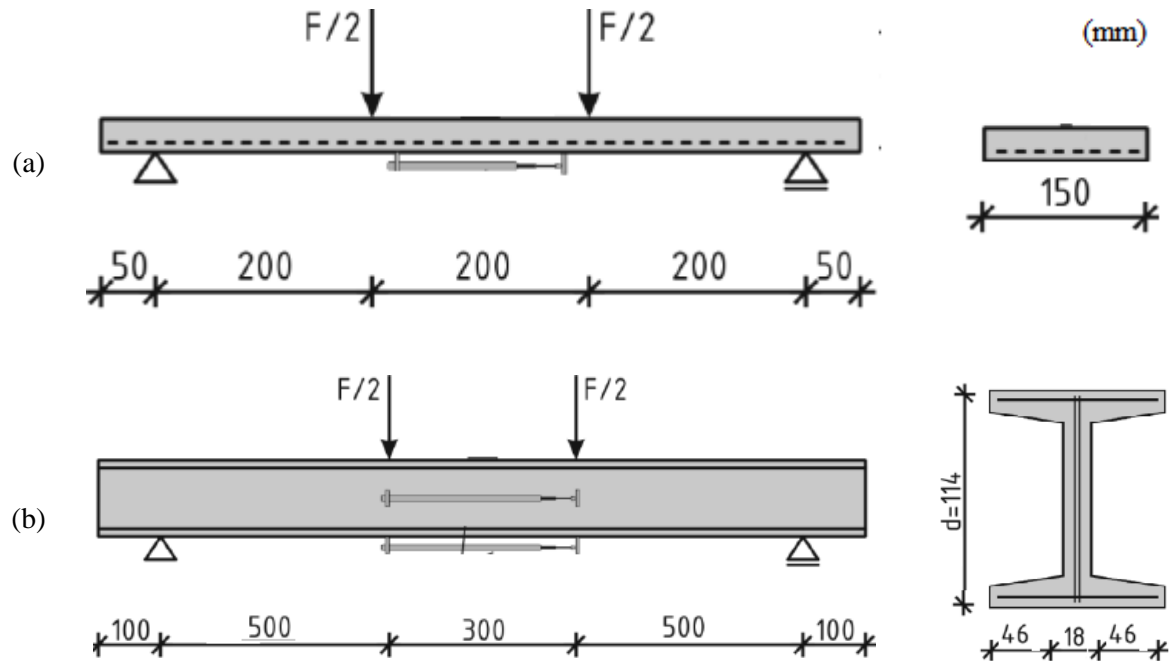
(Fonte: Adaptado KULAS, 2013)

A partir dos inúmeros experimentos de tração uniaxial realizados para diversos tipos de malha com impregnação, Kulas (2013) estabelece que o módulo de elasticidade apresentado no estágio IIb corresponde, em média, a 72% do apresentado pelo elemento têxtil.

2.4.3 Comportamento em ensaio de flexão

As pesquisas sobre a resposta sob flexão do concreto têxtil foram lideradas por Krüger (2004), Molter (2005), Voss (2008) e Kulas (2013). Enquanto Krüger (2004) realizou experimentos em lajes finas com 10 mm de espessura e malha têxtil pré-tensionada, Molter (2005) e Voss (2008) estudaram a resposta de vigas com paredes finas e malha têxtil sem impregnação. Os primeiros estudos realizados sobre a resposta a flexão de TRC com malhas impregnadas foram realizados por Kulas (2013) ao experimentar lajes e vigas seção I apresentadas na Figura 2.19b.

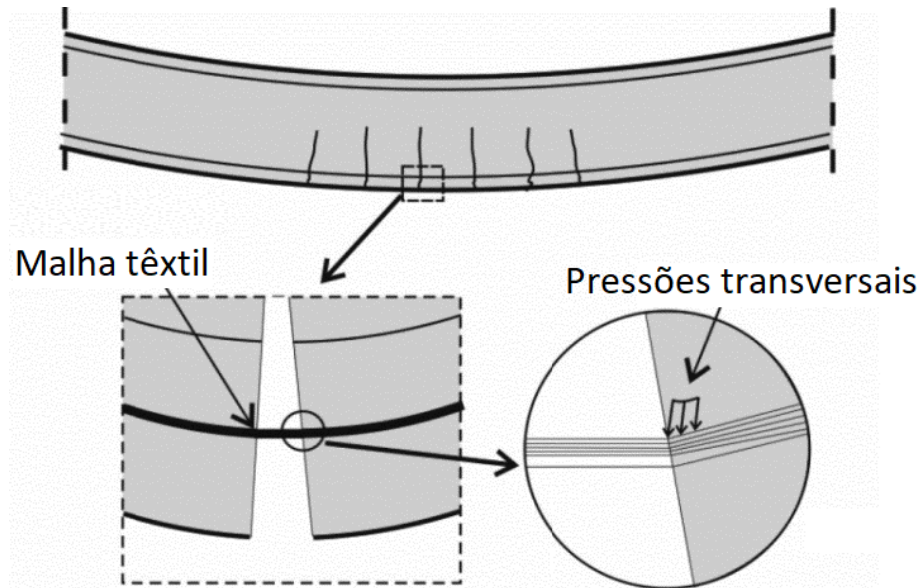
Figura 2.19 – Experimentos em: (a) Lajes; (b) Vigas seção I



(Fonte: KULAS, 2013)

Krüger (2004), Molter (2005), Voss (2008), e Kulas (2013) concluem que, analogamente ao comportamento do TRC sob tração uniaxial, a resposta sob flexão desses elementos, com e sem impregnação, possuem os mesmos estádios I, IIa e IIb. Entretanto, Kulas (2013) demonstra que, diferentemente do obtido nos testes de tração uniaxial, o módulo de elasticidade do estágio IIb coincide com o apresentado pela malha têxtil. Este comportamento sob flexão é explicado, pelo autor em questão, através da ocorrência do “efeito pino” da malha (Figura 2.20). De acordo com Kulas (2013), o “efeito pino” impede o deslizamento relativo entre a malha-concreto e, mesmo havendo diferença entre os coeficientes de Poisson, reduz o efeito negativo proporcionado pela contração transversal dos fios.

Figura 2.20 – Efeito das pressões transversais na malha têxtil



(Fonte: adaptado KULAS, 2013)

2.4.4 Comportamento em ensaio ao cisalhamento

Os primeiros experimentos realizados com foco no comportamento ao cisalhamento de elementos em concreto têxtil não impregnados foram elaborados por Molter (2005) e Voss (2008). Os respectivos autores realizaram ensaios de cisalhamento em vigas em I. Voss (2008), propôs modelos de dimensionamento ao cortante em concreto têxtil com e sem malha destinada à absorção exclusiva do esforço cortante,

Em 2013, Kulas, dando continuidade ao estudo realizado por Voss (2008) e Molter (2005), testou ao cisalhamento vigas I de TRC com malha impregnada. Semelhantemente ao executado por Voss (2008), Kulas (2013) diferenciou os experimentos em dois: vigas com e sem malha destinada à absorção das tensões cisalhantes. Como resultado, o respectivo autor adaptou, para situações com malha impregnada, os modelos de dimensionamento inicialmente propostos por Voss (2008).

De maneira geral e similar ao dito no tópico referente ao comportamento do TRC sob flexão, pode-se estabelecer que o comportamento do elemento estrutural em ensaio ao cisalhamento segue o mesmo padrão que o apresentado no Tópico 2.4.2 (KULAS, 2013). Ou seja, o comportamento de peças em TRC sob cisalhamento apresenta os mesmos estádios I, IIa e IIb identificados durante os ensaios de peças em TRC sob tração uniaxial.

2.5 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DIMENSIONAMENTO

Modelos analíticos para dimensionamento de concreto têxtil à tração, flexão e cortante foram estabelecidos por Voss (2008) e Kulas (2013), para malhas sem e com impregnação, respectivamente.

2.5.1 TRC com malha sem impregnação

Este tópico abrange os modelos analíticos propostos por Voss (2008) para dimensionamento de elementos em concreto têxtil com malha não impregnada.

2.5.1.1 Tração

Voss (2008) propõe como principal parâmetro de entrada a resistência a tração do filamento utilizado para formação dos fios. Desse modo, o autor estabelece a seguinte expressão para cálculo da capacidade de carga à tração.

$$F_t = A_t \cdot f_{fil} \cdot k_1 \cdot k_{0,\alpha} \cdot k_2 \quad (2)$$

Onde:

k_1 : coeficiente de eficiência;

k_2 : coeficiente para carregamento biaxial;

$k_{0,\alpha}$: coeficiente de orientação do reforço;

A_t : área de seção transversal do reforço têxtil;

f_{fil} : resistência à tração do filamento.

O coeficiente empírico de eficiência (k_1) é utilizado para considerar a diferença entre a resistência apresentada por um único filamento e a malha têxtil. Este fator, que pode ser calculado como a razão entre a resistência última à tração da malha e dos filamentos, considera a perda de resistência decorrente do deslizamento dos filamentos internos em relação aos externos e de problemas relacionados ao processo de fabricação. Sendo um fator obtido empiricamente, recomenda-se a utilização dos fatores apresentados no Quadro 2.2.

O coeficiente empírico (k_2) leva em consideração a redução da capacidade resistente devido a formação de fissuras em situações de solicitação de tensões biaxiais. Hegger e Voss (2008) relatam que há redução da capacidade da malha quando solicitada à tração biaxial, não havendo, no entanto, perda para casos com carregamento à compressão transversal e tração longitudinal. Deste modo, são apresentados, na Quadro 2.4, os valores obtidos empiricamente por Hegger, Will e Zell (2009).

Quadro 2.4 – Coeficiente “ k_2 ”

K2	Carregamento Biaxial
1,0	Tração longitudinal e compressão transversal
0,74	Tração longitudinal e transversal

(Fonte: Adaptado de HEGGER; WILL; ZELL, 2009).

O último coeficiente, $k_{0,\alpha}$, é responsável por considerar, no cálculo da capacidade última resistente do TRC, o ângulo de orientação das fibras em relação ao eixo de direção da tensão principal. À medida que se aumenta o ângulo “ α ”, amplia-se a parcela de tensão transversal às fibras, o que promove o rompimento prematuro dos filamentos. Dessa maneira, por meio de experimentos em fibras carregadas em diferentes direções, Voss (2008) e Hegger et al. (2006) sugerem a adoção da Equação (3):

$$k_{0,\alpha} = 1 - \frac{\alpha}{90^\circ} \quad (3)$$

Onde:

α : ângulo entre a direção da força de tração e o alinhamento dos fios.

Os coeficientes de segurança a serem adotados para as resistências de cálculo são os mesmos empregados no concreto armado, a exceção do coeficiente de segurança para o reforço têxtil, onde deve-se adotar 1,5, conforme Hegger, Will e Schneider (2011).

2.5.1.2 Momento fletor

A capacidade de carga a momento fletor de peças em TRC é obtida de maneira análoga ao de vigas em concreto armado convencional (HEGGER et al., 2006). Voss (2008) propõe que o momento fletor máximo, absorvido pelo elemento em concreto têxtil, pode ser calculado pela Equação (4):

$$M_u = k_{fl,p} \cdot F_{ctu} \cdot z \quad (4)$$

Onde:

$k_{fl,p}$: fator de carregamento à flexão;

F_{ctu} : capacidade à tração do reforço têxtil;

z : braço de alavanca interno.

O fator de carregamento à flexão ($k_{fl,p}$) é introduzido no cálculo para levar em conta as pressões transversais nos fios que surgem nas regiões de fissuração do concreto. Voss (2008) afirma que, apesar do dano criado pelas tensões não paralelas a direção dos filamentos, a ativação dos filamentos mais internos resulta em um aumento da resistência da malha. Os valores de $k_{fl,p}$ apresentados por Voss (2008) são mostrados pela Equação (5):

Vidro AR-Glass (Ponto de costura pilar): $k_{fl,p} = 1,0$;

Vidro AR-Glass (Ponto de costura tricô): $k_{fl,p} = 1,0 + 0,15 \rho_l$; (5)

Carbono: $k_{fl,p} = 1,0 + 0,4 \rho_l$

Sendo:

ρ_l : Taxa de reforço longitudinal em %.

2.5.1.3 Cortante

De maneira análoga ao cálculo para concreto armado convencional, Voss (2008) divide a capacidade resistente de elementos em TRC em duas parcelas, conforme Equação (6). A primeira é referente a contribuição do concreto, enquanto a segunda parcela é proveniente da contribuição da malha têxtil.

$$V_{Rm} = V_{Rm,c} + V_{Rm,f} \quad (6)$$

Onde:

$V_{Rm,c}$: componente referente à contribuição do concreto à resistência;

$V_{Rm,f}$: componente referente à contribuição da malha têxtil destinada à absorção do cortante.

2.5.1.3.1 Elementos em TRC sem malha de cisalhamento

A expressão utilizada para determinar a contribuição do concreto, apresentada na Equação (7), é derivada da norma alemã DIN 1045-1 e remodelada por Voss (2008).

$$V_{Rm,c} = 0,158 \cdot \beta \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot \frac{\sigma_{tex}}{f_{yk}} \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_{s,eff} \cdot d \quad (7)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{3}{a/d} > 1,0; \quad k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0; \quad \rho_l = \frac{A_t}{b_w \cdot d}; \quad \sigma_{tex} = \frac{M_{M\acute{a}x}}{A_t \cdot z}; \quad (8)$$

$$b_{s,eff} = b_w - n \cdot dt + 0,3 \cdot \sum_i h_{f,i} \quad (9)$$

Onde:

“a”: distância da carga concentrada até o apoio;

“d” : altura útil;

η_1 : fator de correção para concreto leve e tem valor igual a 1,0;

k : fator de escala com “d” em milímetros;

f_{yk} : 500 N/mm²;

f_{cm} : resistência média à compressão do concreto;

$b_{s,eff}$: largura efetiva da alma;

b_w : largura da alma para vigas seção I ou da base para lajes;

n : número de diâmetros de reforço têxtil;

dt : diâmetro dos fios;

$h_{f,i}$: altura da mesa.

Para esta situação, onde não há malha têxtil posicionada especificamente para absorção dos esforços cortantes, tem-se que $V_{Rm} = V_{Rm,c}$.

2.5.1.3.2 Elementos em TRC com malha de cisalhamento

Para elementos em concreto têxtil com reforço ao cisalhamento, Voss (2008) apresenta a necessidade de se multiplicar a parcela resistente do concreto pelo coeficiente “ k_f ”. Kulas (2013), baseando-se em Voss (2008), cita que a parcela do concreto $V_{Rm,c}$ é a mesma apresentada pela Equação (7), de maneira que o esforço cortante total absorvido é dado por:

$$V_{Rm} = V_{Rm,c} + k_f \cdot V_{Rm,f} \quad (10)$$

Sendo:

$$k_f = 1 - 17k_f \cdot \varpi_E \geq 0; \quad \varpi_E = \frac{a_{tw} \cdot E_{fil}}{b_{s,eff} \cdot E_c}; \quad (11)$$

Onde:

a_{tw} : área transversal da armadura ao cisalhamento;

E_{fil} : módulo de elasticidade do filamento.

Para esta situação, a capacidade resistente da malha têxtil é caracterizada pelo menor valor obtido através da Equação (12), onde a primeira parcela refere-se a parte tracionada da treliça idealizada, enquanto que a segunda é relativa as bielas comprimidas.

$$V_{Rm,f} = \min \left\{ \begin{array}{l} (a_{tw,0^\circ} \cdot f_{t,res,0^\circ} + a_{tw,90^\circ} \cdot f_{t,res,90^\circ}) \cdot z \cdot \cot \beta_r \cdot \cot \alpha \\ \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b_{s,eff} \cdot \frac{z}{\cot \beta_r \cdot \tan \beta_r} \end{array} \right. \quad (12)$$

Sendo:

$$f_{t,res,0^\circ(90^\circ)} = f_{fil} \cdot k_1 \cdot k_{0,\alpha}; \quad \cot \beta_r = 1,1 - 0,55 \cdot \frac{\sigma_x}{f_{ctm}} \leq \begin{cases} 2,15 \\ a/d \end{cases}; \quad (13)$$

Onde:

$a_{tw,0^\circ}$: área transversal da armadura ao cisalhamento longitudinal;

$a_{tw,90^\circ}$: área transversal da armadura ao cisalhamento vertical;

β_r : ângulo de fissuração decorrente do esforço cortante, pode ser obtido por $\alpha = 90^\circ - \beta_r$;

α_c : fator de redução estabelecido como 0,297;

σ_x : tensão longitudinal.

De acordo com Kulas (2013) e Voss (2008), o ângulo de inclinação das fissuras de corte (β_r) com o eixo longitudinal não apresenta relação com a taxa de reforço. Ademais, os respectivos autores concluíram que os valores de ângulos de fissuração variam entre $\beta_r = 42^\circ$ e $\beta_r = 44^\circ$.

2.5.2 TRC com malha impregnada

Este tópico abrange os modelos analíticos propostos por Kulas (2013) para dimensionamento de elementos em concreto têxtil com malha impregnada.

2.5.2.1 Tração

Diferentemente do realizado para TRC com malha sem impregnação, a tensão resistente utilizada, neste tópico, é referente aos ensaios de tração uniaxial em fios e malhas. Dessa maneira, dispensa-se a necessidade de aplicação do parâmetro redutor de eficiência. Assim, a resistência a tração das peças em concreto têxtil com malha impregnada pode ser obtida através da Equação (14) :

$$F_t = A_{t,warp} \cdot f_{t,warp} \cdot k_v \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{90^\circ}\right)^2 + A_{t,weft} \cdot f_{t,weft} \cdot k_v \cdot \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^2 \quad (14)$$

Onde:

$A_{t,warp}$ e $A_{t,weft}$: área da seção transversal na direção *warp* e *weft*, respectivamente;

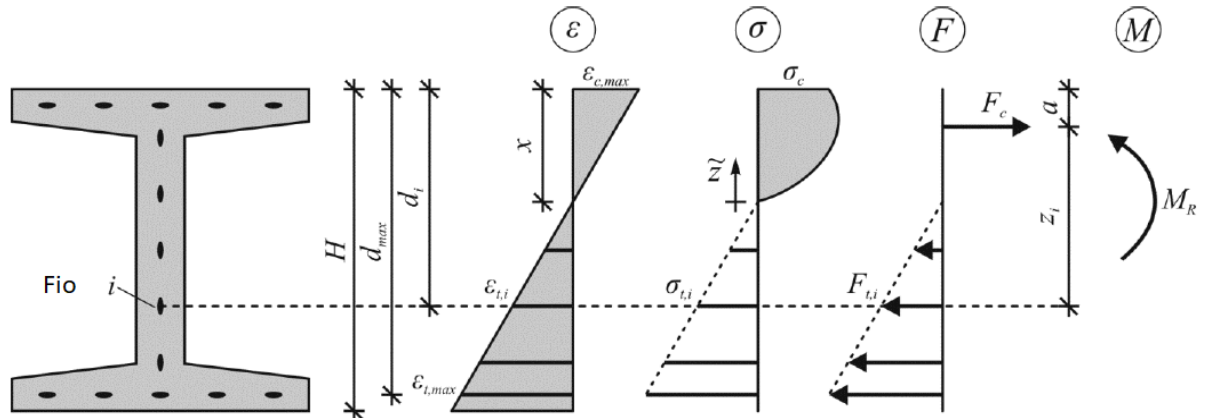
$f_{t,warp}$ e $f_{t,weft}$: resistência a tração da malha têxtil nas direções *warp* e *weft*, respectivamente;

k_v : fator decorrente da contração transversal do fio têxtil. $k_v = 0,84$ para elementos em TRC tracionados; $k_v = 1,0$ para elementos em TRC fletidos.

2.5.2.2 Momento fletor

Para obtenção do momento fletor máximo resistente da peça em TRC, Kulas, baseando-se em Hegger (2012, apud KULAS, 2013), assume o estado de deformação linearmente distribuída ao longo da seção da peça (hipótese de Bernoulli), como ilustrado na Figura 2.21:

Figura 2.21 – Distribuição de tensão e deformação na seção transversal



(Fonte: Adaptado de Kulas, 2013)

Sendo:

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = f_{cm} \cdot \frac{K \cdot \eta - \eta^2}{1 + (K - 2) \cdot \eta} \quad (15)$$

$$K = 1,05 \cdot E_{cm} \cdot \frac{\varepsilon_c}{f_{cm}} ; \quad \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} ; \quad (16)$$

Onde:

E_{cm} : módulo de elasticidade do concreto;

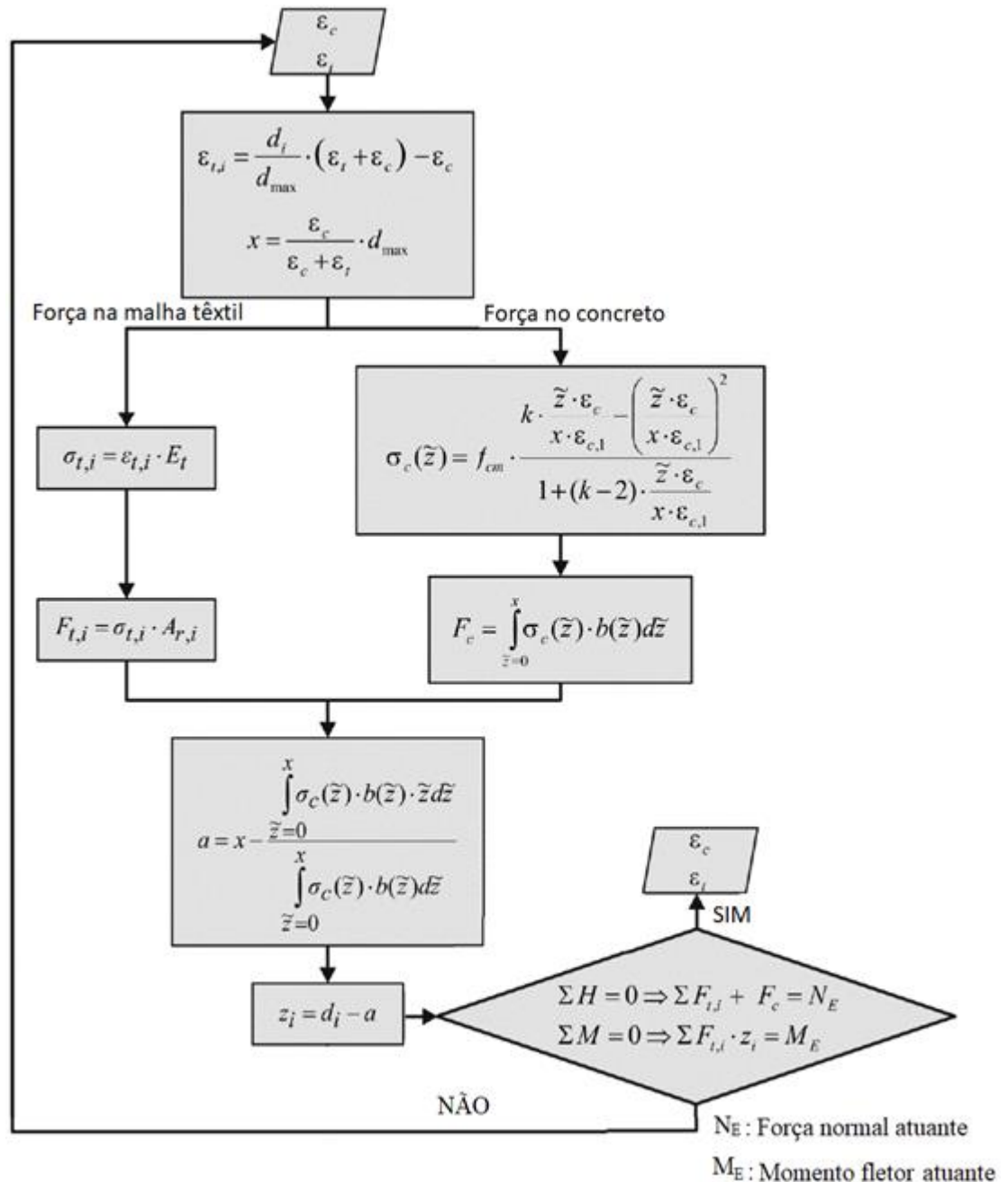
ε_{c1} : deformação do concreto no momento que se atinge a tensão de f_{cm} (ver Quadro 2.3);

ε_c : deformação do concreto;

σ_c : tensão no concreto.

Kulas (2013) estabelece que a determinação do momento fletor resistente da peça deve ser feita por meio do processo iterativo apresentado na Figura 2.22, o qual se baseia no equilíbrio de momento fletor e forças axiais da seção transversal.

Figura 2.22 – Fluxograma para obtenção do momento fletor resistente e do estado de deformação.



(Fonte: Adaptado de KULAS, 2013)

A obtenção do momento fletor máximo resistente, ilustrada no fluxograma, é realizada a partir do incremento de deformação do elemento têxtil até que se atinja, em equilíbrio de forças

horizontais e momento fletor, a deformação última no concreto ($\varepsilon_{c,1}$) ou na malha ($\varepsilon_{t,u}$). Neste ponto, determina-se o momento fletor resistente máximo da peça, o qual é obtido conforme a Equação (17):

$$M_u = \sum_i F_{t,i} \cdot z_i \quad (17)$$

2.5.2.3 Cortante

Para o dimensionamento ao esforço cortante de elementos em TRC com malha têxtil impregnada, Kulas (2013), mantendo a mesma ideia proposta pela Equação (6), adaptou as equações propostas por Voss (2008) para a sua respectiva situação.

2.5.2.3.1 Elementos em TRC sem malha de cisalhamento

A expressão apresentada por Kulas para cálculo da contribuição do concreto à resistência ao cortante é dada pela Equação (18):

$$V_{Rm,c} = C_{Rm,c} \cdot \beta \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l^\delta \cdot \sigma_{tex} \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_{s,eff} \cdot d \quad (18)$$

Sendo:

$$\rho_l = \frac{A_t}{A_c}; \quad C_{Rm,c} = \begin{cases} 0,29 & (\text{Para placas com } \frac{b}{h} \geq 4 \text{ e } h \leq 60\text{mm}); \\ 0,01 & (\text{Para vigas em I}) \end{cases} \quad (19)$$

$$\beta = \begin{cases} \left(\frac{7}{a/d}\right)^{1,5} & \geq 1,0 \text{ (Para placas)} \\ \frac{3}{a/d} & \geq 1,0 \text{ (Para vigas em I)} \end{cases}; \quad \delta = \begin{cases} 2,0 & (\text{Para placas } b/h \geq 4) \\ 1,0 & (\text{Para vigas } b/h < 4) \end{cases}; \quad (20)$$

Destaca-se que os parâmetros não citados neste tópico permanecem idênticos aos apresentados por Voss (2008) no Tópico 2.5.1.3.1.

2.5.2.3.2 Elementos em TRC com malha de cisalhamento

Diferentemente do proposto por Voss (2008), Kulas (2013) comprova que, para TRC com malha impregnada, não há necessidade de se multiplicar a parcela resistente do concreto pelo coeficiente " k_f ". Dessa maneira, a capacidade resistente pode ser obtida como já exposto na Equação (6). A parcela do concreto " $V_{Rm,c}$ " é calculada a partir da Equação (18), enquanto que a contribuição proveniente da malha de cisalhamento é expressa pela Equação (21).

$$V_{Rm,f} = \min \left\{ \begin{array}{l} a_{tw} \cdot f_{t,u} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{90^\circ}\right)^2 \cdot k_w \cdot z \cdot \cot \beta_r \\ \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b_{s,eff} \cdot \frac{z}{\cot \beta_r \cdot \tan \beta_r} \end{array} \right. \quad (21)$$

Sendo:

$$k_w = 1,81 \cdot w_v + 0,29 \leq 1,0; \quad w_v = \frac{a_{tw} \cdot E_t}{A_c \cdot E_c}; \quad (22)$$

Onde:

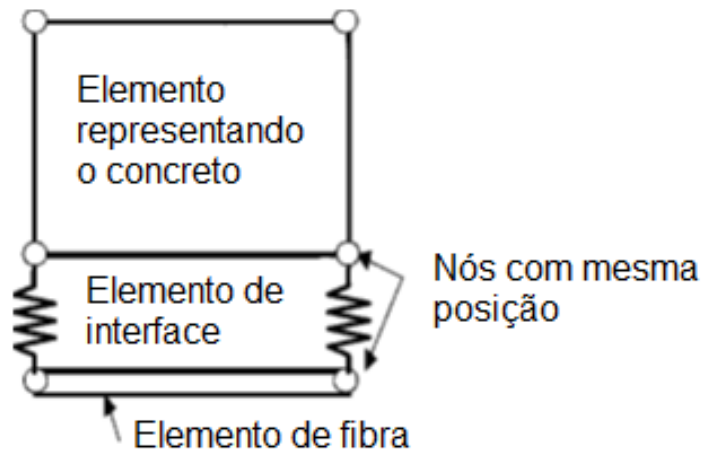
$a_{t,w}$: área transversal da malha têxtil de cisalhamento;

$f_{t,u}$: resistência a tração da malha têxtil de cisalhamento.

2.6 MODELAGENS NUMÉRICAS PELO MEF

A análise numérica através do Método dos Elementos Finitos (MEF) tornou-se uma opção vantajosa e bem aceita na resolução de problemas estruturais mais complexos. A análise de peças em TRC por meio do MEF inicia-se por volta dos anos 2000. Em 2004, Xu, representou numericamente, através do programa *MASA*, os ensaios de tensão-deslizamento realizados em diferentes tipos de fios têxteis. Para tal representação, o autor utilizou o modelo de aderência discreto estabelecido por Krüger et al. (2002) indicado na Figura 2.23. Holler et al. (2004) comprovam que, apesar da redução de aderência ao concreto dos filamentos mais internos em relação aos externos, o comportamento da interface fio-concreto para malhas sem impregnação pode ser representado a partir de uma única interface

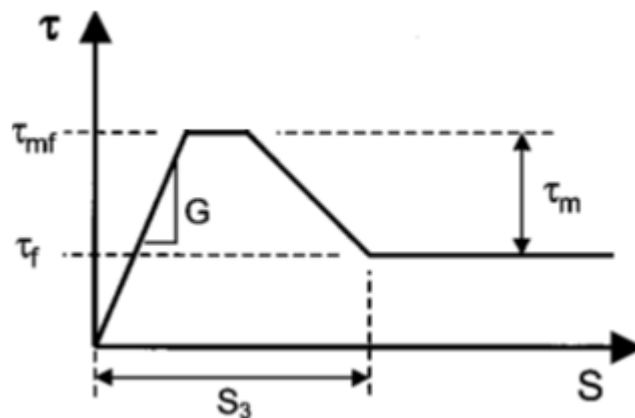
Figura 2.23 – Modelo de interface discreto utilizado por XU



(Fonte: adaptado de KRÜGER, 2002)

O elemento de interface tem como função conectar a matriz cimentícia ao fio têxtil por meio da relação tensão-deslizamento. O elemento de concreto, adotado por Xu (2004), foi modelado como modelo microplane, enquanto o reforço têxtil foi representado por elementos finitos de treliça. A curva de tensão-deslizamento utilizada na modelagem da interface é apresentada na Figura 2.24. Os parâmetros de entrada foram obtidos por meio dos ensaios de arrancamento de cada tipo de fio têxtil.

Figura 2.24 – Modelo tensão-deslizamento de Xu



(Fonte: PORTAL, 2015)

Onde:

τ_{mf} : tensão máxima de aderência;

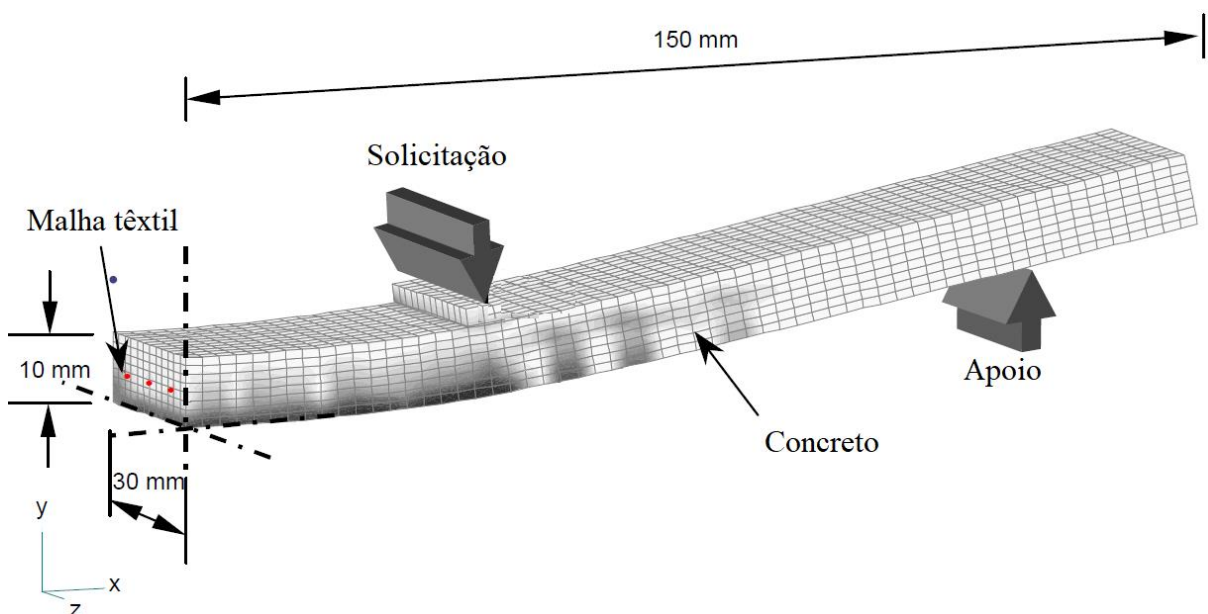
τ_m : tensão de aderência pelo mecanismo de adesão;

τ_f : tensão de aderência pelo mecanismo de atrito;

S_3 : deslizamento no momento que há apenas tensão de aderência por atrito.

Os resultados numéricos do estudo de Xu, quando comparados aos experimentais, foram considerados de alta precisão. Ainda em 2004, Krüger, utilizando o mesmo programa e os mesmos tipos de elementos finitos, analisou numericamente testes de arrancamento e de flexão em elementos em TRC. Apesar da consideração de parâmetros de ajuste e interfaces diferentes, Krüger, de maneira similar a Xu, obteve resultados através da análise numérica condizentes com o comportamento experimental. Na Figura 2.25 o modelo da análise a flexão criado por Krüger (2004).

Figura 2.25 – Modelo utilizado por Krüger



(Fonte: adaptado de KRÜGER, 2004)

Dando continuidade aos estudos realizados no âmbito da análise numérica por MEF de estruturas em concreto têxtil, Petre e Zapalowicz (2012) modelaram lajes em concreto armado convencional reforçadas com camada em TRC. Para análise computacional, os autores utilizaram o *software* DIANA FX+. A modelagem foi feita a partir da imposição de

deslocamento, uma vez que este procedimento resulta em maior estabilidade e facilidade de convergência, quando comparado ao procedimento de aplicação de forças (PETRE E ZAPALOWICZ, 2012). A aplicação dos deslocamentos foi realizada em duas etapas, a primeira é referente ao peso próprio, enquanto que a segunda refere-se a carregamento imposto no experimento.

Para modelagem do concreto, Petre e Zapalowicz (2012) empregaram o elemento Q8MEM oferecido pelo DIANA (2010). Este elemento plano de tensão 2D é isoparamétrico quadrilátero e possui apenas 4 nós. A representação dos elementos de reforço foi feita através de elementos de treliça (L2TRU). A análise foi feita de duas maneiras: primeiramente, considerou-se a aderência perfeita entre os reforços com a matriz cimentícia. Em seguida, a interface foi modelada considerando o comportamento apresentado pelo gráfico tensão-deslizamento apresentado em Schladitz et al. (2012). O comportamento da malha têxtil foi simplificado por Petre e Zapalowicz como elasto-plástico perfeito.

Além dos trabalhos numéricos já citados, pode-se destacar as pesquisas lideradas por Nguyen (2014) e Portal (2015). O primeiro consiste na análise numérica através do *software* ATENA de vigas mistas de TRC e concreto de poliestireno expandido. O segundo refere-se a modelagem de lajes finas em TRC por meio do DIANA. Portal simplificou os fios da malha têxtil como barras monolíticas elasto-frágeis dispostas exclusivamente na direção longitudinal da peça e criou uma interface única entre as barras monolíticas e o concreto, de maneira que o deslocamento relativo entre as fibras externas e internas é desprezado.

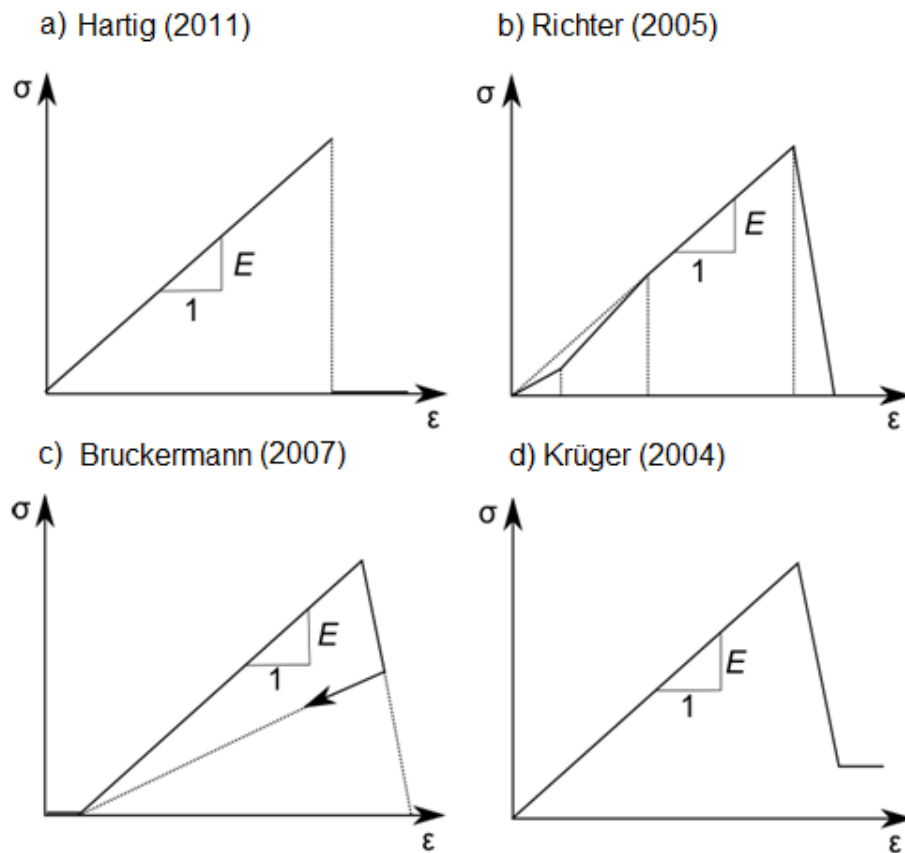
3 MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

Neste tópico serão abordadas as relações constitutivas e modelos utilizados para representação dos materiais presentes no compósito do TRC, malha têxtil e concreto.

3.1 MODELO CONSTITUTIVO PARA A MALHA TÊXTIL

Para se modelar corretamente o comportamento do TRC, torna-se necessária a implementação numérica das propriedades mecânicas e dos critérios de falha da malha têxtil. A escolha de um modelo apropriado para modelagem deve considerar o nível de análise a ser feita: micro, meso ou macro (PORTAL, 2015). Para análise a nível macro, a qual será abordada neste presente trabalho, Hartig (2011) apresenta os modelos, conforme a Figura 3.1, para representação numérica do comportamento da malha.

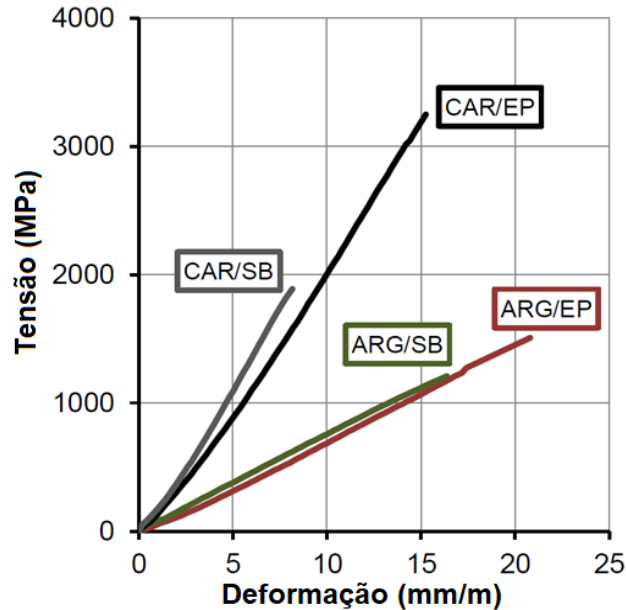
Figura 3.1 – Possíveis modelos constitutivos atribuídos à malha



(Fonte: adaptado de HARTIG, 2011)

Dentre os modelos constitutivos sugeridos, o presente trabalho adotará o modelo elasto-linear frágil utilizado por Hartig (2011). Este comportamento condiz com o obtido experimentalmente para malhas têxteis com fibras de carbono ou vidro, impregnadas com epóxi ou estireno-butadieno (SBR), como indicado na Figura 3.2

Figura 3.2 – Comportamento de malhas têxteis



(Fonte: adaptado de KULAS, 2015)

3.2 MODELO CONSTITUTIVO PARA CONCRETO

Como já destacado, elementos em concreto têxtil quando solicitados à flexão ou tração apresentam um comportamento que pode ser particionado em três fases típicas. Inicialmente, no estágio I, o concreto não está fissurado e possui comportamento elástico-linear. Com o acréscimo das tensões e a ruptura à tração local do concreto, inicia-se o processo de fissuração, o que caracteriza a etapa nomeada de Estádio IIa. Na última fase, chamada de Estádio IIb, ocorre a plastificação do concreto comprimido, nos casos de flexão, e a ruptura frágil do elemento têxtil. Deve-se destacar que, apesar de ocorrer a plastificação do concreto, os autores Kulas (2013) e Voss (2008) afirmam que não há estágio III, já que a malha têxtil se mantém com comportamento linear. Assim, diferentemente do estabelecido para o concreto armado, a plastificação do concreto não caracteriza o início do estágio III para peças em TRC.

As considerações das características e do comportamento do concreto estrutural são realizadas através da montagem das equações constitutivas. Os modelos constitutivos têm como objetivo reproduzir as relações tensão-deformação para diferentes estados de carga. Os modelos podem ser classificados quanto a teoria utilizada em seu embasamento. As teorias mais renomadas e reconhecidas são a teoria da elasticidade, a teoria da plasticidade, a teoria da viscosidade e a teoria da mecânica da fratura e dano.

O modelo constitutivo adotado para representação do comportamento do concreto foi customizado, na USERMAT, por Lazzari (2016) e aperfeiçoado por Schmitz (2017). A primeira autora implementou as sub-rotinas para análise instantânea do concreto comprimido, por meio do modelo elastoplástico com endurecimento, e do concreto tracionado através do comportamento elástico linear até a ruptura, onde inicia-se a contribuição do concreto entre fissuras. Em 2017, dando continuidade a utilização da USERMAT para customização dos modelos constitutivos, Schmitz adicionou ao código a consideração dos efeitos diferidos (retração e fluência) a partir do modelo viscoelástico.

3.2.1 Comportamento instantâneo

Neste tópico serão abordados os modelos constitutivos utilizados para representação do comportamento instantâneo do concreto.

3.2.1.1 Modelo para concreto comprimido

O modelo constitutivo elastoplástico, implementado por Lazzari (2016) para o concreto comprimido, é formado por um critério de plastificação, um critério de ruptura e por uma regra de endurecimento.

3.2.1.1.1 Critério de plastificação e ruptura

A determinação do início da degradação do concreto é primordial na representação do real comportamento do concreto. Nesse aspecto, o critério de plastificação define o limite do comportamento elástico, estabelecendo, assim, o instante em que ocorre a perda de linearidade do concreto. Deve-se destacar que, neste trabalho, o critério de ruptura e plastificação apresentam formato de acordo com a superfície Ottosen (1997).

O critério de ruptura e plastificação de Ottosen (1977), adotado por Lazzari (2016) e utilizado pelo *CEB-FIP Model Code 2010*, é uma função do estado de tensão. O critério de ruptura pode ser expresso a partir de três invariantes de tensão, como apresentado a seguir:

$$f(I_1, J_2, J_3) = 0 \quad (23)$$

Onde:

I_1 : primeiro invariante do tensor de tensões;

J_2 e J_3 : segundo e terceiro invariante do tensor desviador de tensões, respectivamente.

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (24)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \right] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 \quad (25)$$

$$J_3 = \begin{vmatrix} S_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & S_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & S_{zz} \end{vmatrix} \quad (26)$$

Sendo S_{xx} , S_{yy} , e S_{zz} as tensões desviadoras, definidas por:

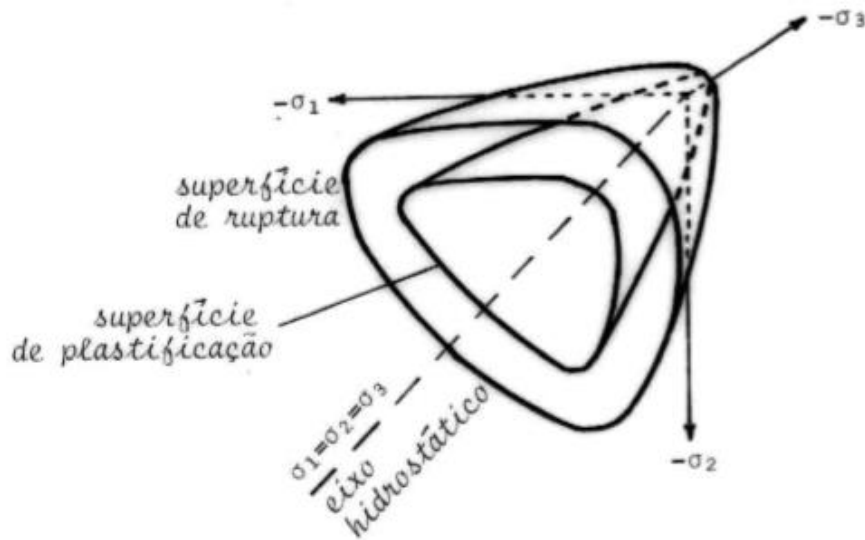
$$S_{xx} = \frac{(2 \cdot \sigma_{xx} - \sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{3} \quad (27)$$

$$S_{yy} = \frac{(2 \cdot \sigma_{yy} - \sigma_{xx} - \sigma_{zz})}{3} \quad (28)$$

$$S_{zz} = \frac{(2 \cdot \sigma_{zz} - \sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{3} \quad (29)$$

As superfícies de ruptura e de plastificação podem ser representadas em um espaço tridimensional de tensões principais conforme esquematizado na Figura 3.3.

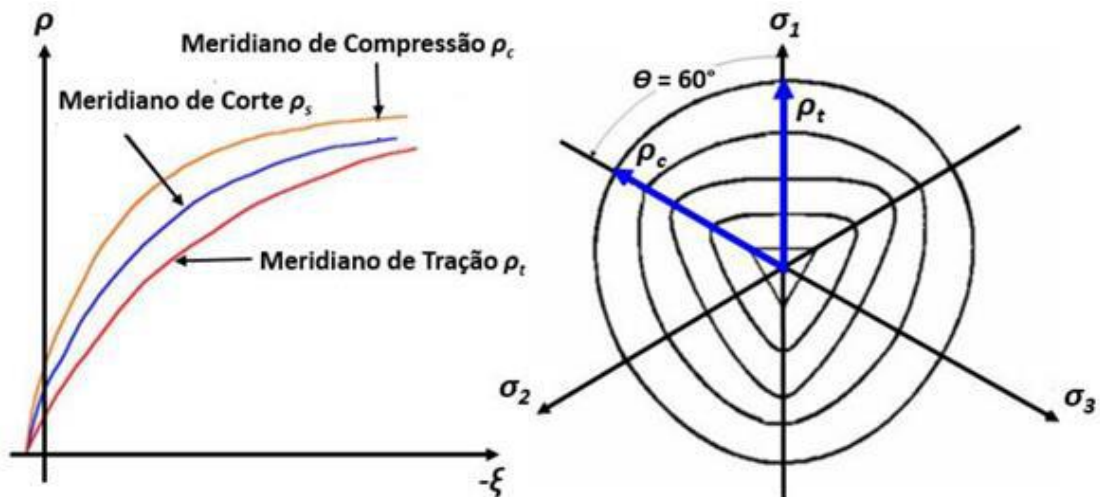
Figura 3.3 – Superfície de ruptura tridimensional



(Fonte: CAMPOS FILHO, 2003)

Além desta representação, a superfície de ruptura pode ser visualizada a partir de seus meridianos e de suas seções transversais (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Meridianos de compressão, de tração e de cisalhamento da superfície de ruptura e planos desviadores



(Fonte: CHEN e HAN, 1988)

As seções transversais são curvas de interseção entre a superfície de ruptura e plano desviador, que é perpendicular ao eixo hidrostático. Os meridianos da superfície de ruptura são curvas de

interseção entre esta superfície e planos meridianos, que contém o eixo hidrostático (CHEN; HAN, 1988).

Conforme Chen e Han (1988), a superfície de ruptura do concreto caracteriza-se por:

- a) ser dependente dos três invariantes de tensão;
- b) apresentar forma suave e convexa, a exceção do seu vértice, como mostrado na Figura 3.3;
- c) possuir meridianos parabólicos que se expandem no sentido negativo do eixo hidrostático (Figura 3.4);
- d) exibir uma seção transversal ao eixo hidrostático em formato aproximadamente triangular para tensões de tração e baixas tensões de compressão. À medida que se aumenta a tensão de compressão, a seção transversal torna-se mais circular.

O critério de ruptura de Ottosen (1977) estabelece como função para a superfície de ruptura, a expressão apresentada pela Equação (30):

$$f(I_1, J_2, \theta) = \alpha \frac{J_2}{f_{cm}^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_{cm}} + \beta \frac{I_1}{f_{cm}} - 1 = 0 \quad (30)$$

Sendo:

$$\lambda = c_1 \cos \left\{ \frac{1}{3} \cdot \cos^{-1} [c_2 \cos(3\theta)] \right\}, \text{ para } \cos(3\theta) \geq 0 \quad (31)$$

$$\lambda = c_1 \cos \left\{ \frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \cdot \cos^{-1} [-c_2 \cos(3\theta)] \right\}, \text{ para } \cos(3\theta) \leq 0 \quad (32)$$

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (33)$$

Os parâmetros do material (α , β , c_1 e c_2) são relacionadas a resistência média à compressão uniaxial (f_{cm}), a resistência média à tração uniaxial (f_{ctm}), a resistência à compressão biaxial e a resistência à compressão triaxial no meridiano de compressão ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) descrito por σ_{com} e τ_{com} .

A determinação dos parâmetros (α , β) é feita a partir das expressões a seguir:

$$\alpha = \frac{h \cdot \beta - \sqrt{2}}{y} \quad (34)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{2} - \frac{3y}{K f_{2c}}}{h - \frac{9y}{f_{2c} - K}} \quad (35)$$

Sendo:

$$h = -\frac{\sqrt{2} \cdot x + y}{\frac{y}{\sqrt{2}} - \frac{1}{3}}; \quad K = \frac{f_{ctm}}{f_{cm}}; \quad f_{2c} = \frac{f_{c2m}}{f_{cm}}; \quad x = \frac{\sigma_{com}}{f_{cm}}; \quad y = \frac{\tau_{com}}{f_{cm}} \quad (36)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}, \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (37)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,1 \cdot f_{cm}), \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (38)$$

$$f_{2cm} = \left(1,2 - \frac{f_{cm}}{1000}\right) \cdot f_{cm} \quad (39)$$

$$\sigma_{com} = -240 \text{ MPa} \quad (40)$$

$$\tau_{com} = \left[185 - 180 \cdot \frac{f_{cm}}{100} + 260 \left(\frac{f_{cm}}{100}\right)^2 - 84 \left(\frac{f_{cm}}{100}\right)^3\right] \quad (41)$$

Onde:

f_{ctm} : resistência média à tração do concreto (MPa);

f_{c2m} : resistência à compressão biaxial do concreto (MPa);

σ_{com}, τ_{com} : ponto de tensão de compressão triaxial sobre o meridiano de compressão.

Os parâmetros do material, c_1 e c_2 , são calculados a partir das expressões (42) e (43):

$$\begin{cases} c_1 = [2 \cdot \cos\theta - 1] \cdot \lambda_t + 4 \cdot [1 - \cos\theta] \cdot \lambda_c \text{ para } \frac{\lambda_c}{\lambda_t} \leq \frac{1}{2} \\ c_1 = \frac{\lambda_c}{\cos\left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \cdot \arccos(c_2)\right]} \text{ para } \frac{\lambda_c}{\lambda_t} > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_2 = 1 \text{ para } \frac{\lambda_c}{\lambda_t} \leq \frac{1}{2} \\ c_1 = \cos \left\{ 3 \cdot \arctg \left[\frac{\left(2 \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_t} - 1 \right)}{\sqrt{3}} \right] \right\} \text{ para } \frac{\lambda_c}{\lambda_t} > \frac{1}{2} \end{array} \right. \quad (43)$$

Sendo:

$$\lambda_c = \left(1 - \frac{h}{3y} \right) \cdot \sqrt{3} \cdot \beta + \sqrt{3} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot y} \quad (44)$$

$$\lambda_t = \left(2\sqrt{3} - \frac{f_{2c} \cdot h}{\sqrt{3} \cdot y} \right) \cdot \beta + \frac{\sqrt{3}}{f_{2c}} + \frac{\sqrt{2} \cdot f_{2c}}{\sqrt{3} \cdot y} \quad (45)$$

O critério de plastificação, introduzido na USERMAT, considera que o concreto comprimido apresenta endurecimento isotrópico. A atribuição deste modelo promove a expansão da superfície de plastificação equitativamente em todas as direções, mantendo-se, assim, o seu centro e forma fixos à medida que ocorre deformação plástica. A partir da consideração da tensão efetiva igual à resistência média à compressão do concreto ($\sigma_{ef} = f_{cm}$) na Equação (30), obtém-se a expressão (46) :

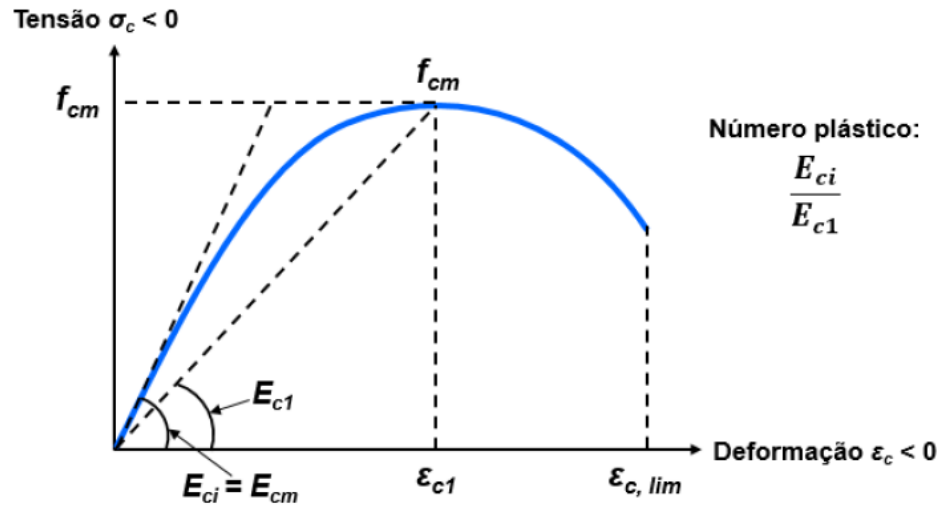
$$F = \frac{\lambda\sqrt{J_2} + \beta I_1 + \sqrt{(\lambda\sqrt{J_2} + \beta I_1)^2 + 4\alpha J_2}}{2} = 0 \quad (46)$$

Considerando a tensão de plastificação inicial nula, o domínio plástico abrange todo o intervalo até a ruptura.

3.2.1.1.2 Regra de endurecimento

A regra de endurecimento estabelece o critério de movimentação da superfície de plastificação (superfície de carregamento) durante a deformação plástica. Em geral, esta regra é determinada pela relação tensão-deformação efetiva, onde se pode extrapolar os resultados de um ensaio uniaxial para uma situação multiaxial. Levando este fato em consideração, Lazzari (2016) adota o diagrama tensão-deformação uniaxial proposto pelo *CEB-FIP Model Code 2010* (2012). A curva, ilustrada na Figura 3.5, é expressa pela Equação (47).

Figura 3.5 – Diagrama de tensão-deformação do concreto comprimido



(Fonte: CEB-FIP Model Code 2010, 2012)

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = - \left(\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \right) \text{ para } |\epsilon_c| < |\epsilon_{c,lim}| \quad (47)$$

Sendo:

$$\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c,lim}} \quad (48)$$

$$k = \frac{E_{ci}}{E_{c1}} \quad (49)$$

Onde:

 η : relação entre deformações atual e máxima; k : número plástico; σ_c : tensão no concreto; ϵ_c : deformação de compressão; ϵ_{c1} : deformação na máxima tensão de compressão; ϵ_{cu} : deformação última de compressão; E_{ci} : módulo de elasticidade do concreto; E_{c1} : módulo secante correspondente à máxima tensão de compressão.

Para a determinação dos módulos de elasticidade e das deformações, em caso de ausência de resultados experimentais, pode-se recorrer ao Quadro 3.1 adaptado do *CEB-FIP Model Code 2010* (2012).

Quadro 3.1 - Valores de parâmetros para concreto de acordo com o f_{ck}

Concreto	C20	C40	C50	C60	C80	C90	C100	C110	C120
f_{ck} (kN/cm ²)	2	4	5	6	8	9	10	11	12
E_{ci} (kN/cm ²)	3030	3630	3860	4070	4440	4600	4750	4890	5030
E_{c1} (kN/cm ²)	1330	2000	2320	2620	3140	3380	3600	3930	4270
ε_{c1} (kN/cm ²)	-2,10	-2,40	-2,60	-2,70	-2,80	-2,90	-3,00	-3,00	-3,00
ε_{cu} (‰)	-3,50	-3,50	-3,40	-3,30	-3,10	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00
k	2,28	1,82	1,66	1,55	1,41	1,36	1,32	1,24	1,18

(Fonte: adaptado de *CEB-FIP Model Code 2010*, 2012)

Para se obter uma relação $\sigma_c = \sigma_c(E_{ci}, k, f_{cm}, \varepsilon_{c1}, \varepsilon_p)$, substitui-se na Equação (47) a Equação (50). Reorganizando os termos da expressão da maneira apresentada pela Equação (51), obtêm-se as expressões dos coeficientes a, b e c.

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_{ci}} + \varepsilon_p \quad (50)$$

$$a \cdot \sigma_c^2 + b \cdot \sigma_c + c = 0 \quad (51)$$

$$a = \frac{1}{\varepsilon_{c1} \cdot E_{ci}} \cdot \left(\frac{k-2}{f_{cm}} + \frac{1}{\varepsilon_{c1} \cdot E_{ci}} \right) \quad (52)$$

$$b = \frac{1}{f_{cm}} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_p \cdot (k-2)}{\varepsilon_{c1}} \right) - \frac{1}{\varepsilon_{c1} \cdot E_{ci}} \cdot \left(k - \frac{2\varepsilon_p}{\varepsilon_{c1}} \right) \quad (53)$$

$$c = -\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{c1}} \cdot \left(k - \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{c1}} \right) \quad (54)$$

3.2.1.1.3 Vetor de fluxo plástico

Em decorrência do baixo número de evidências experimentais e da maior praticidade, Lazzari (2016), baseando-se em Owen e Hinton (1980), implementou um modelo de plasticidade associada no ANSYS. Após o escoamento do material, o incremento de deformação pode ser dividido em duas parcelas: a elástica e plástica (OWEN; HINTON, 1980). Considerando que a plasticidade associada gera, dentro do domínio plástico, um vetor de fluxo plástico normal a superfície de plastificação, pode-se obter o incremento de deformação plástica por:

$$d\varepsilon_{ij}^{pl} = d\lambda \frac{dF}{d\sigma_{ij}} \quad (55)$$

De maneira que o vetor de fluxo plástico é dado por:

$$\{a\} = \frac{dF}{d\sigma_{ij}} = \frac{dF}{dI_1} \frac{dI_1}{d\sigma_{ij}} + \frac{dF}{d\sqrt{J_2}} \frac{d\sqrt{J_2}}{d\sigma_{ij}} + \frac{dF}{d\theta} \frac{d\theta}{d\sigma_{ij}} = C_1\{a_1\} + C_2\{a_2\} + C_3\{a_3\} \quad (56)$$

Os coeficientes a_1 , a_2 e a_3 são determinados conforme as expressões:

- Coeficiente a_1

$$\{a_1\} = \frac{dI_1}{d\sigma_{ij}} = \delta_{ij} \quad (57)$$

$$\{a_1\} = \{1,1,1,0,0,0\} \quad (58)$$

- Coeficiente a_2

$$\{a_2\} = \frac{d\sqrt{J_2}}{d\sigma_{ij}} = \frac{d\sqrt{J_2}}{dS_{kl}} \frac{dS_{kl}}{d\sigma_{ij}} \quad (59)$$

$$\frac{d\sqrt{J_2}}{dS_{kl}} = \frac{S_{ij}}{2\sqrt{J_2}} \delta_{ki} \delta_{lj} \quad (60)$$

$$\frac{dS_{kl}}{d\sigma_{ij}} = \delta_{ki}\delta_{lj} - \frac{1}{3}\delta_{kl}\delta_{ij} \quad (61)$$

$$\frac{d\sqrt{J_2}}{d\sigma_{ij}} = \left(\frac{S_{ij}}{2\sqrt{J_2}} \delta_{ki}\delta_{lj} \right) \left(\delta_{ki}\delta_{lj} - \frac{1}{3}\delta_{kl}\delta_{ij} \right) = \frac{S_{ij}}{2\sqrt{J_2}} - \frac{Tr(S)}{3} \quad (62)$$

Como o traço da matriz de tensão desviadora é 0, obtém-se:

$$\{a_2\} = \frac{1}{2\sqrt{J_2}} \{S_{xx}, S_{yy}, S_{zz}, 2\tau_{xy}, 2\tau_{xz}, 2\tau_{yz}\} \quad (63)$$

- Coeficiente a_3

$$\{a_3\} = \frac{dJ_3}{d\sigma_{ij}} \quad (64)$$

$$\begin{aligned} \{a_3\} = & \left\{ \left(S_{yy}S_{zz} - \tau_{yz}^2 + \frac{J_2}{3} \right), \left(S_{xx}S_{zz} - \tau_{xz}^2 + \frac{J_2}{3} \right), \right. \\ & \left(S_{zz}S_{yy} - \tau_{xy}^2 + \frac{J_2}{3} \right), 2(\tau_{xz}\tau_{xy} - S_{xx}\tau_{yz}), \\ & \left. 2(\tau_{xy}\tau_{yz} - S_{yy}\tau_{xz}), 2(\tau_{yz}\tau_{xz} - S_{zz}\tau_{xy}) \right\} \quad (65) \end{aligned}$$

- Coeficiente C_1

$$C_1 = \frac{dF}{dI_1} = \frac{\beta}{f_{cm}} \quad (66)$$

$$C_1 = \frac{dF}{dI_1} \quad (67)$$

- Coeficiente C_2

$$C_2 = \frac{dF}{d\sqrt{J_2}} + \frac{d\theta}{d\sqrt{J_2}} \frac{dF}{d\theta} \quad (68)$$

A partir do desenvolvimento das derivadas, chega-se à Equação (69)

$$C_2 = \frac{df}{d\sqrt{J_2}} - \frac{\operatorname{tg}(3\theta)}{\sqrt{J_2}} \frac{dF}{d\theta} \quad (69)$$

- Coeficiente C_3

$$C_3 = \frac{dF}{d\theta} \frac{d\theta}{dJ_3} \quad (70)$$

Com

$$\frac{d\theta}{dJ_3} = - \frac{\sqrt{3}}{2\cos(3\theta) \cdot J_2^{3/2}} \quad (71)$$

Então:

$$C_3 = - \frac{\sqrt{3}}{2\cos(3\theta) \cdot J_2^{3/2}} \frac{dF}{d\theta} \quad (72)$$

3.2.1.2 Modelo para concreto tracionado

O comportamento do concreto tracionado, adotado por Lazzari (2016), é definido como material elástico com amolecimento. Este modelo caracteriza-se por ser elástico-linear até a fissuração, momento em que se inicia a aplicação do modelo de fissuras distribuídas criado por Hinton (1988) e aprimorado por Martinelli (2003). Este modelo é composto pelo critério de fissuração, por um modelo de colaboração do concreto entre fissuras (*tension stiffening*) e por outro modelo para a transferência das tensões de corte nos planos das fissuras (*shear transfer*).

3.2.1.2.1 Critério de fissuração

O critério de ruptura citado anteriormente define o momento em que as tensões atuantes nos pontos de integração atingem a superfície de ruptura. A superfície de ruptura pode ser atingida a partir do esmagamento ou fissuração do concreto. A fim de diferenciar estas situações, adotou-se o critério proposto pelo boletim nº 156 do CEB (1983), o qual é apresentado a seguir:

- a) se $\sigma_1 \geq \frac{f_{ctm}}{2}$, o ponto de integração fissurou;
- b) se $\sigma_1 < \frac{f_{ctm}}{2}$, o ponto de integração esmagou.

Sendo a tensão principal de tração (σ_1) calculada pela expressão:

$$\sigma_1 = \frac{2\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{I_1}{3} \quad (73)$$

A consideração da fissuração é realizada a partir da redução do módulo de elasticidade e da introdução do comportamento ortotrópico para a região fissurada. A redução do módulo de elasticidade é feita na direção perpendicular ao plano da fissura e o efeito de Poisson pode ser desprezado (HINTON, 1988).

3.2.1.2.2 Colaboração do concreto entre fissuras

De acordo com Martinelli (2003), a colaboração do concreto entre fissuras é altamente influenciada pela qualidade da aderência reforço-concreto. A partir do momento da formação de fissuras, os esforços internos são transmitidos por meio da interação entre os componentes citados. Desta maneira, Stramandinoli e Rovere (2008) e Martinelli (2003) citam alguns fatores que, ao influenciarem na aderência, modificam consideravelmente o comportamento à tração pós-fissuração: taxa de armadura; dimensão do elemento de reforço; propriedades mecânicas dos materiais; e histórico de cargas (em caso de haver carregamentos cíclicos).

No estágio I, onde não há fissuração, o concreto e o reforço atuam de maneira perfeitamente aderida. A partir do surgimento da fissuração, quando se inicia o estágio IIa, a transmissão dos esforços entre fissuras ocorre por meio dos mecanismos de aderência, o que permite que o concreto fissurado ainda resista (*tension stiffening*). A não consideração desta capacidade resulta na atribuição de uma rigidez pós-fissuração inferior à existente na prática. De acordo com Martinelli (2003), a incorporação da resistência de pós-fissuração do concreto, em modelos que utilizam o método dos elementos finitos para análise, pode ser realizada de duas maneiras.

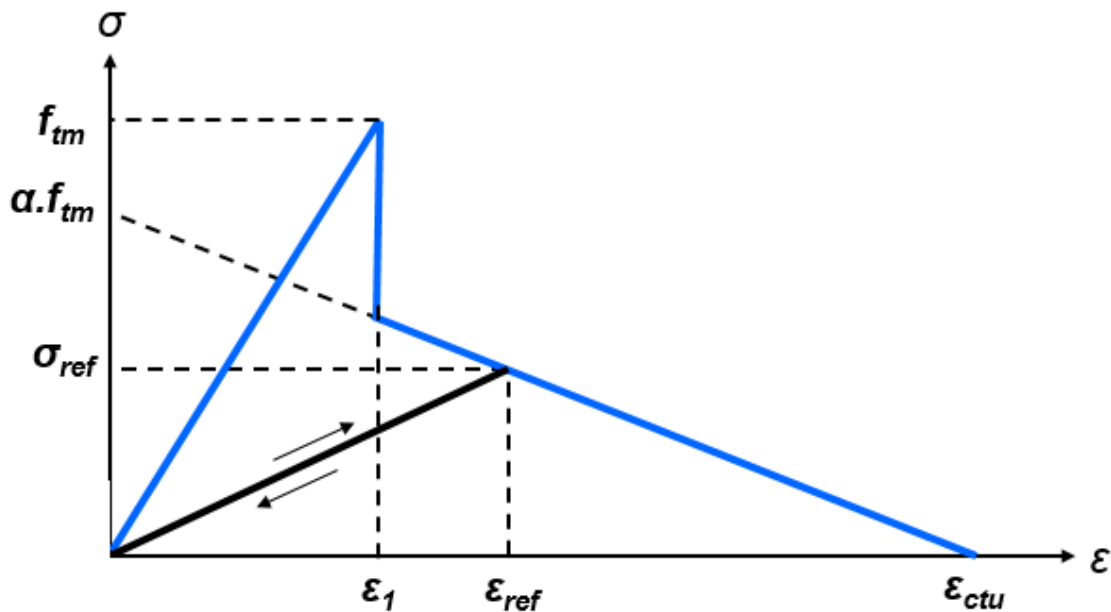
A primeira alternativa é através da modelagem de elementos especiais de aderência. Neste caso, os elementos de interface são modelados a partir de suas respectivas relações tensão-deslocamento e o concreto é considerado elasto-linear frágil com perda total da resistência nas

regiões fissuradas. Este tipo de análise, por utilizar elementos especiais de aderência, requer intenso esforço computacional (MARTINELLI, 2003).

Na segunda forma, considera-se a aderência perfeita entre os elementos de concreto e reforço (malha ou aço), havendo, assim, compatibilidade de deformação entre ambos materiais. Desse modo, modifica-se a lei constitutiva do concreto, através da introdução de um ramo descendente pós-fissuração, para consideração da contribuição do concreto fissurado. Neste caso, Martinelli (2003) apresenta dois aspectos a serem analisados durante a definição da nova curva tensão-deformação do concreto tracionado: o formato e os valores dos parâmetros requeridos para sua definição.

Em decorrência do maior uso computacional demandado pela primeira alternativa, Lazzari (2016), optando pela modificação da curva tensão-deformação do concreto fissurado, implementou o comportamento indicado na Figura 3.6 e expresso pela Equação (74).

Figura 3.6 – Curva tensão deformação para o concreto tracionado



(Fonte: LAZZARI, 2016)

$$\sigma = \alpha \cdot f_{ctm} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ctu}}\right) \quad (74)$$

Nesta expressão, α é o parâmetro que define a inclinação do ramo linear descendente e ε_{ctu} é o parâmetro que indica a deformação limite a partir da qual a colaboração do concreto entre fissuras não deve mais ser considerada. Para casos de concreto armado, Prates Júnior (1992)

adotou o valor de 0,8 para α e 0,002 para ε_{ctu} , enquanto Martinelli (2003) e Lazzari (2016) empregaram 0,6 e 0,001 para α e ε_{ctu} , respectivamente.

Como o presente trabalho é referente a análise numérica de elementos em concreto têxtil, os valores dos parâmetros citados podem ser modificados de acordo o tipo de reforço utilizado na análise. Segundo Stramandinoli e Rovere (2008), o efeito do *Tension Stiffening* no concreto armado ocorre até próximo ao escoamento da armadura longitudinal. Assim, transferindo esta mesma ideia para o concreto têxtil, têm-se que o limite do *Tension Stiffening* para elementos em TRC deve ser aumentado. A fim de calibrar apenas um parâmetro, este estudo utilizou o valor de 0,6 para α , enquanto que, para cada tipo de malha têxtil, foi realizada uma calibração do valor de ε_{ctu} . Destaca-se que, como já citado por Martinelli (2003), os valores dos parâmetros adotados estão intrinsecamente ligados à aderência reforço-concreto.

Após o momento da fissuração, ocorre um processo de redistribuição de tensões, o que pode gerar um eventual fechamento total ou parcial de algum ponto de integração previamente fissurado. Desta maneira, se a deformação específica atual “ ε ” é pequena comparada à deformação de tração máxima “ σ_{ref} ”, a tensão normal à fissura “ σ ”, é calculada pela Equação (75):

$$\sigma = \frac{\sigma_{ref}}{\varepsilon_{ref}} \varepsilon \quad (75)$$

Onde:

σ_{ref} : tensão interpolada correspondente à deformação ε_{ref} .

A trajetória desta “descarga” decorrente do fechamento da fissura pode ser visualizada na Figura 3.6. A reabertura da fissura segue a mesma trajetória até “ ε_{ref} ” ser excedida, quando se adota a trajetória descendente definida pela Equação (74).

3.2.1.2.3 Modelo para transferência das tensões de corte

Por fim, destaca-se o modelo de transferência das tensões de corte (*shear transfer*) adotadas por Lazzari (2016). Conforme Hinton (1988), a transmissão das tensões de corte nas fissuras é uma consequência do engrenamento dos agregados e do efeito pino da armadura. Considerando que esses comportamentos possuem diversas variáveis a serem consideradas, como o tamanho e tipo dos agregados, diâmetro e posição relativa das barras de armadura e largura das fissuras, Hinton (1988) sugere um modelo simplificado, onde se adota um valor reduzido para o módulo

de elasticidade transversal do concreto. A determinação do módulo de elasticidade transversal reduzido é apresentada a seguir, conforme Lazzari (2016):

$$\beta = 1 - \left(\frac{\varepsilon_T}{0,005} \right)^{0,3} \quad (76)$$

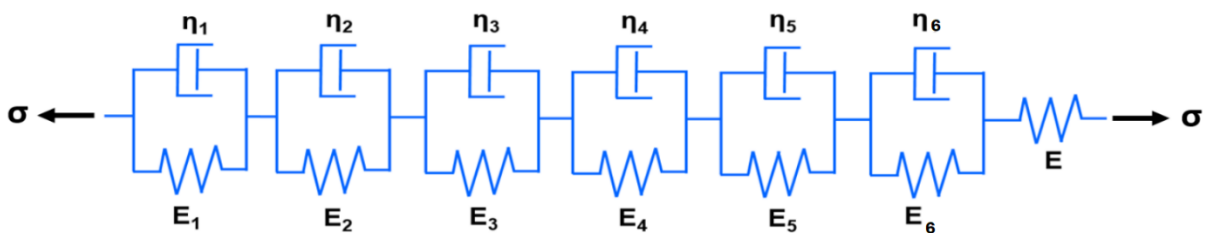
$$G_C = \beta \cdot G_0 \quad (77)$$

3.2.2 Comportamento Diferido

O comportamento diferido implementado à USERMAT, por Schmitz (2017), basea-se em dois aspectos: fluência e retração. O primeiro efeito refere-se ao incremento contínuo de deformação, para uma tensão constante, em peças solicitadas a cargas de longa duração. O outro fenômeno é responsável pela redução de volume do material, por meio da perda de água, na ausência de uma carga externa.

A implementação do comportamento diferido no código é baseada no modelo reológico composto por molas e amortecedores representando, respectivamente, o comportamento elástico e viscoso. Há diversos modos de associação dos elementos citados. Schmitz (2017) utiliza, em seu código, o modelo de Kelvin Generalizado com seis unidades Kelvin como apresentado na Figura 3.7.

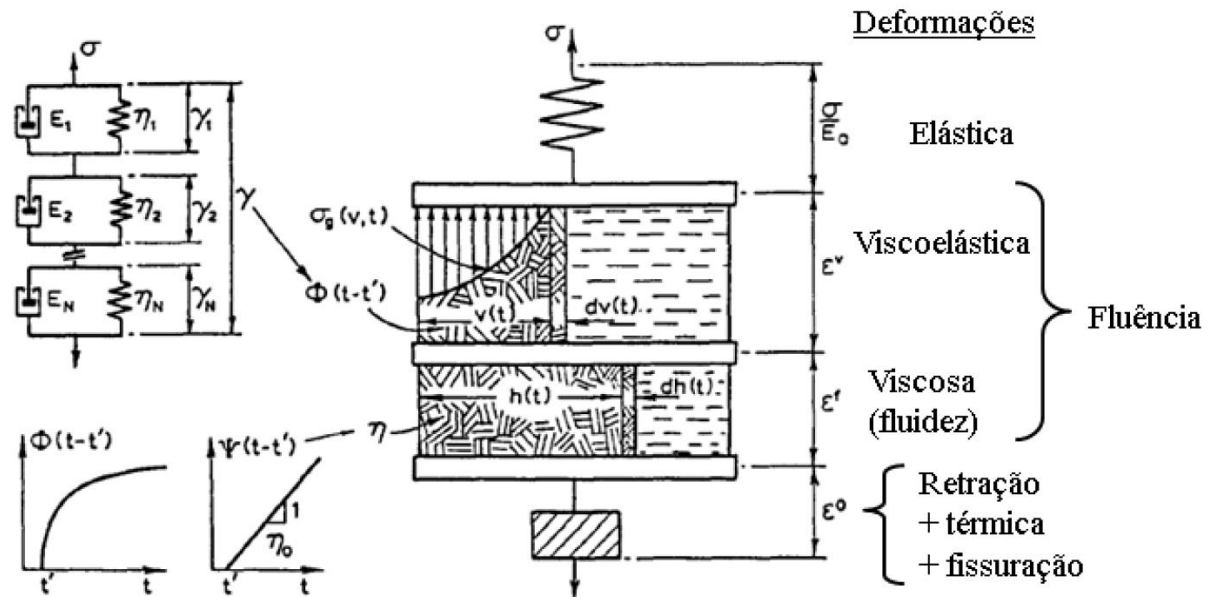
Figura 3.7 – Modelo de Kelvin Generalizado com seis unidades Kelvin



(Fonte: adaptado de LAZZARI, 2016)

Segundo Bazant e Prasannan (1988), a deformação total no concreto resulta da soma das parcelas elástica, viscoelástica, viscosa e devido à retração, como ilustrado na Figura 3.8. Destaca-se que, no código da USERMAT, Schmitz (2017) não considera altas tensões para o concreto em fluência, de forma que as parcelas viscoelásticas e viscosas são consideradas juntas na lei de fluência.

Figura 3.8 – Representação das deformações do concreto



(Fonte: BAZANT; PRASANNAN, 1988)

Assim, a deformação total do concreto é dada pela equação (78), onde: $E(t')$ é o módulo de elasticidade da mola isolada para idade do concreto t' ; $\epsilon_c(t, t')$ é a deformação devido a fluência; $\epsilon_o(t)$ é a deformação devido à retração.

$$\epsilon(t, t') = \frac{\sigma}{E(t')} + \epsilon_c(t, t') + \epsilon_o(t) \quad (78)$$

O comportamento diferido proposto por Schmitz (2017), dentro da USERMAT, considera a fluência e retração na análise do comportamento viscoelástico, de maneira que, durante o processo numérico, as parcelas de incremento de deformação devido a fluência e retração são somadas. Para maiores informações sobre o processo de consideração do modelo viscoelástico na USERMAT como: formulação, solução numérica adotada e o processo de parametrização, recomenda-se a leitura de Schmitz (2017).

3.2.2.1 Modelo para fluência: *CEB-FIP Model Code 2010*

Diante das diversas formulações de previsão de deformação por fluência encontradas na literatura, Quevedo (2017) afirma que o modelo proposto pelo *CEB-FIP Model Code 1990* (1993) apresenta maior compatibilidade com a teoria de solidificação, já que o modelo em questão, diferentemente do proposto pelo *CEB-FIP Model Code 2010* (2012), separa o fator do coeficiente de fluência que depende do envelhecimento (idade do concreto) do fator de fluência

que depende do tempo de aplicação da carga (idade da carga). Entretanto, segundo Schmitz (2017), para casos onde há apenas um carregamento à longo prazo, como o peso próprio, o modelo *CEB-FIP Model Code 2010* (2012) apresenta perfeita correlação ao experimental.

Diante do exposto, e sabendo que o modelo de fluência do *CEB-FIP Model Code 1990* se aplica apenas para concretos com f_{ck} de até 80 MPa, este trabalho optou por utilizar o modelo proposto pelo *CEB-FIP Model Code 2010* (2012), uma vez que o mesmo pode ser aplicado para concretos de até 130 MPa e as peças numericamente analisadas neste trabalho foram submetidas a apenas uma carga de longa duração, o peso próprio. Assim, a consideração da fluência, através do modelo de Kelvin aplicado à USERMAT, ocorre por meio da combinação entre a teoria da solidificação, formulada por Bazant e Prasannan (1988) e indicada na Equação (79), e o modelo de fluência proposto conforme o *CEB-FIP Model Code 2010* (2012).

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + \frac{\gamma(t, t')}{V(t)} \quad (79)$$

Onde:

$J(t, t')$: função de fluência considerando o envelhecimento;

$\gamma(t, t')$: função de fluência sem envelhecimento;

$V(t)$: função de envelhecimento devido a variação do volume do concreto.

A teoria da solidificação relata que o efeito do envelhecimento, ligado à fluência do concreto, decorre da alteração do volume de compósito solidificado ao longo do tempo. Assim, a expressão para a função de fluência, já aproximada de acordo com modelo proposto pelo *CEB-FIP Model Code 2010* (2012), é apresentada na equação (80). Segundo Schmitz (2017), a aplicabilidade deste modelo limita-se a concretos com resistência característica à compressão entre 20 e 130 MPa, expostos a umidade relativa do ar entre 40 e 100% e submetidos a tensões de até 40% da resistência média a compressão.

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_{ci}} \quad (80)$$

Com:

$$\phi(t, t') = \phi_{bc}(t, t') + \phi_{dc}(t, t') \quad (81)$$

Onde:

t' : idade do concreto no momento da aplicação da carga;

t : idade atual do concreto;

$\phi(t, t')$: coeficiente de fluência;

E_{ci} : módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias;

$\phi_{bc}(t, t')$: coeficiente de fluência básico;

$\phi_{dc}(t, t')$: coeficiente de fluência por secagem.

De modo que os coeficientes de fluência básico e por secagem são calculados a partir das expressões (82) e (84), respectivamente.

$$\phi_{bc}(t, t') = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t') \quad (82)$$

$$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1,8}{f_{cm28}^{0,7}}; \quad \beta_{bc}(t, t') = \ln \left[\left(\frac{30}{t'_{aj}} + 0,035 \right)^2 + (t - t') + 1 \right]; \quad (83)$$

$$\phi_{dc}(t, t') = \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t') \cdot \beta_{dc}(t, t') \quad (84)$$

$$\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{412}{f_{cm28}^{1,4}}; \quad \beta(RH) = \frac{1 - \frac{RH}{100}}{\sqrt[3]{0,1 \cdot \frac{h}{100}}}; \quad \beta_{dc}(t') = \frac{1}{0,1 + t'_{aj}^{0,2}} \quad (85)$$

Onde:

f_{cm28} : resistência média à compressão uniaxial do concreto aos 28 dias, neste caso em MPa;

t'_{aj} : idade do concreto no momento da aplicação da carga ajustada devido ao efeito da temperatura e tipo de cimento;

RH : umidade do ambiente (%);

O quarto coeficiente “ $\beta_{dc}(t, t')$ ”, relacionado ao tempo de duração da carga, é calculado a partir da expressão (86).

$$\beta_{ac}(t, t') = \left[\frac{(t - t')}{\beta_h + (t - t')} \right]^{\gamma(t')} \quad (86)$$

$$\gamma(t') = \frac{1}{2,3 + \frac{3,5}{\sqrt{t'_{aj}}}}; \quad \beta_h = 1,5 \cdot h + 250 \cdot \alpha_{f_{cm}} \leq 1500 \cdot \alpha_{f_{cm}}; \quad \alpha_{f_{cm}} = \left(\frac{35}{f_{cm28}} \right)^{0,5} \quad (87)$$

Onde:

h : espessura fictícia da peça de concreto (mm), dada pela área da seção transversal dividido pelo perímetro da seção que está exposto à atmosfera.

Os ajustes da idade do concreto em decorrência do efeito de temperatura e do tempo de endurecimento do cimento são, respectivamente, calculados conforme as expressões (88) e (89).

$$t'_T = \sum_{i=1}^N \Delta t_i \cdot \left(13,65 - \frac{4000}{273 + \frac{T_i(\Delta t_i)}{T_0}} \right) \quad (88)$$

$$t'_{aj} = t'_T \left[1 + \frac{9}{2 + \left(\frac{t'_T}{t'_{1,T}} \right)^{1,2}} \right]^{\alpha} \quad (89)$$

Onde:

t'_T : idade do concreto quando foi aplicada a carga ajustada devido ao efeito temperatura;

$t'_{1,T}$: 1 dia;

Δt_i : número de dias em que a temperatura se manteve igual a T_i ;

$T_i(\Delta t_i)$: temperatura, em °C;

T_0 : 1°C;

α : fator relacionado com o tipo de cimento, sendo: -1 para endurecimento lento; 0 para endurecimento normal à rápido; 1 para endurecimento rápido e cimento de alta resistência.

Para temperaturas diferentes de 20°C, o fator β_h é corrigido ao multiplicá-lo pelo parâmetro β_T calculado na expressão (90) conforme o *CEB-FIP Model Code 2010* (2012).

$$\beta_T = \exp \left[\frac{1500}{273 + \frac{T}{T_0}} - 5,12 \right] \quad (90)$$

Onde:

β_T : coeficiente que considera o efeito de temperaturas diferentes de 20°C em β_h .

Além do ajuste do fator β_h , os coeficientes de fluência básico e por secagem também devem ser corrigidos de acordo com a temperatura a partir do fator ϕ_T , conforme as expressões em (91).

$$\phi_{bc,T} = \phi_{bc} \cdot \phi_T; \quad \phi_{dc,T} = \phi_{dc} \cdot \phi_T^{1,2}; \quad (91)$$

Sendo:

$$\phi_T = \exp \left[0,015 \cdot \left(\frac{T}{T_0} - 20 \right) \right] \quad (92)$$

O cálculo do módulo de elasticidade do concreto “ $E(t)$ ”, considerando seu envelhecimento e o ajuste decorrente da temperatura, é realizado a partir da equação (93), conforme indica o *CEB-FIP Model Code 2010* (2012).

$$E(t) = E(t') \cdot \left(1,06 - 0,003 \cdot \frac{T}{T_0} \right) \quad (93)$$

$$E(t') = \beta_E(t) \cdot E_{ci} \quad (94)$$

$$\beta_E(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)}; \quad \beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t'_{aj}/t_1} \right)^{0,5} \right] \right\} \quad (95)$$

Onde:

$E(t)$: módulo de elasticidade da mola isolada para idade do concreto t' com ajuste da temperatura;

$E(t')$: módulo de elasticidade da mola isolada para idade do concreto t' sem ajuste da temperatura;

$\beta_E(t)$: fator de correção dependente da idade do concreto;

$\beta_{cc}(t)$: fator de correção dependente da idade do concreto;

s: fator dependente do tipo de cimento: 0,38 para endurecimento lento; 0,25 para endurecimento normal a rápido; 0,20 para endurecimento rápido e cimento de alta resistência;

t_1 : 1 dia.

3.2.2.2 Modelo para retração: *CEB-FIP Model Code 1990*

A introdução do efeito de retração no modelo ocorre através da adição do incremento de deformação por retração à deformação viscoelástica, a qual já é contemplada pela deformação por fluência. Assim, a deformação por retração é calculada a partir da Equação (96), conforme o *CEB-FIP Model Code 1990* (1993). A escolha pelo modelo de retração indicado decorre do fato do mesmo já ter sido implementado e validado por Schmitz (2017) e Quevedo (2017).

$$\varepsilon_{cs}(t, t') = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t, t_s) \quad (96)$$

Onde:

$\varepsilon_{cs}(t, t')$: deformação do concreto por retração;

ε_{cs0} : coeficiente de retração básica, obtido através da equação (97) ;

$\beta_s(t, t_s)$: coeficiente de retração devido ao tempo que o concreto está sofrendo retração, calculado por meio da equação (100);

t_s : idade do concreto no início da retração quando se finaliza o período de cura úmida do concreto;

t : idade do concreto.

O coeficiente de retração básica ε_{cs0} , que independe do tempo de cura úmida, é calculado pela expressão (97).

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \quad (97)$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[160 + 10 \cdot \beta_{sc} \left(9 - \frac{f_{cm28}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6}; \quad (98)$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1,55 \cdot \beta_{SRH}, & \text{para } 40\% \leq RH \leq 99\% \\ 0,25 & \text{para } RH > 99\% \end{cases}; \quad \beta_{SRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \quad (99)$$

Onde:

$\varepsilon_s(f_{cm})$: fator ligado à resistência média à compressão do concreto;

β_{sc} : fator dependente do tipo de cimento, 4 para endurecimento lento, 5 para endurecimento normal a rápido e 8 para endurecimento rápido e cimento de alta resistência;

f_{cm0} : 1 MPa;

β_{RH} : fator relacionado com a umidade do ambiente;

β_{SRH} : fator relacionado com a umidade do ambiente, considerado para cálculo de β_{RH} ;

RH_0 : umidade considerada como 100%.

Já o coeficiente de retração dependente do tempo de cura do concreto pode ser obtido através da equação (100), de acordo com o *CEB-FIP Model Code 1990* (1993).

$$\beta_s(t, t_s) = \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{\alpha_{ST}(T) + (t - t_s)/t_1} \right]^{0,5} \quad (100)$$

$$\alpha_{ST}(T) = 350 \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^2 \cdot \exp \left[-0,06 \cdot \left(\frac{T}{T_0} - 20 \right) \right] \quad (101)$$

Onde:

t_1 : 1 dia;

h_0 : 100 mm;

T_0 : 1°C;

T : temperatura em °C.

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL NO ANSYS

A utilização do método dos elementos finitos (MEF) para análise de estruturas é, provavelmente, o recurso mais indicado nos dias atuais. Este método consiste na discretização em forma de malha do meio contínuo por um número determinado de elementos finitos conectados através de nós e caracterizados a partir de funções de interpolação. Durante o processo de solução por meio do MEF, os deslocamentos nodais são obtidos por meio da integração da matriz de rigidez dos elementos. Em seguida, as tensões e deformações no interior dos elementos são calculadas (SORIANO E LIMA, 1998).

Para que o processo de integração seja realizado, deve-se definir a posição e quantidade de pontos de integração (Pontos de Gauss) em cada elemento. À medida que se incrementam novos pontos de Gauss aos elementos finitos, a precisão da resposta e seu esforço computacional aumentam significativamente. Além das vantagens já citadas, Soriano e Lima (1998) afirmam que este tipo de análise permite a consideração do comportamento não linear dos materiais, através do processo de plastificação e fissuração do concreto.

Diante da necessidade de utilização de programas computacionais para análise estrutural através do Método de Elementos Finitos, o *software* ANSYS (*Analysis System Incorporated*) aparece como alternativa de destaque, em decorrência dos excelentes resultados obtidos através da linha de pesquisa sobre o ANSYS do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

O ANSYS, na versão 17.2, contém duas interfaces básicas de trabalho: o sistema APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) e o sistema *WORKBENCH*. Enquanto o segundo apresenta interface mais simples, amigável e de fácil manuseio, o sistema APDL destaca-se por apresentar uma interface que, apesar de ser menos intuitiva, fornece ao usuário maior controle sobre a simulação numérica. Diante das características apresentadas, deve-se destacar que a utilização do sistema APDL, em detrimento ao *WORKBENCH*, tornou-se mais aceita na comunidade acadêmica e, por isto, será utilizado neste estudo.

O ANSYS APDL fornece ao usuário a possibilidade da modelagem através de duas entradas de dados. A primeira é através da introdução de informação via interface gráfica, enquanto a segunda permite a entrada de dados via leitura de arquivo em formato texto (arquivos com extensão .txt). O arquivo é escrito em forma de comandos que fornecem as propriedades

mecânicas e geométricas, carregamentos, condições de contorno e métodos de análise estrutural do problema a ser analisado.

O ANSYS dispõe de múltiplas opções para definição dos tipos de elementos finitos e modelos constitutivos a serem utilizados. Além das alternativas oferecidas pelo programa, o ANSYS fornece ao usuário a possibilidade da criação de novos elementos e modelos constitutivos a partir da customização de rotinas em linguagem FORTRAN ligadas ao código do *software*. A modificação das rotinas e sua consequente implementação no código é feita a partir da ferramenta de customização UPF (*User Programmable Features*). Lazzari (2016) informa que, após a modificação dos códigos ligados ao *software*, deve-se realizar um processo de compilação, a fim de ligar a nova sub-rotina USERMAT ao ANSYS. Após a compilação, deve-se verificar a criação de uma nova *Dynamic-Link Library* (DLL).

Este trabalho utilizará a sub-rotina USERMAT implantada por Lazzari (2016) e aperfeiçoada por Schmitz (2017). O código implementado controla a relação tensão-deformação do modelo constitutivo do material, estando este em regime viscoelástico, elástico ou plástico. Esta ferramenta torna-se de particular interesse em decorrência da possível implementação de modelos constitutivos mais apropriados a determinados materiais, a exemplo do modelo de fissuração e plastificação para o concreto baseado no critério de ruptura de Ottosen (1977).

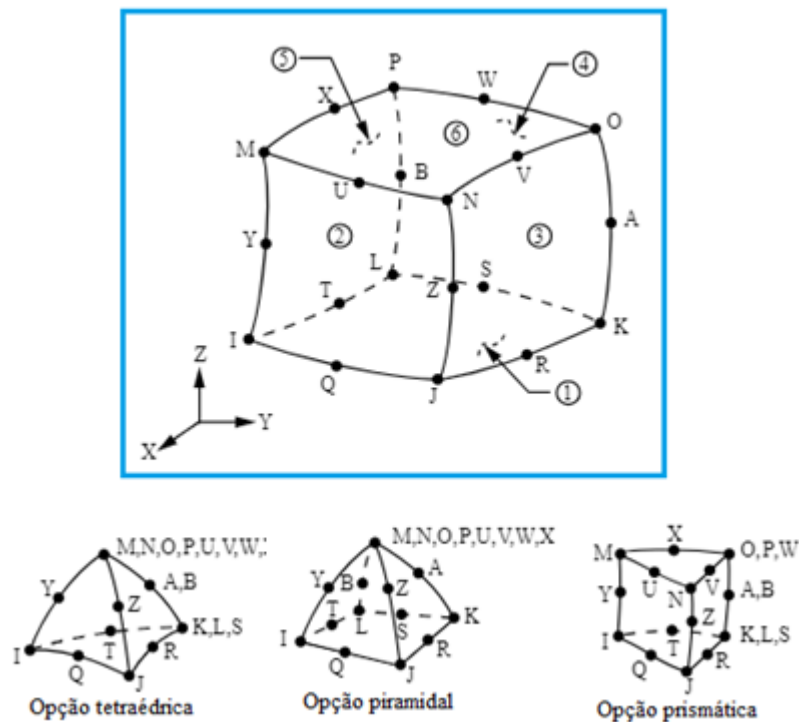
4.1 ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

O *software* ANSYS oferece um elevado número de elementos finitos a serem selecionados para a modelagem numérica. Neste tópico serão apresentados os elementos e suas características adotadas durante a modelagem. A escolha dos elementos SOLID186 e SHELL281 para representação do concreto e da malha têxtil, respectivamente, foi baseada em aspectos como: esforço computacional; número de graus de liberdade; número de pontos de integração disponíveis; comportamento esperado dos materiais; compatibilização entre os elementos finitos empregados; compatibilização entre os elementos finitos e seus respectivos modelos constitutivos. Nos itens 4.1.1 e 4.1.2 são apresentadas as características de cada elemento finito utilizado. Maiores detalhes sobre os mesmos podem ser obtidos na biblioteca do ANSYS versão 17.2 (2016).

4.1.1 SOLID186

O elemento SOLID186, utilizado por Lazzari (2016) com o objetivo de representar o concreto, caracteriza-se por ser um elemento tridimensional, quadrático e possuir vinte nós conforme indicado na Figura 4.1. Para cada nó são disponibilizados três graus de liberdade (translação em X, Y e Z).

Figura 4.1 – Elemento SOLID186



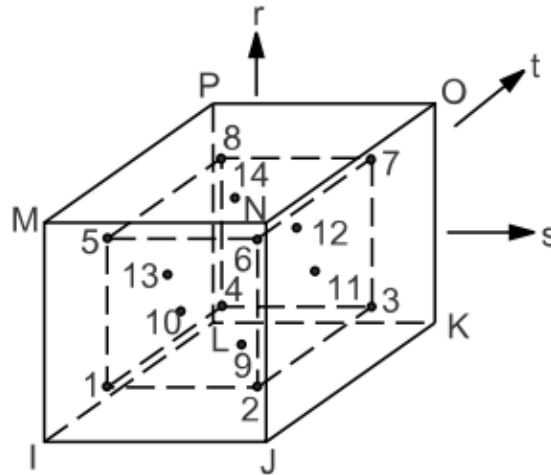
(Fonte: ANSYS, 2016)

Ainda que o SOLID186 apresente, em geral, configuração hexaédrica, podem ser obtidas diferentes geometrias (tetraédrica, piramidal e prismática), quando torna-se necessário uma adaptação da malha ao modelo para casos específicos. Para modelagem de estruturas mais espessas, o *Help* do ANSYS (2016) recomenda a utilização do elemento SOLID186 em camadas (*layered structural solid*). Entretanto, como não é o caso deste estudo, que realizará análise de peças esbeltas em TRC, escolheu-se a configuração homogênea do elemento (*homogeneous structural solid*).

Além destes aspectos, destaca-se a capacidade de serem atribuídos, ao elemento finito citado, modelos constitutivos elásticos, plásticos, hiperelásticos, com fluência e com grandes deformações. Para casos de utilização do SOLID186 com geometria tridimensional hexaédrica,

são fornecidos 14 pontos de integração conforme ilustrado na Figura 4.2, o que permite a utilização dos modos de integração completa e reduzida.

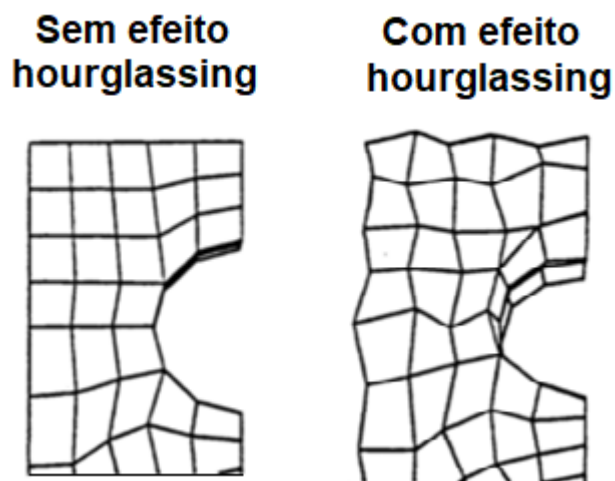
Figura 4.2 – Pontos de integração do elemento SOLID186



(Fonte: ANSYS, 2016)

Como neste presente trabalho foi adotada a integração reduzida, o *Help* do ANSYS (2016) recomenda o emprego de um mínimo de dois elementos finitos em cada direção, de maneira a se evitar o efeito *hourglassing* (Figura 4.3). Segundo o ANSYS (2016), o efeito *hourglassing* gera falsas deformações irregulares, o que pode provocar a invalidação dos resultados e da modelagem.

Figura 4.3 – Efeito *hourglassing*



(Fonte: adaptado do ANSYS, 2016)

A Figura 4.4 apresenta o arquivo texto, no programa *Notepad++*, utilizado para lançamento das características adotadas para o elemento SOLID186.

Figura 4.4 – Características adotadas para o elemento SOLID186

```

!-----
! 3.1 - CONCRETO - SOLID186 - elemento tipo 1
!-----
!
ET,1,SOLID186      !Especifica o elemento solid186
!
KEYOPT,1,2,0      !Integracao reduzida
KEYOPT,1,3,0      !Elemento solido homogeneo (nao possui "layers")
KEYOPT,1,6,0      !Fomulacao padrao para deslocamentos
KEYOPT,1,8,0      !Opcao para transporte de massa desativado
KEYOPT,1,10,0

```

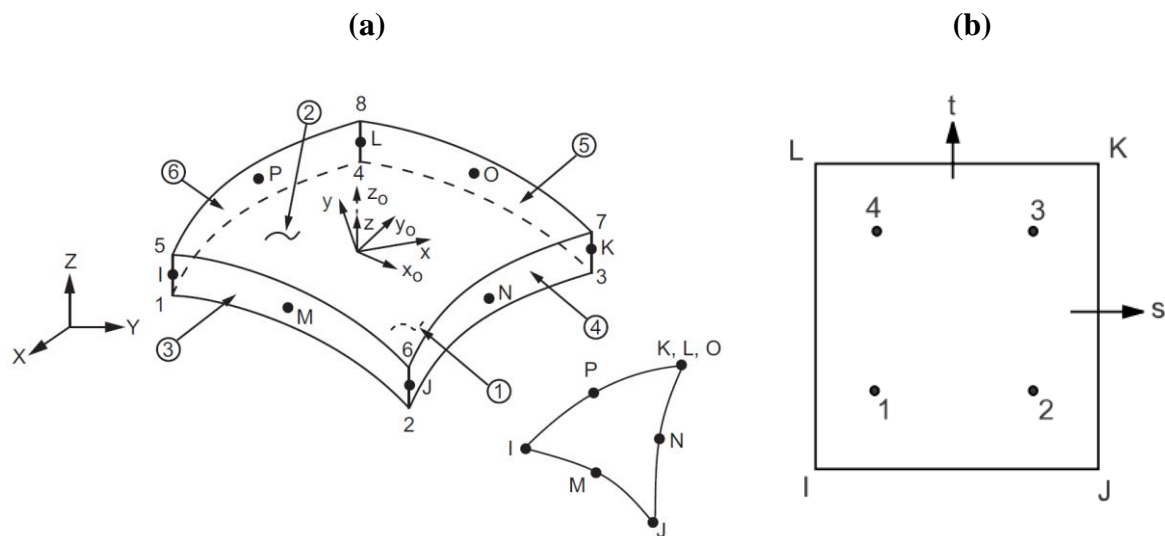
(Fonte: elaborada pelo autor, 2019)

4.1.2 SHELL281

A escolha do elemento finito de casca SHELL281 para representação da malha têxtil é decorrente da possibilidade da sua segmentação em camadas, da facilidade de sua modelagem e da capacidade de análise linear, não linear e em grandes deformações. A esse elemento podem ser atribuídos diversos modelos constitutivos como: elástico; plástico; com fluência; hiperelástico. O elemento SHELL281, ilustrado na Figura 4.5a, destaca-se por apresentar funções de interpolação quadráticas, oito nós, quatro pontos de integração em seu plano (Figura 4.5b) e graus de liberdade por nó dependente da rigidez da placa. Quando se considera a rigidez de membrana e a flexão, cada nó apresenta seis graus de liberdade (três translações: UX, UY, UZ; três rotações: ROTX, ROTY, ROTZ). Em caso de consideração unicamente da rigidez de membrana, os graus de liberdade restringem-se aos de translação em X, Y e Z, como é o caso aplicado a este trabalho. A escolha por esta característica decorre da pequena espessura atribuída ao SHELL281, para representação da malha têxtil, e da ausência de resistência à flexão e ao corte da malha.

A representação da malha têxtil (fios têxteis entrelaçados e espaçados) como um material contínuo e homogêneo (SHELL281), requer a utilização de uma espessura equivalente para o SHELL281, de maneira que a área transversal modelada coincida a verificada experimentalmente.

Figura 4.5 – Elemento SHELL281: (a) configuração geométrica; (b) pontos de integração no plano



(Fonte: ANSYS, 2016)

O SHELL281 pode ser dividido em até 255 camadas caracterizadas a partir da sua espessura, material, orientação e número de regiões de pontos de integração. O número de regiões de pontos de integração, ao longo da espessura, pode variar entre 1,3,5,7 e 9. O *Help* do ANSYS (2016) recomenda que, ao se utilizar uma única camada em casos de plasticidade, o número mínimo para regiões de pontos de integração ao longo da espessura deve ser cinco. Assim, o presente trabalho irá utilizar, para representação da malha têxtil, uma única camada com cinco regiões de pontos de integração ao longo da altura. Resumidamente, o elemento escolhido possui uma camada com quatro pontos de integração em seu plano e com cinco regiões de pontos de integração, o que totaliza vinte pontos de integração por elemento.

Por fim, Sun (2006) relata que elementos de placas fundamentados pela teoria de Mindlin-Reissner, caso do SHELL281, ao passarem pelo processo de integração completa, ocasionalmente provocam problemas numéricos do tipo *shear locking* e *hourglass effect*. Desse modo, Ayala (2016) sugere a utilização da integração reduzida para análise numérica modelos com SHELL281. A Figura 4.6 fornece os dados de entrada, utilizados neste trabalho, para caracterização do elemento SHELL281.

Figura 4.6 – Características adotadas para o elemento SHELL281

```

! 3.2 - Malha Têxtil - SHELL281 - elemento tipo 2
!-----
ET,2,SHELL281                !seleciona o elemento shell 281
KEYOPT,2,1,1                 !Somente efeito membrana (Apenas Ux, Uz e Uy)
KEYOPT,2,8,2                 !Armazena os resultados para TOP, BOTTOM e MID para todas as camadas
!
SECTYPE,1,SHELL              !Definição das camadas do elemento:numero da seção,elemento de shell
SECDATA,HMT,2,,5            !Espessura,material,,número de pontos de integração
SECOFFSET,MID                !Desloca a posição do nó na seção do elemento.

```

(Fonte: elaborada pelo autor, 2019)

4.2 USERMAT E MODELOS UTILIZADOS

A atribuição dos modelos constitutivos aos elementos finitos, que representam o concreto e a malha têxtil, ocorre, respectivamente, através da USERMAT e da adaptação de um modelo de dano progressivo disponibilizado pelo ANSYS versão 17.2.

4.2.1 USERMAT

A rotina USERMAT é dividida em quatro sub-rotinas que se diferenciam a partir do tipo de análise a ser realizada, como indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Sub-rotinas dentro da USERMAT

Tipo de elemento finito	Componentes totais de deformação	Componentes de deformação normal	Sub-rotina chamada
Unidimensional	1	1	USERMAT1D
Viga tridimensional	3	1	USERMATBM
Tridimensional	3	2	USERMATPS
Estado plano de tensão	4	3	USERMAT3D
Estado plano de deformação	6	3	USERMAT3D

(Fonte: adaptado de AYALA, 2017)

A implementação dos novos modelos constitutivos deve ser feita na sub-rotina correspondente ao elemento finito utilizado. Assim, em casos que se analisam elementos tridimensionais, a customização da USERMAT deve ser feita dentro da sub-rotina USERMAT3D. A introdução dos novos modelos constitutivos a USERMAT3D, por Lazzari (2016) e Schmitz (2017), tem como objetivo levar em consideração, durante a análise, o comportamento não linear físico do concreto. A não-linearidade apresentada pelo concreto é abordada através da utilização dos modelos viscoelástico, para representação do comportamento a fluência e retração, e elastoplástico para compressão e tração, respectivamente.

Para utilização dos modelos constitutivos modificados dentro da USERMAT, deve-se inserir a quantidade de parâmetros a ser utilizado na caracterização do comportamento do material, no caso o concreto, por meio do comando TB, USER. Em seguida, utiliza-se o comando TB,DATA para fornece valores aos respectivos parâmetros. Destaca-se que, em decorrência das unidades adotadas na programação da *USERMAT3D* serem em kN, centímetros e dias, os valores inseridos no ANSYS são utilizados com as respectivas unidades.

As propriedades do material são inseridas na seguinte sequência e mostradas na Figura 4.7:

1. módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias;
2. coeficiente de Poisson;
3. resistência característica à compressão do concreto (f_{ck});
4. tipo de cimento: endurecimento lento é igual a 1; endurecimento normal a rápido adota-se igual a 2; endurecimento rápido e alta resistência adota-se 3;
5. tipo de agregado: 1 para basalto; 2 para granito; 3 para calcário; 4 para arenito;
6. método de análise: tipos de análise e número de análises feitas. Neste trabalho foi adotado o número 21.002, onde o número a direita do ponto representa a quantidade de análises a serem feitas e a esquerda do ponto apresenta-se a ordem, da direita para esquerda, e os tipos de análise. No caso citado, são realizadas duas análises: primeiro é feita uma análise diferida (1) e em seguida realiza-se uma análise instantânea (2);
7. fluência: emprega-se o código 2010 para utilização do modelo o *CEB-FIP Model Code 2010* (2012); a utilização do número 0 faz com que a fluência não seja considerada;
8. retração: emprega-se o código 90 para utilização do modelo o *CEB-FIP Model Code 1990* (1993); a utilização do número 0 faz com que a retração não seja considerada;
9. RH: umidade relativa do ar, em %;

10. h_{fic}: espessura fictícia, em cm;
11. t_s: tempo de duração da cura úmida, em dias;
12. t_{inicial}: idade do concreto no momento de aplicação das cargas, em dias.

Figura 4.7 – Entrada de dados para utilização da USERMAT3D para o concreto

```

! -----
! 4.1 - CONCRETO - USER - Material 1 - VER ENTRADA DE DADOS
! -----
!
Ac=Hf*B                               ! área da seção transversal da laje,cm²
Patm=2.0*Hf+2.0*B                       ! perimetro da laje em contato com a atmosfera,cm
hfic=2.0*Ac/Patm                         ! espessura fictícia, dependente do tamanho da peça,cm
!
!
TB,USER,1,1,12,
TBTEMP,0
TBDATA,,Ec,vc,fck,cimento,agregado,analise
TBDATA,,fluencia,retracao,rh,hfic,ts,tinicial

```

(Fonte: elaborada pelo autor, 2019)

4.2.2 Modelos de dano

A representação via ANSYS, versão 17.2, do modelo constitutivo elasto-frágil da malha têxtil é realizada a partir da adaptação do modelo de dano progressivo disponibilizado pelo programa. Este modelo é composto pelo critério de iniciação de dano (*Damage initiation criteria - DMGE*), pela sua lei de evolução (*Damage evolution law - DMGI*) e pelos limites de resistência do material. Destaca-se que a adaptação do modelo de dano progressivo foi utilizada apenas como simplificação para representação do comportamento frágil da malha têxtil.

O critério de iniciação de dano é responsável pela definição do momento de início de dano à malha têxtil, o que ocorre ao se atingir a tensão ou deformação limite do material. O comando utilizado para aplicação deste critério é o TB,DMGI.

A lei de evolução do dano define o comportamento do material quando danificado. Assim, com o início do dano ao material, a lei de evolução determina como será regida a degradação da malha têxtil. A aplicação do comando TB,DMGE permite a modelagem de perda de rigidez do material em questão, podendo ser reproduzida uma perda total ou parcial.

Neste trabalho, utilizou-se o critério de tensão limite para iniciação do dano, enquanto que a sua evolução foi modelada a partir da perda completa e instantânea da rigidez da malha têxtil.

A entrada de dados, no ANSYS, dos modelos de dano e das propriedades mecânicas da malha é apresentada na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Entrada de dados do comportamento da malha têxtil

```

!-----
! 4.2 - Malha Têxtil - Material 2
!-----
!
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,Efinwarp !Especifica o modulo de elasticidade do material 2
MPDATA,PRXY,2,,Vs !Especifica o coef. de Poisson do material 2
!
TB,DMGI,2,1,4,1, !TB, lab(DMGI - Damage INITIATION criteria), mat(material 2),
!Ntemp (temp. associada), NPTS (numero de informacoes a serem inseridas
!, neste caso sao 4 constantes - Qual modo de ruptura se ser analisada),
!TBOPT (opção)
!
TBDATA,1,2,2,2,2 ! Tpdata,1 (iniciar a partir da primeira constante)
! ,2(Modo de ruptura a partir:1- da deformação maxima;
! 2 - da tensao máxima (usei sempre 2).)
TB,DMGE,2,1,4,1, !TB, lab(DMGE - Damage evolution law), mat(material 2),
!Ntemp (temp. associada),NPTS (numero de informacoes a serem inseridas,
!, neste caso sao 4 constantes - 1 fator redutor de rig. p/ cada tipo de ruptura),
!TBOPT (opção 1),
!
TBDATA,,1,1,1,1 !Um fator redutor de rigidez (valor entre 0-1, onde 1 reduz o máximo)
! para cada tipo de ruptura
!
TB,FCLI,2,1,1,1 !TB, lab(FCLI - strength limit), mat(material 2),Ntemp (temp. associada),
!NPTS (numero de informacoes a serem inseridas,
!, neste caso so 1 já que é apenas a tensao de ruptura em X),
!TBOPT (1- limite definido para stress maximo),
TBDATA,1,TF !Atribuição do valor da tensao de ruptura

```

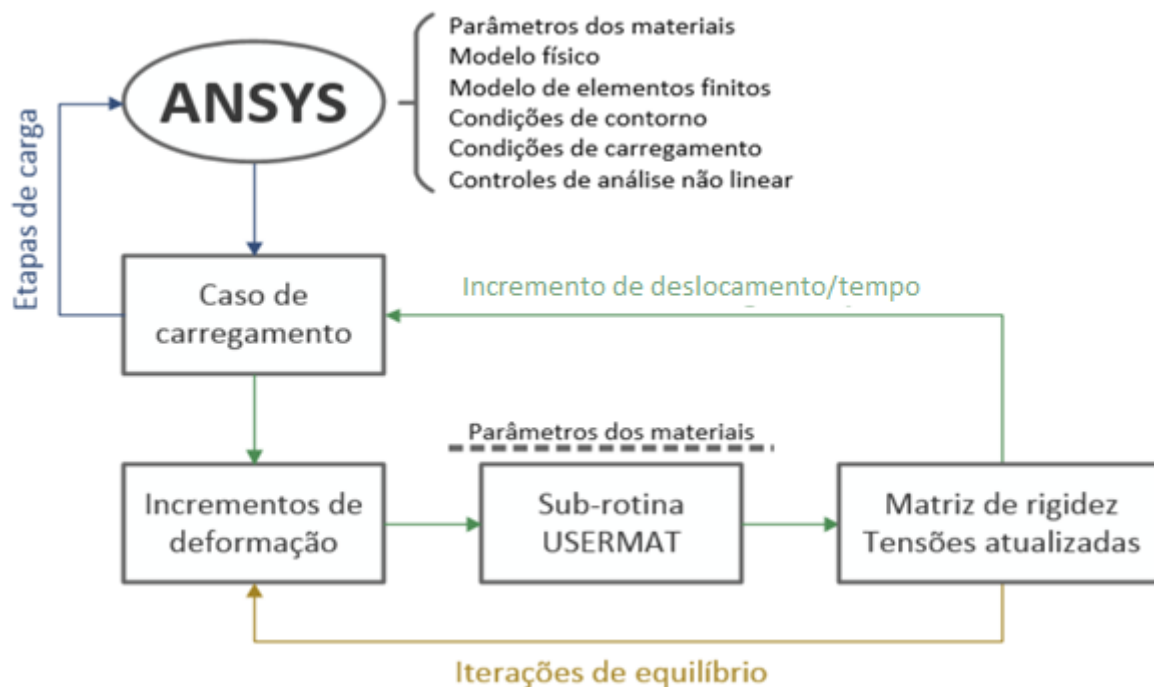
(Fonte: elaborada pelo autor, 2019)

Os comandos TB,FCLI e TBDATA,1,TF têm a função de fornecer, ao modelo DMGI, a tensão limite adotada para o respectivo material. Assim, o comportamento elasto-frágil, apresentado experimentalmente pela malha, é representado numericamente com exatidão.

4.3 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE NÃO LINEAR DO ANSYS

A aplicação do método dos elementos finitos na análise estrutural decorre da solução por método numérico de um sistema de equações não-lineares. Neste aspecto, o ANSYS particiona a solução em três etapas, como visto na Figura 4.9: etapas de carga, incrementos de carga e iterações de equilíbrio.

Figura 4.9 – Esquema de funcionamento do ANSYS



(Fonte: Adaptado de AYALA, 2017)

As etapas de carga (*steps*) são definidas pelo usuário e têm como função segregar, em diferentes etapas, cargas que sejam provenientes de origens distintas. Pode-se exemplificar o trabalho realizado por Lazzari (2016) que, assim como utilizado neste presente estudo, propõe o uso de duas etapas de cargas. A primeira é referente à resposta à fluência e retração da estrutura ao longo do tempo e refere-se, assim, ao comportamento visco-elástico dos materiais. Esta etapa só permite a análise de peças estruturais submetidas a cargas de serviço. A segunda etapa é responsável pela consideração da atuação do carregamento instantâneo e corresponde ao comportamento elastoplástico dos materiais, de maneira que se permite o estudo de peças submetidas a cargas de ruptura.

Dependendo do tipo da etapa a ser analisada, a sub-rotina desenvolvida por Lazzari (2016), por meio dos modelos constitutivos, identifica a correspondência de cada etapa de carga como uma análise elastoplástica ou viscoelástica.

Os incrementos de carga são utilizados para dividir cada etapa de carga (*steps*) em subpassos (*substeps*) mais curtos. Assim, cada etapa de carga tem seu carregamento particionado e aplicado

ao modelo de maneira gradual e sucessiva, promovendo, assim, uma análise geométrica não-linear. A divisão em subpassos pode variar de acordo com a etapa de carga a ser analisada. Lazzari (2016) estabelece os seguintes critérios para divisão das etapas:

- a) análise elastoplástica: Utiliza-se intervalo de tempo total igual a um dia para aplicação da etapa de carga. Assim, o carregamento de curta duração é dividido em um determinado número de subpassos que totalizam um dia;
- b) análise viscoelástica: Não há intervalo de tempo total pré-estabelecido, entretanto os intervalos de cada subpasso são fixos e iguais a um dia.

Para cada incremento de carga, um conjunto de iterações são realizadas para se obter um novo equilíbrio do sistema. Para cada iteração há um incremento de deformação que resulta, por meio da USERMAT, nas atualizações das tensões e matrizes de rigidez. As sub-rotinas que fornecem as tensões e deformações, implementadas à USERMAT, são chamadas em cada ponto de integração do elemento.

A consideração do comportamento não-linear das estruturas durante a análise resulta, assim, em um processo de solução de sistema de equações não-lineares. O *software* ANSYS, para resolução deste problema, emprega o método de Newton-Raphson. Este método consiste em um processo iterativo através da aplicação das seguintes equações (ANSYS, 2016):

$$\{\Delta u\}_i = [K^T]_i^{-1} \cdot (\{F^a\} - \{F^{nr}\}_i) \quad (102)$$

Sendo:

$$\{u\}_{i+1} = \{u\}_i + \{\Delta u\}_i \quad (103)$$

Onde:

$\{\Delta u\}_i$: vetor de incremento de deslocamento nodal na iteração i ;

$\{F^a\}$: vetor de forças externas aplicadas;

$\{F^{nr}\}_i$: vetor de forças internas obtidas para iteração i ;

$(\{F^a\} - \{F^{nr}\}_i)$: vetor de forças residuais obtidas para iteração i ;

$[K^T]_i$: matriz de rigidez tangente para iteração i ;

$\{u\}_{i+1}$: vetor de deslocamento contendo incógnitas para próxima iteração $i + 1$;

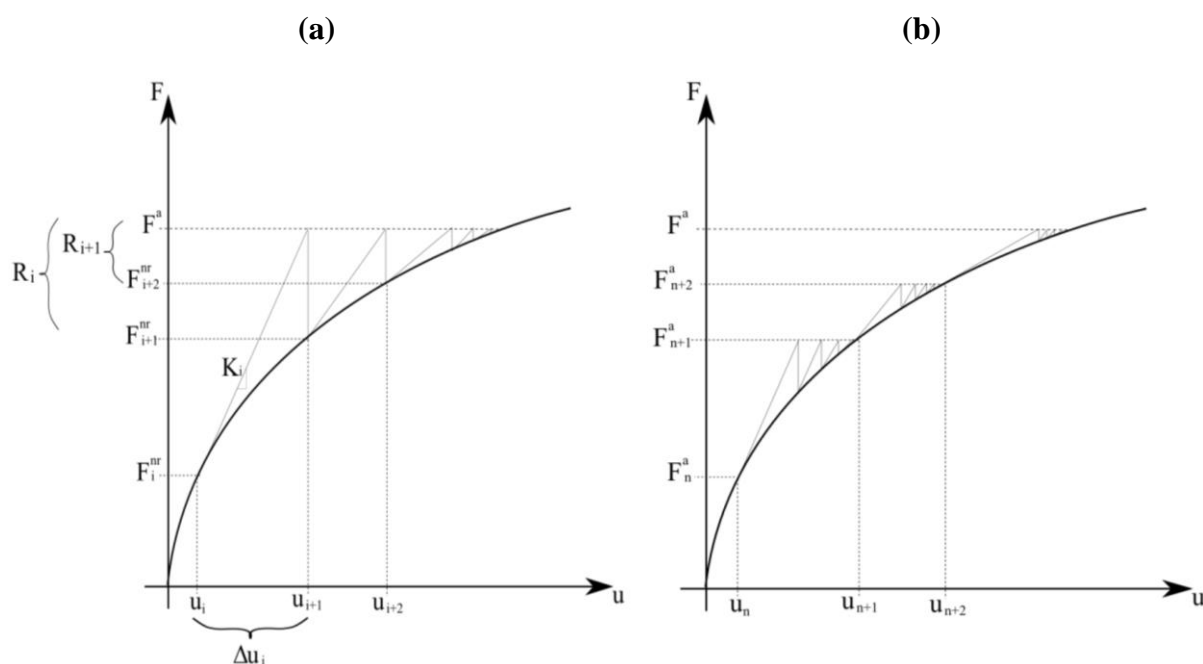
$\{u\}_i$: vetor de deslocamento contendo incógnitas para atual iteração i .

O processo iterativo, ilustrado na Figura 4.10a, é composto pelas seguintes etapas:

- admite-se na primeira iteração que $\{u\}_0 = \{0\}$;
- calcula-se a matriz tangente $[K^T]_i$ e o vetor de forças internas $\{F^{nr}\}_i$ para o deslocamento $\{u\}_i$;
- obtem-se $\{\Delta u\}_i$ a partir da Equação (102);
- adiciona-se o $\{\Delta u\}_i$ ao $\{u\}_i$ para obter o deslocamento $\{u\}_{i+1}$;
- repete-se os passos (2), (3) e (4) até que a convergência seja obtida, quando o resíduo fica inferior à tolerância atribuída.

Sendo feita a divisão da carga aplicada em subpassos (*substeps*), o processo de Newton-Raphson é realizado para cada incremento de carga, conforme apresentado na Figura 4.10b.

Figura 4.10 – Processo Newton Raphson: (a) para primeira iteração; (b) para vários subpassos



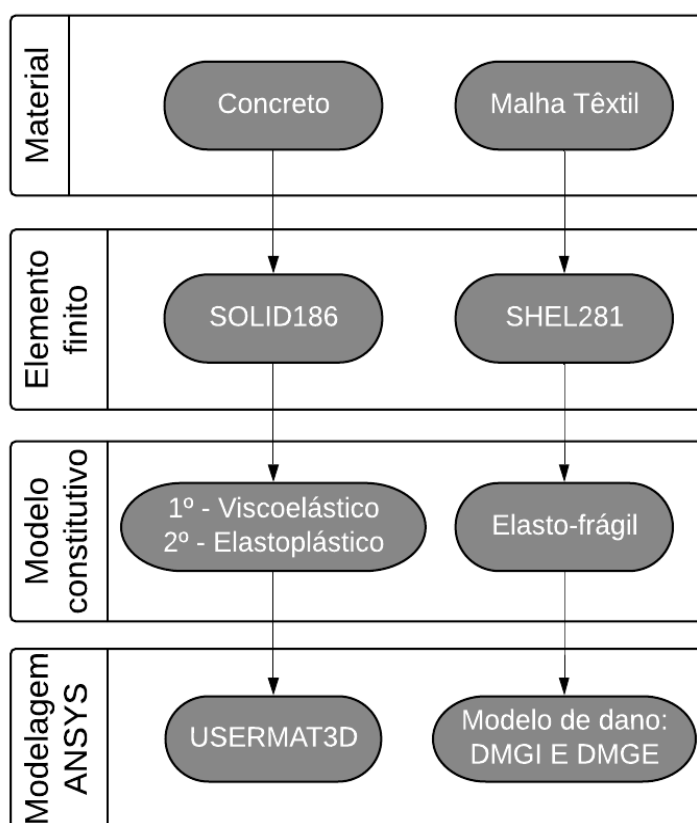
(Fonte: QUEVEDO, 2017)

A entrada de dados via documento em formato texto (extensão *.txt*) no ANSYS permite a escolha do método de Newton-Raphson completo ou modificado, do número de etapas de cargas (*step*), do número mínimo e máximo de subpassos de carga (*substeps*) e do critério de convergência.

4.4 RESUMO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

A atribuição do comportamento e modelo constitutivo adotado para representação de cada material é resumidamente apresentado na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Resumo da modelagem



(Fonte: elaborada pelo autor)

5 ANÁLISE DE NÚMÉRICA DE ELEMENTOS EM TRC

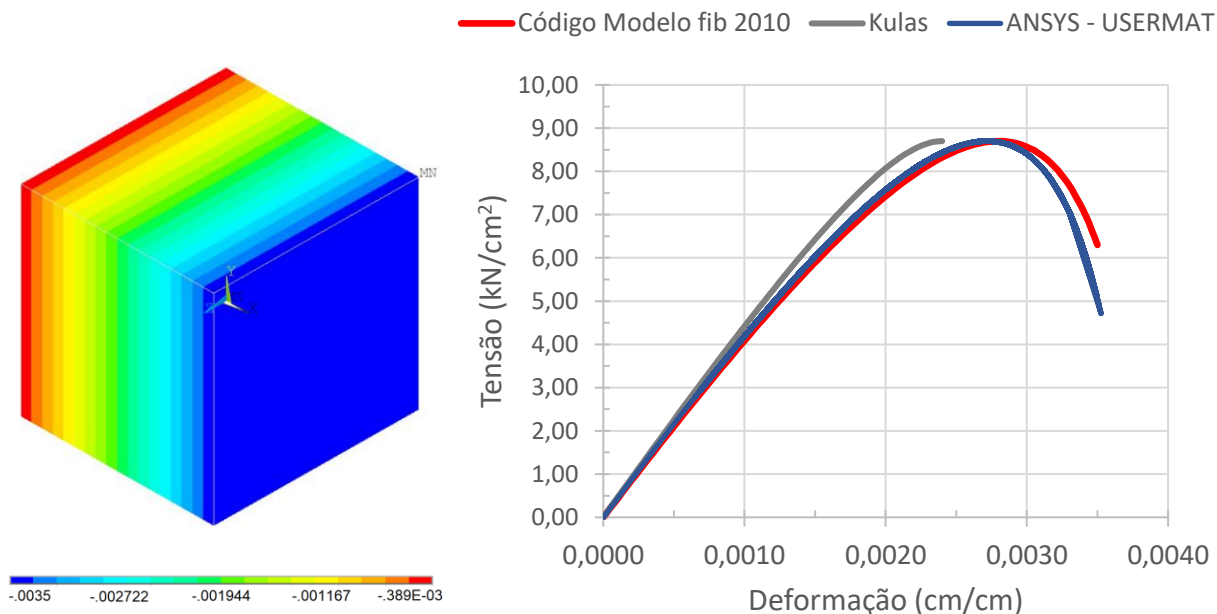
Nesta seção serão apresentadas as análises numéricas realizadas das peças em concreto têxtil experimentadas por Kulas (2013). Para tanto, aborda-se, também, os processos de refinamento da malha de elementos finitos, da escolha do número de *substeps* mínimos e de calibração e validação dos modelos constitutivos adotados.

5.1 VALIDAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS

Primeiro, verificou-se se o modelo proposto é capaz de capturar adequadamente o comportamento do concreto fino de alto desempenho submetido à tração e compressão uniaxial. Para isto, foi modelado, com o SOLID186, um cubo composto exclusivamente por um único elemento finito com 1 cm de lado. O concreto foi caracterizado a partir das propriedades médias obtidas por Kulas (2013) para o concreto “C1” apresentado no Tópico 2.3. A resposta do cubo de concreto ($f_{cm} = 8,7 \text{ kN/cm}^2$ e $E_{cm} = 4542 \text{ kN/cm}^2$) submetido à compressão uniaxial é ilustrada na Figura 5.1. O gráfico tensão *versus* deformação compara os comportamentos obtidos experimentalmente pelo concreto “C1”, numericamente pelo ANSYS e analiticamente conforme o *CEB-FIP Model Code 2010*. Deve-se destacar que, como Kulas (2013) não fornece as propriedades E_{cm} , ϵ_{c1} , ϵ_{cu} do concreto para cada experimento e há uma grande variação entre as resistências características à compressão, este trabalho utilizou os parâmetros fornecidos pelo *CEB-FIP Model Code 2010*, a exceção do módulo de elasticidade (E_{cm}), o qual foi retirado do trabalho do Kulas (2013).

Apesar de não ser inserido, na USERMAT, um valor limite de deformação a partir do qual o concreto não apresenta mais resistência, o código em questão gera um arquivo texto (extensão *.txt*), chamado “verificação geral”, que informa o momento do esmagamento do concreto ao se atingir a deformação de compressão última (ϵ_{cu}) estabelecida pelo *CEB-FIP Model Code 2010*, conforme indicado na Figura 5.2.

Figura 5.1 – Comportamento do concreto sob compressão uniaxial



(Fonte: elaborada pelo autor)

Figura 5.2 – exemplo para concreto esmagado

```

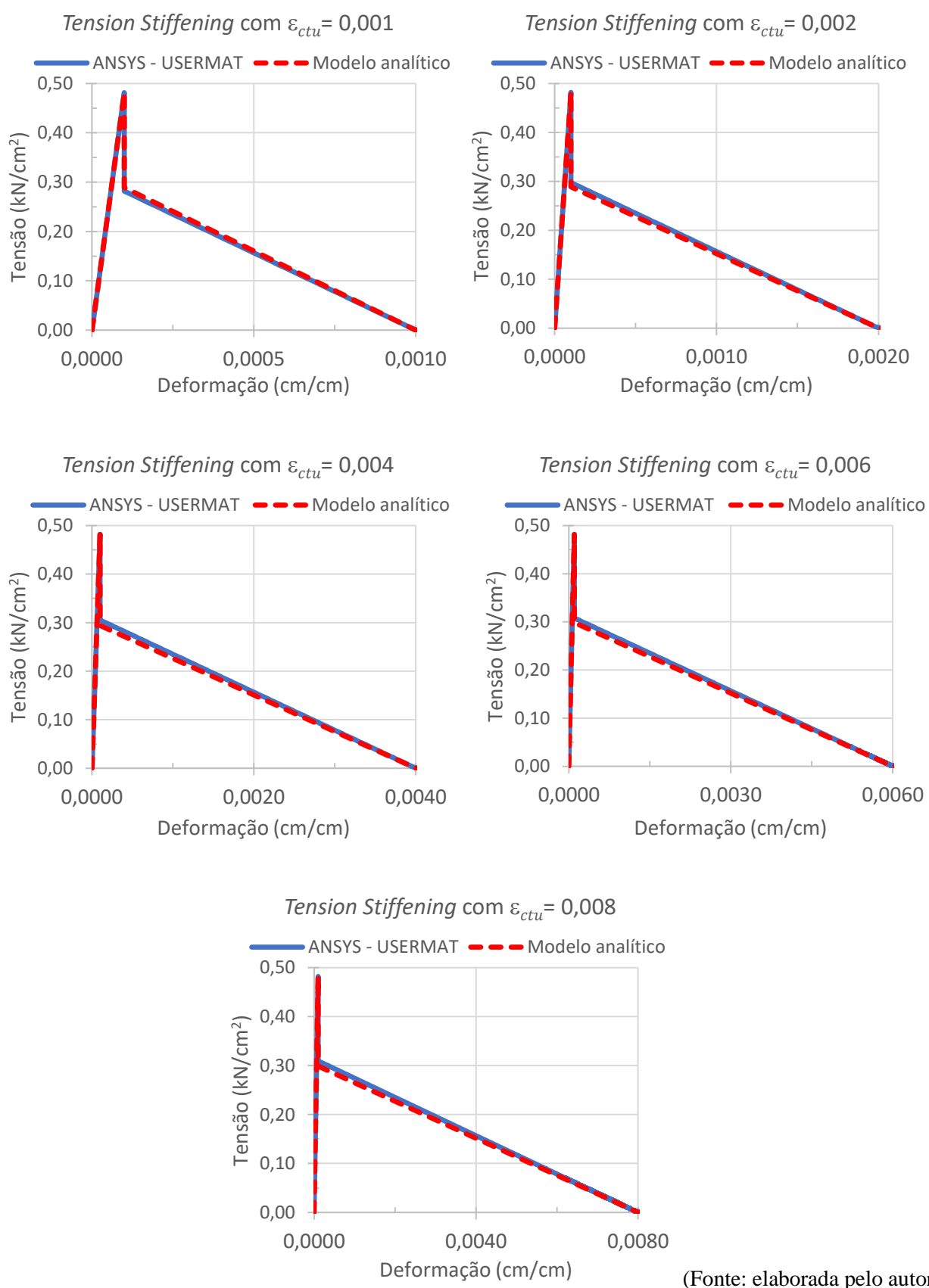
-----ANÁLISE INSTANTÂNEA-----
CONCRETO ESMAGADO
i subst      5229
IELEM/IGAUS      2014      8
Etotal,PREYS  3.005250008518486E-003  9.31274901921383

```

(Fonte: elaborada pelo autor)



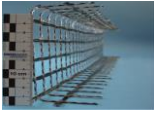

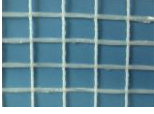
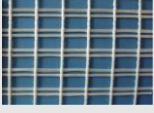

Em seguida, para verificação do cubo de concreto submetido à tração uniaxial, foram realizadas modelagens para os diferentes *Tension Stiffening* testados. Como apresentado no Tópico 3.2.1.2.2, a calibração do *Tension Stiffening* foi realizada variando o parâmetro ϵ_{ctu} (valores adotados: 0,001; 0,002; 0,004; 0,006; 0,008) presente na equação (74). Assim, as curvas tensão *versus* deformação apresentadas na Figura 5.3 comparam, para cada *Tension Stiffening*, os respectivos comportamentos numérico e analítico do concreto têxtil sob tração uniaxial.

Figura 5.3 – Comportamento do concreto para diferentes *Tension Stiffening*



Posteriormente à validação do comportamento sob tração e compressão uniaxial adotado para o concreto “C1”, analisou-se a modelagem da malha têxtil utilizando o elemento finito SHELL281 com comportamento elasto-frágil. As malhas abordadas neste estudo são apresentadas, na Tabela 5.1, a partir de suas propriedades mecânicas, tipo de fibra, material impregnativo e técnica utilizada na formação da malha. Todas as propriedades utilizadas durante a modelagem numérica foram retiradas da tabela citada.

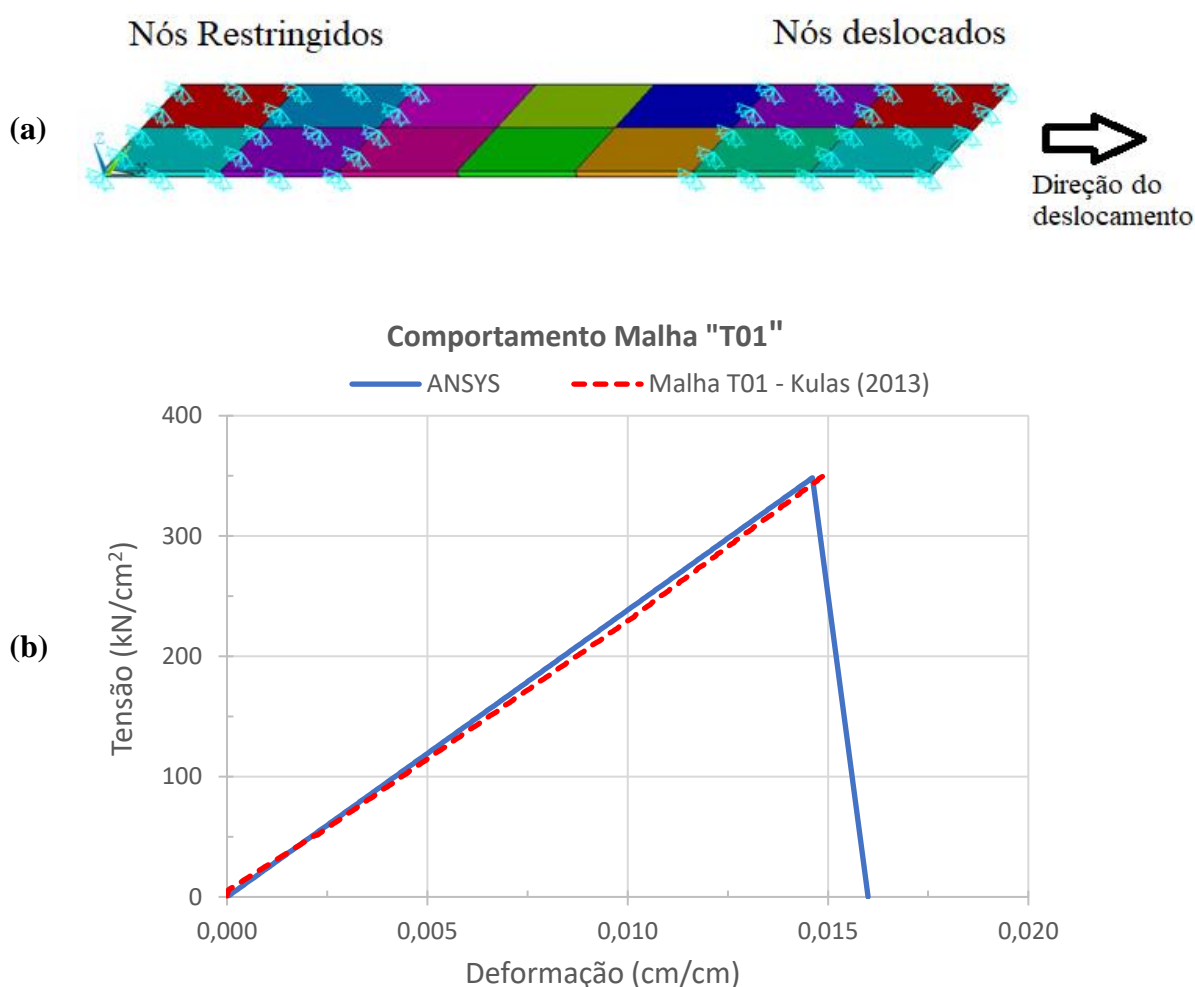
Tabela 5.1 – Malhas têxteis analisadas

Imagem	Nome	Técnica utilizada	Têxtil	Material impreg.	Orientação da malha	$\sigma_{t,u}$ (kN/cm ²)	$E_{t,u}$ (kN/cm ²)
	T01	Guia warp	Carbono	Epóxi	<i>Warp</i>	354,40	23854,90
	T02	Guia warp	Carbono	Epóxi	<i>Warp</i>	306,90	23833,20
					<i>Weft</i>	318,00	23217,10
	T15	Costura Pilar	Carbono	Epóxi	<i>Weft</i>	315,10	27521,10
	T52	Costura Pilar	AR-Glass	Epóxi	<i>Warp</i>	133,20	6621,60
					<i>Weft</i>	149,40	7353,60
	T61	Costura Pilar	AR-Glass	Epóxi	<i>Warp</i>	133,50	6223,30
					<i>Weft</i>	150,90	7577,90
	T81	Costura Pilar	AR-Glass	Estireno-Butadieno	<i>Warp</i>	103,60	6581,90
					<i>Weft</i>	111,20	6479,30
	T82	Costura Pilar	AR-Glass	Estireno-Butadieno	<i>Warp</i>	101,80	6888,80
					<i>Weft</i>	120,80	7181,50

(Fonte: elaborada pelo autor)

A verificação do modelo adotado para as malhas têxteis foi realizada através da comparação entre os comportamentos numérico e experimental da malha “T01” sob tração uniaxial. A modelagem implementada para análise numérica em questão é ilustrada na Figura 5.4a. Deve-se destacar a consideração da malha “T01” como material homogêneo, isotrópico e contínuo, em oposição a utilização de sua real geometria (reticulado de fios) com comportamento ortotrópico. As curvas tensão *versus* deformação obtidas experimentalmente e numericamente são comparadas na Figura 5.4b.

Figura 5.4 – Modelagem da malha têxtil T01



(Fonte: elaborada pelo autor)

A queda exibida pela curva numérica representa a perda total e instantânea da rigidez da malha empregada através da adaptação do modelo de dano progressivo, o qual foi implementado, no ANSYS, por meio dos comandos TB,DMGI e TB,DMGE.

5.2 RESUMO DOS MODELOS ANALISADOS

Após a validação dos modelos implementados ao concreto e a malha têxtil, são apresentadas, nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4, as características gerais dos experimentos numericamente analisados.

A taxa de armadura, indicada nas tabelas, é obtida através da Equação (104).

$$\rho_l = \frac{A_t}{A_c} \quad (104)$$

Onde:

A_t : área da seção transversal da malha têxtil;

A_c : área da seção transversal de concreto.

Tabela 5.2 – Ensaio de tração uniaxial analisados

Tipo de ensaio	Malha	Nomenclatura	Orientação da malha	Área	Taxa de armadura (%)	E_{cm} (kN/cm ²)	f_{ck} (kN/cm ²)
				transversal de malha têxtil (cm ²)			
Tração uniaxial	T01	V3-T01-K1	Warp	0,0736	0,37%	4542,00	9,00
		V3-T01-K2	Warp	0,1472	0,74%	4542,00	10,30
		V3-T01-K3	Warp	0,2208	1,10%	4542,00	10,00
	T15	V3-T15-S2	Weft	0,0736	0,37%	4542,00	8,60
		V3-T15-S3	Weft	0,1104	0,55%	4542,00	9,00
	T52	V3-T52-K1	Warp	0,1072	0,54%	4542,00	8,90
		V3-T52-K2	Warp	0,134	0,67%	4542,00	7,20
		V3-T52-K3	Warp	0,268	1,34%	4542,00	8,40
		V3-T52-S1	Weft	0,1608	0,80%	4542,00	8,80
	T61	V3-T61-K3	Warp	0,108	0,54%	4542,00	10,50
		V3-T61-K4	Warp	0,144	0,72%	4542,00	9,90
		V3-T61-S3	Weft	0,108	0,54%	4542,00	9,30
	T82	V3-T82-K3	Warp	0,108	0,54%	4542,00	7,40
		V3-T82-S3	Weft	0,108	0,54%	4542,00	7,40

(Fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 5.3 – Ensaio de flexão em laje

Tipo de ensaio	Malha	Nomenclatura	Orientação da malha	Área	Taxa de	E_{cm}	f_{ck}
				transversal de malha têxtil (cm^2)	armadura (%)	(kN/cm^2)	(kN/cm^2)
Flexão laje	T01	V4-T01-K1	Warp	0,1104	0,25%	4542	9,2
		V4-T01-K2	Warp	0,2208	0,49%	4542	8,8
		V4-T01-K3	Warp	0,3312	0,74%	4542	9,5
		V4-T01-K4	Warp	0,4416	0,98%	4542	10,3
	T02	V4-T02-K2	Warp	0,0736	0,16%	4542	9,6
		V4-T02-K2a	Warp	0,0736	0,16%	4542	9,1
	T52	V4-T52-K1	Warp	0,1876	0,42%	4542	8,9
	T81	V4-T81-K2	Warp	0,144	0,32%	4542	8,7
		V4-T81-K3	Warp	0,216	0,48%	4542	8,5
		V4-T81-S1	Weft	0,144	0,32%	4542	9,5
		V4-T81-S2	Weft	0,288	0,64%	4542	9,8
		V4-T81-S3	Weft	0,432	0,96%	4542	9,5
	T82	V4-T82-K2	Warp	0,126	0,28%	4542	10
		V4-T82-K3	Warp	0,189	0,42%	4542	9,1
		V4-T82-K4	Warp	0,252	0,56%	4542	9,1
		V4-T82-K8	Warp	0,252	0,42%	4542	9,2

(Fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 5.4 – Ensaios de flexão em vigas I

Tipo de ensaio	Malha	Nomenclatura	Orientação da malha	Área transversal de malha têxtil (cm ²)	Taxa de armadura (%)	E _{cm} (kN/cm ²)	f _{ck} (kN/cm ²)
Flexão Viga I	T01	V5-T01-K1	Warp	0,2144	0,46%	4542	9,8
	T02	V5-T02-K1	Warp	0,1876	0,40%	4542	9,8
	T15	V5-T15-S1	Weft	0,1472	0,31%	4542	10,2
		V5-T15-S2	Weft	0,184	0,39%	4542	10,2
	T52	V5-T52-S1	Weft	0,5092	1,09%	4542	8,8
	T61	V5-T61-S3	Weft	0,216	0,46%	4542	10,6

(Fonte: elaborada pelo autor)

Deve-se destacar que, apesar do Kulas (2013) informar a resistência característica à compressão (f_{ck}) do traço de concreto “C1”, este presente estudo utiliza a resistência característica à compressão do concreto fornecida para cada experimento, como apresentado nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4. Em decorrência da ausência de informação sobre o módulo de elasticidade médio do concreto (E_{cm}) em cada experimento, este trabalho fez uso do obtido por Kulas (2013) a partir da média de todos os traços de concreto “C1”. Seguindo as recomendações da norma NB6118-2014 e do Kulas (2013), os coeficientes de Poisson μ , para o concreto e malha, foram adotados com valores de 0,20 e 0,35, respectivamente.

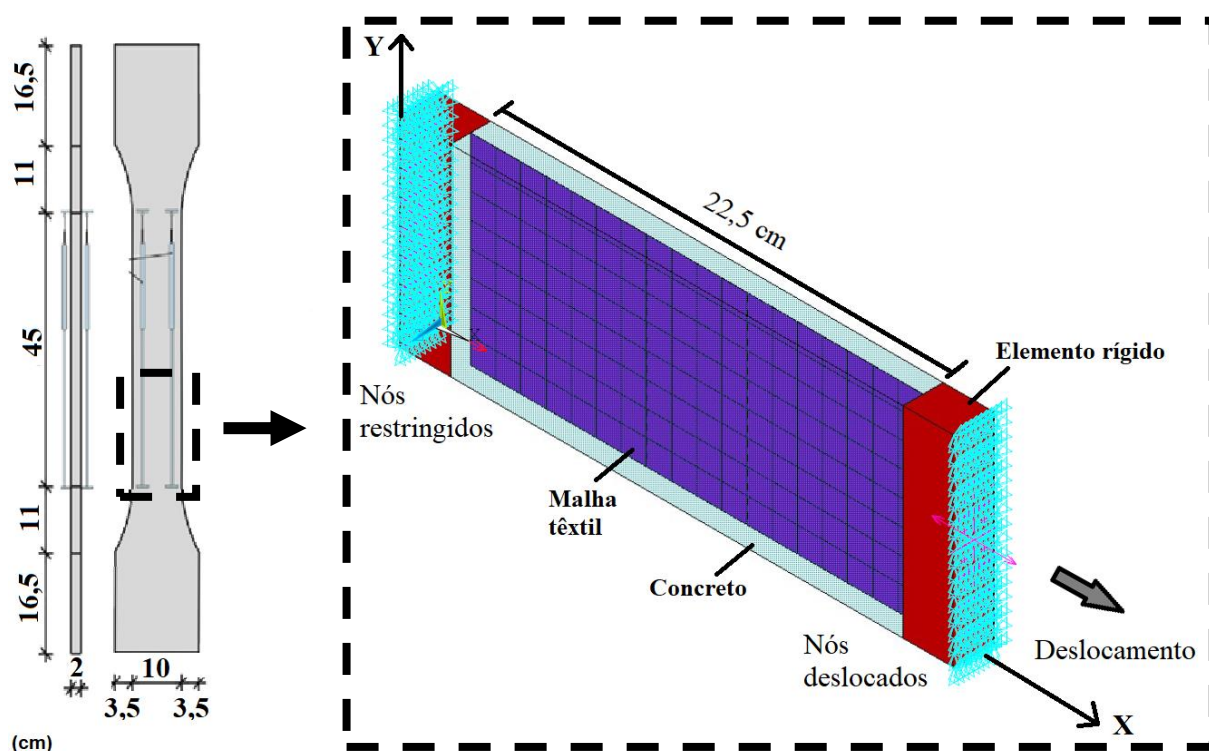
Nos seguintes tópicos, abordam-se as análises numéricas de elementos em TRC solicitados à tração e flexão. As calibrações referentes ao *Tension Stiffening* e modelo de fluência e retração foram realizadas através da análise numérica do concreto têxtil sob tração uniaxial. Após a calibração destes parâmetros, efetuou-se o ajuste particularizado do número mínimo de *substeps* e refinamento da malha para cada tipo de ensaio (tração uniaxial, flexão em laje e flexão em viga seção I).

5.3 ANÁLISE DE ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Para o estudo computacional dos ensaios de tração uniaxial em peças de concreto têxtil, foram consideradas as simetrias geométrica e de carregamento o que possibilita a modelagem de apenas metade da região central do experimento, como ilustrado na Figura 5.5. Considerando que o ensaio analisado tem por interesse apenas o comportamento uniaxial da peça e que, além da malha têxtil ter sido simplificada com comportamento isotrópico, o concreto fissurado dentro da USERMAT apresenta Poisson igual à 0, pode-se restringir a modelagem à metade da peça com regiões rígidas nas extremidades. Essas regiões tornam-se necessárias para uniformização da distribuição dos esforços na seção transversal da peça, como, também, para facilitar a obtenção dos resultados, uma vez que o deslocamento é aplicado em um único ponto central da região rígida.

O modelo computacional do corpo de prova alongado apresenta 22,5 cm de comprimento com 2,0 x 10,0 cm de seção transversal. Em relação às restrições, foram adicionados apoios simples nas direções Z, Y e X em todos os nós localizados na coordenada X igual a zero, enquanto, no extremo oposto, onde há aplicação de deslocamento em X, foram restringidas as direções Y e Z. A malha têxtil, modelada por meio do SHELL281, foi posicionada na seção intermediária da espessura e teve a sua rigidez reduzida em 72%, como citado no tópico 2.4.2 e observado experimentalmente por Kulas (2013) para ensaios de tração uniaxial. Destaca-se que a redução da rigidez em 72% ocorre, experimentalmente, com o início do estágio IIb, entretanto, de maneira simplificada, este trabalho optou por adotar esta redução desde o início da análise, uma vez que o comportamento nos estádios anteriores é rígido, principalmente, pelas características do concreto.

Figura 5.5 – Modelagem do ensaio de tração uniaxial



(Fonte: elaborada pelo autor)

A comparação dos resultados numérico e experimental é efetuada a partir do gráfico tensão *versus* deformação da malha têxtil. De maneira similar ao realizado por Kulas (2013), a tensão foi obtida dividindo a força reativa pela área de seção transversal da malha, enquanto que a deformação foi calculada através da divisão do deslocamento imposto pelo comprimento inicial do elemento têxtil.

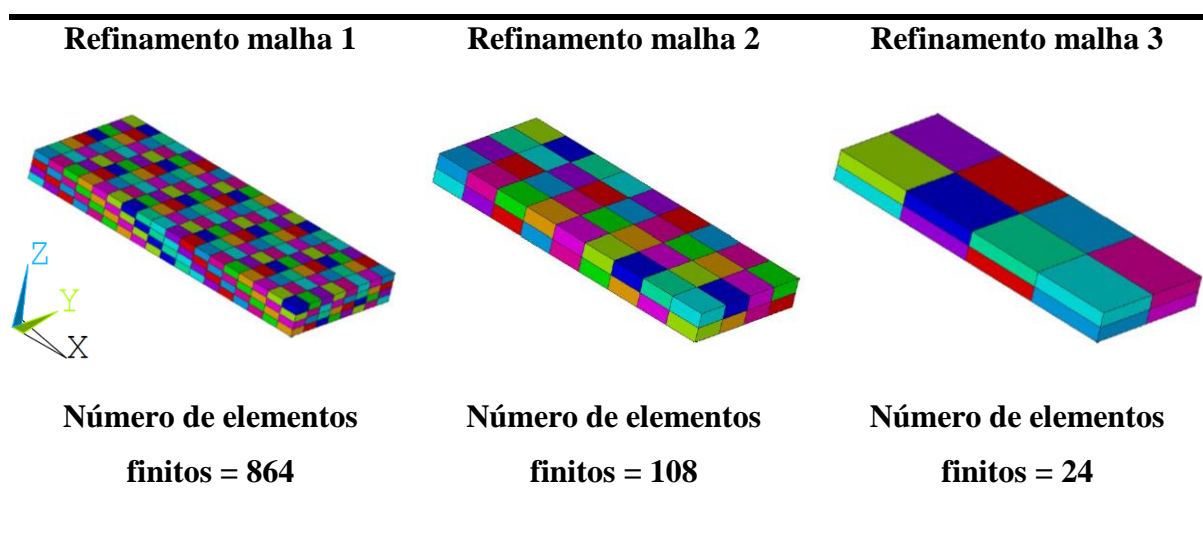
Para obtenção do correto comportamento numérico dos ensaios de tração uniaxial, teve-se que realizar uma série de calibrações e ajustes. Primeiro, realizou-se um estudo referente ao refinamento da malha sucedido pela calibração do número mínimo de substeps. Em sequência, calibrou-se o modelo de retração e fluência. Por último, definiu-se o modelo mais apropriado do *Tension Stiffening* a ser utilizado para cada tipo de malha. Destaca-se que, a exceção da calibração do *Tension Stiffening*, onde se calibrou para cada tipo de malha, os demais ajustes e calibrações foram realizados, apenas, a partir do estudo numérico do caso **V3-T01-K1**.

5.3.1 Estudo do refinamento de malha

Em decorrência das pequenas dimensões das peças em concreto têxtil e da ausência de estudos numéricos sobre este material, foi realizado um estudo sobre a discretização de malha de

elementos finitos. Para tal, foi numericamente modelado o caso **V3-T01-K1** sem consideração da fluência e retração, com número mínimo de *substeps* igual a 200 e com o modelo do *Tension Stiffening* com $\varepsilon_{ctu} = 0,001$, o qual foi adotado por Lazzari (2016) para modelagem de peças em concreto armado. Foram testadas três malhas com diferentes discretizações, conforme apresentado na Tabela 5.5 e ilustrado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Malhas de elementos finitos testadas



(Fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 5.5 – Refinamento das malhas de elementos finitos

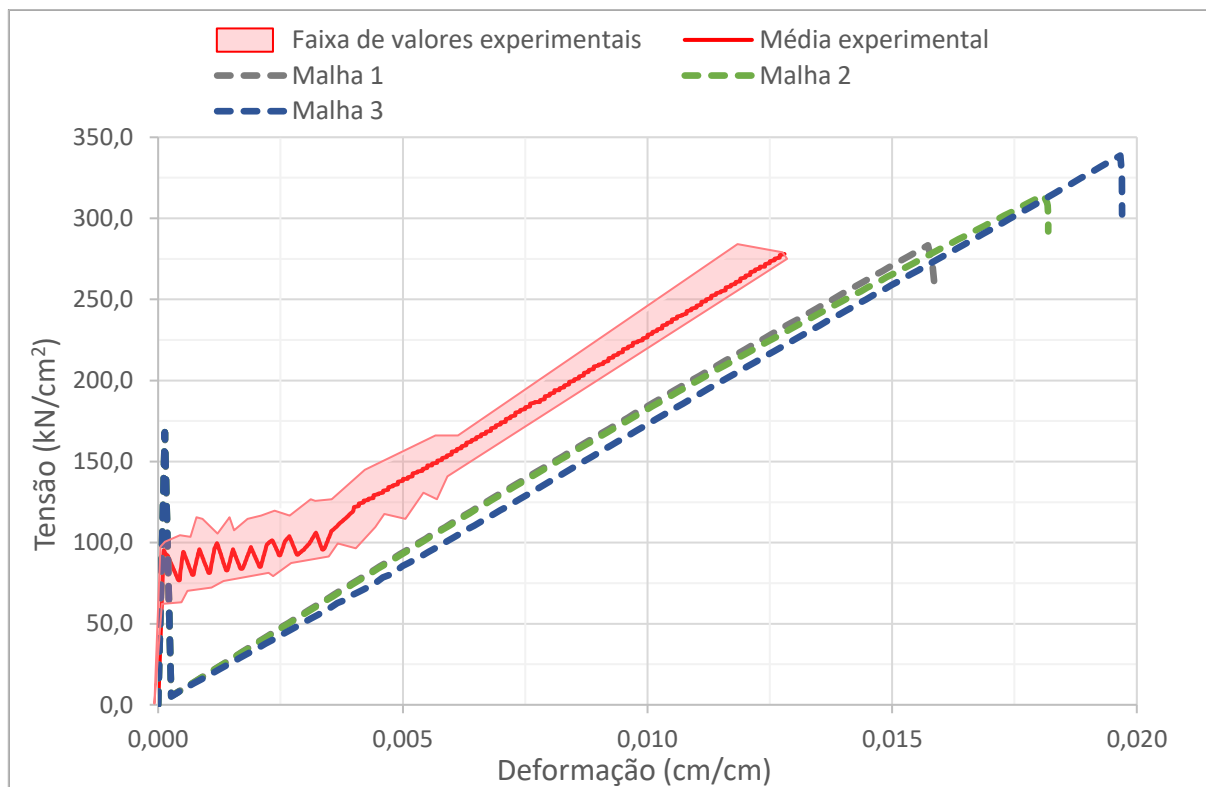
Estudo de malha: V3-T01-K1				
Refinamento malha	Tamanho dos elementos (cm)			Número mínimo de substeps
	Comprimento (X)	Largura (Y)	Espessura (Z)	
1	1,25	1,25	0,5	200
2	2,5	2,5	1	
3	5,625	5	1	

(Fonte: elaborada pelo autor)

Para definição de qual malha apresentou melhor resultado, plotaram-se as curvas tensão *versus* deformação dos comportamentos numéricos e experimental da malha. O comportamento experimental apresentado por Kulas (2013), para **V3-T01-K1**, resulta da média de seis corpos de prova testados. Dessa maneira, em decorrência da grande variabilidade observada experimentalmente, este presente trabalho apresentará, além da média retirada do Kulas (2013),

os limites superiores e inferiores registrados para cada experimento. Deve-se citar que, para cada experimento, Kulas (2013) realizou entre 2 a 6 testes.

Figura 5.7 - Refinamento da malha de elementos finitos para **V3-T01-K1**



(Fonte: elaborada pelo autor)

A partir do gráfico ilustrado na Figura 5.7, verifica-se que o exemplo utilizando a “malha 1” registrou o comportamento mais próximo ao observado por Kulas (2013) no que se refere ao instante de ruptura do elemento em concreto têxtil. Outro aspecto a ser considerado durante o estudo sobre refinamento de malha de elementos finitos é o tempo requisitado para realização da análise numérica. Em todos os três casos de análise, o tempo computacionalmente requisitado foi inferior a 5 minutos. Desta maneira, foi adotado o modelo da “malha 1” para os demais estudos numéricos de peças em TRC solicitadas à tração uniaxial.

5.3.2 Calibração do número de *Substeps*

Após a obtenção do melhor modelo de discretização de malha do ensaio de tração uniaxial, realizou-se a calibração do número de substeps mínimo a ser aplicado durante a análise numérica. Para tal, foi realizada a modelagem do **V3-T01-K1** variando o número de *substeps* em cinco casos, com o refinamento de “malha 1”, apresentado no tópico anterior, com modelo do *Tension Stiffening* com $\varepsilon_{ctu} = 0,001$ e sem consideração da fluência e retração. O número

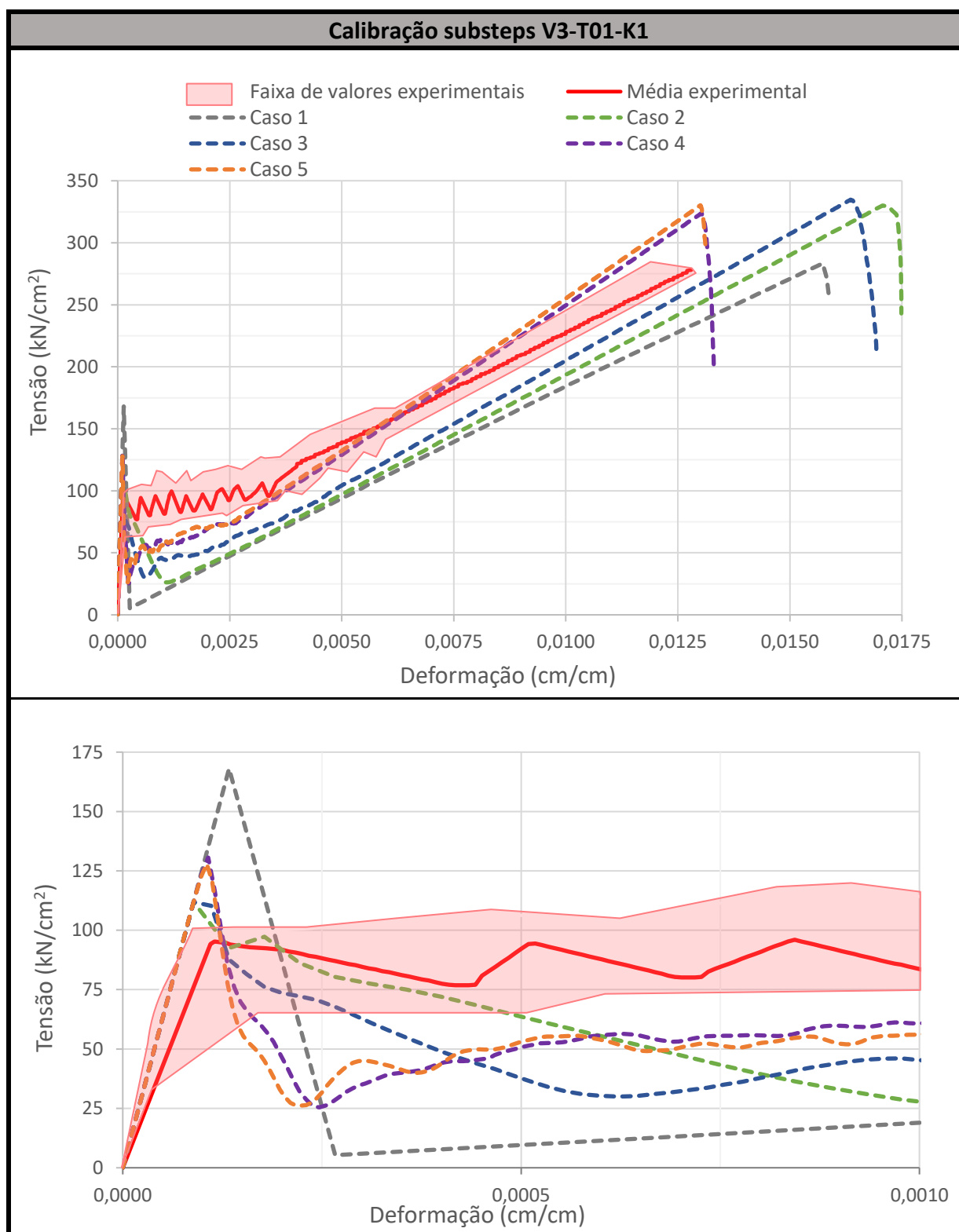
de *substeps* mínimo analisados foram: 200 (sugerido pelo ANSYS); 600; 1000; 2000; 2500, como apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Calibração do número de *substeps*

Estudo do número de <i>substeps</i> mínimo: V3-T01-K1			
Caso	Substeps	Tempo necessário (min)	Refinamento da Malha
1	200	2,2	Malha 1
2	600	5,1	
3	1000	10,1	
4	2000	16,5	
5	2500	24,3	

(Fonte: elaborada pelo autor)

A partir do Quadro 5.1, pode-se observar a grande diferença ocasionada a partir da variação do número de *substeps* mínimo. Primeiro, destaca-se a maior proximidade do instante de ruptura do elemento ao se utilizar *substeps* superior a 2000. Em seguida, consegue-se evidenciar, através das curvas dos casos 4 e 5, a existência de um processo convergente à medida que se aumenta o número de *substeps* mínimo. Outra observação a ser apontada é a maior concordância entre o comportamento numérico-experimental apresentado para os casos 4 e 5 nas regiões de baixa deformação. Para melhor apresentação e observação da região inicial da curva, apresenta-se, também, uma aproximação da região citada.

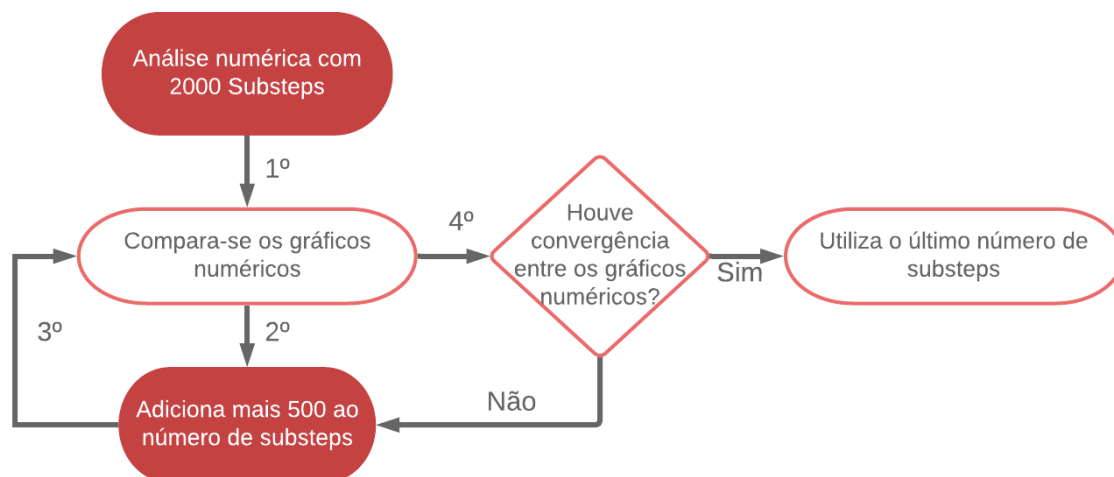
Quadro 5.1 – Comparação para calibração do número de *substeps* mínimo para V3-T01-K1

(Fonte: elaborada pelo autor)

Diante do exposto nos gráficos acima e levando em consideração o tempo de processamento computacional requerido, este trabalho utilizou valores entre 2000 e 6000 como número de

substeps mínimo. A determinação do valor exato para cada análise numérica de ensaio de tração uniaxial foi feita conforme a Figura 5.8. Para o experimento **V3-T01-K1**, utilizou-se o número de *substeps* mínimo igual a 2500.

Figura 5.8 – fluxograma utilizado para determinação do número de *substeps* mínimo



(Fonte: elaborada pelo autor)

5.3.3 Calibração retração e fluência

Para a aplicação dos modelos de retração e fluência conforme o *CEB-FIP Model Code 1990* (1993) e *CEB-FIP Model Code 2010* (2012), respectivamente, necessita-se fornecer valores aos seguintes parâmetros: umidade; idade do concreto no dia da solicitação de carga; tempo de cura realizado; temperatura ambiente. A exceção do parâmetro referente à umidade, Kulas (2013) apresenta em seu trabalho todos os demais parâmetros. Em geral, o autor citado relata que todos os experimentos foram testados no 28º dia em ambiente submetido a 20°C de temperatura. Além disto, destaca que após a confecção do corpo de prova, o mesmo foi posicionado, durante um dia, em tanque preenchido por água. Em seguida, os corpos de prova foram retirados e envelopados de maneira a limitar a perda de água e a conseqüente retração. Por fim, os envelopes foram retirados no dia da execução do experimento.

Diante dessas informações e sabendo que, por mais que haja um correto envelopamento do corpo de prova, sempre há perda de água, torna-se necessário realizar a calibração referente à umidade a ser introduzida ao modelo. Para tanto, foram testados três casos variando a umidade, como apresentado na Tabela 5.7.

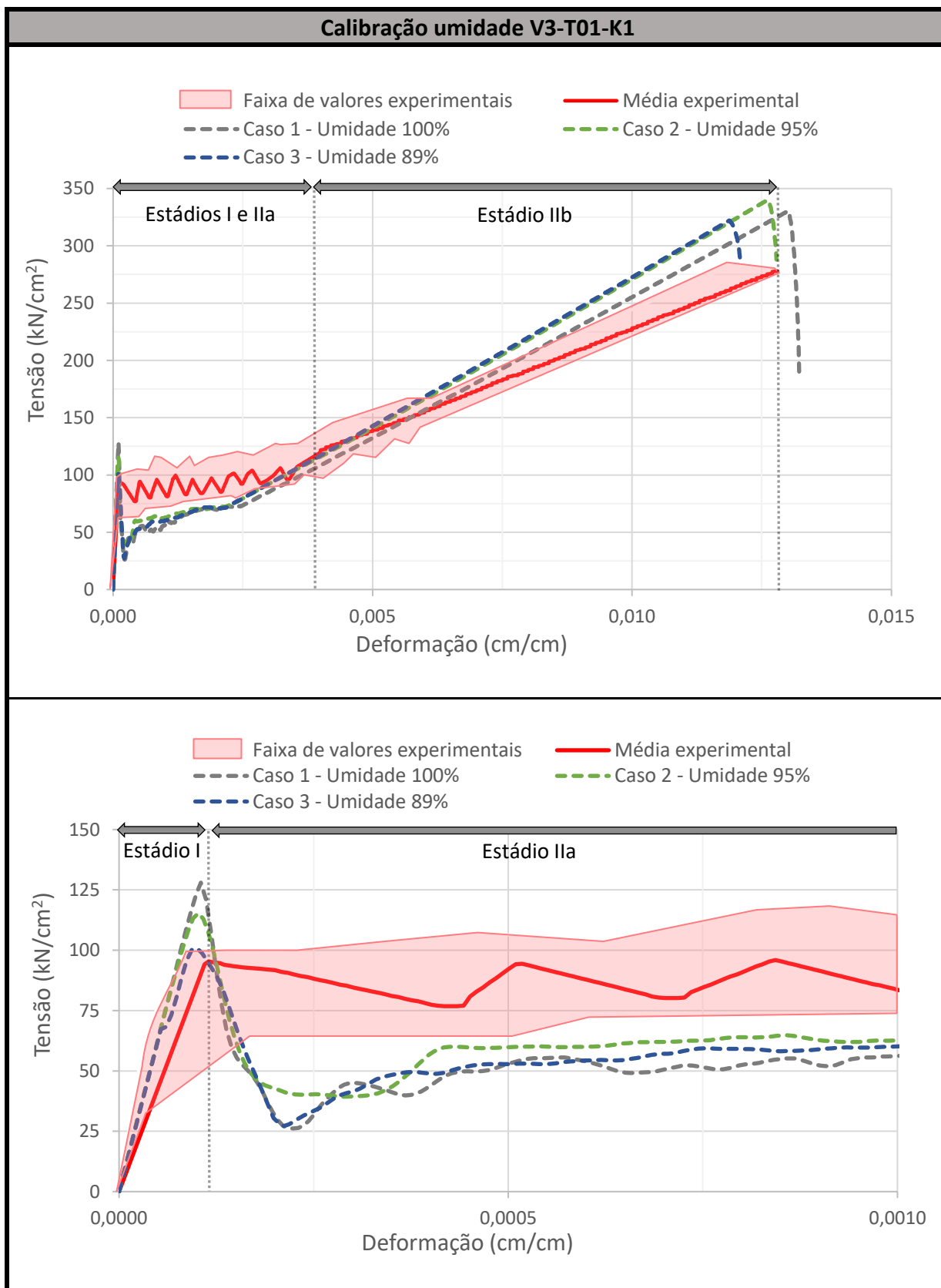
Tabela 5.7 – Calibração da umidade

Estudo da umidade: V3-T01-K1						
Caso	Retração modelo CEB <i>fib</i> - 1990				Refinamento da malha	Substeps
	Umidade (%)	Início da retração (dias)	Data do carregamento (dias)	Temperatura (°C)		
1	100					
2	95	2	28	20	Malha 1	2500
3	89					

(Fonte: elaborada pelo autor)

Diante do apresentado nos gráficos do Quadro 5.2, destaca-se o comportamento similiar apresentado pelos casos 2 e 3 nas regiões dos estádios IIa e IIb. Nos gráficos citados, as regiões demarcadas em estádios I, IIa e IIb referem-se aos resultados experimentais. Através do segundo gráfico, onde se consegue observar o comportamento para baixas deformações, pode-se perceber a influência gerada pela modificação da retração, por meio da variação da umidade, no instante da fissuração do concreto e início do estágio IIa. Como, em geral, o comportamento pós-fissuração é altamente dependente do comportamento adotado para o *Tension Stiffening*, o qual ainda será estudado, este trabalho priorizou, nesta etapa (calibração fluência e retração), o ajuste do instante da fissuração entre os estádios I e IIa. Assim, em face do exposto nos gráficos abaixo e nas análises realizadas, o presente trabalho utilizou, para todos os demais experimentos, umidade relativa igual a 89%.

Quadro 5.2 – Comparação para calibração da umidade através do V3-T01-K1



(Fonte: elaborada pelo autor)

5.3.4 Calibração *Tension Stiffening*

Como relatado no Tópico 3.2.1.2.2, o comportamento do *Tension Stiffening* está intrinsecamente ligado a fatores como: dimensão do elemento de reforço; propriedades mecânicas dos materiais; e taxa de armadura. Assim, a calibração do *Tension Stiffening* foi realizada a partir da variação do parâmetro ε_{ctu} (valores testados: 0,001; 0,002; 0,004; 0,006; 0,008) e de acordo com as características apresentadas por cada malha têxtil. Para tanto, dividiram-se as malhas têxteis em 4 grupos diferenciados a partir do tipo de fibra, material impregnativo e técnica de formação de fios e malha, conforme a Tabela 5.8. Deve-se destacar que, apesar do *Tension Stiffening* está ligado à taxa de armadura, a mesma não foi considerada de grande relevância durante a calibragem do *Tension Stiffening*. Esta observação decorre da pequena variabilidade apresentada pelas taxas de armadura utilizadas nas peças de concreto têxtil analisadas. Portanto, apesar dos experimentos possuírem diferentes taxas de armadura, pode-se realizar a calibração, para os respectivos grupos, a partir dos experimentos **V3-T01-K1**, **V3-T15-S2**, **V3-T52-K2** e **V3-T82-S3**.

Na última coluna são indicados os experimentos utilizados para calibração do *Tension Stiffening* dos respectivos grupos de malha. Deve-se destacar que, para todas as análises numéricas, foram utilizados o refinamento de “malha 1”, número de substeps mínimo entre 2000 e 6000 e umidade relativa igual a 89%.

Tabela 5.8 – Grupos de malhas utilizados para calibração do *Tension Stiffening*

Grupo	Malhas	Características			Faixa do módulo de elasticidade - $E_{t,u}$ (kN/cm ²)	Calibração pelo experimento
		Têxtil	Técnica utilizada	Material impreg.		
1	T01 / T02	Carbono	Guia warp	Epóxi	23217 - 23854	V3-T01-K1
2	T15	Carbono	Costura Pilar	Epóxi	27521	V3-T15-S2
3	T52 / T61	AR-Glass	Costura Pilar	Epóxi	6223 - 7577	V3-T52-K2
4	T81 / T82	AR-Glass	Costura Pilar	Estireno-butadieno	6479 - 7181	V3-T82-S3

(Fonte: elaborada pelo autor)

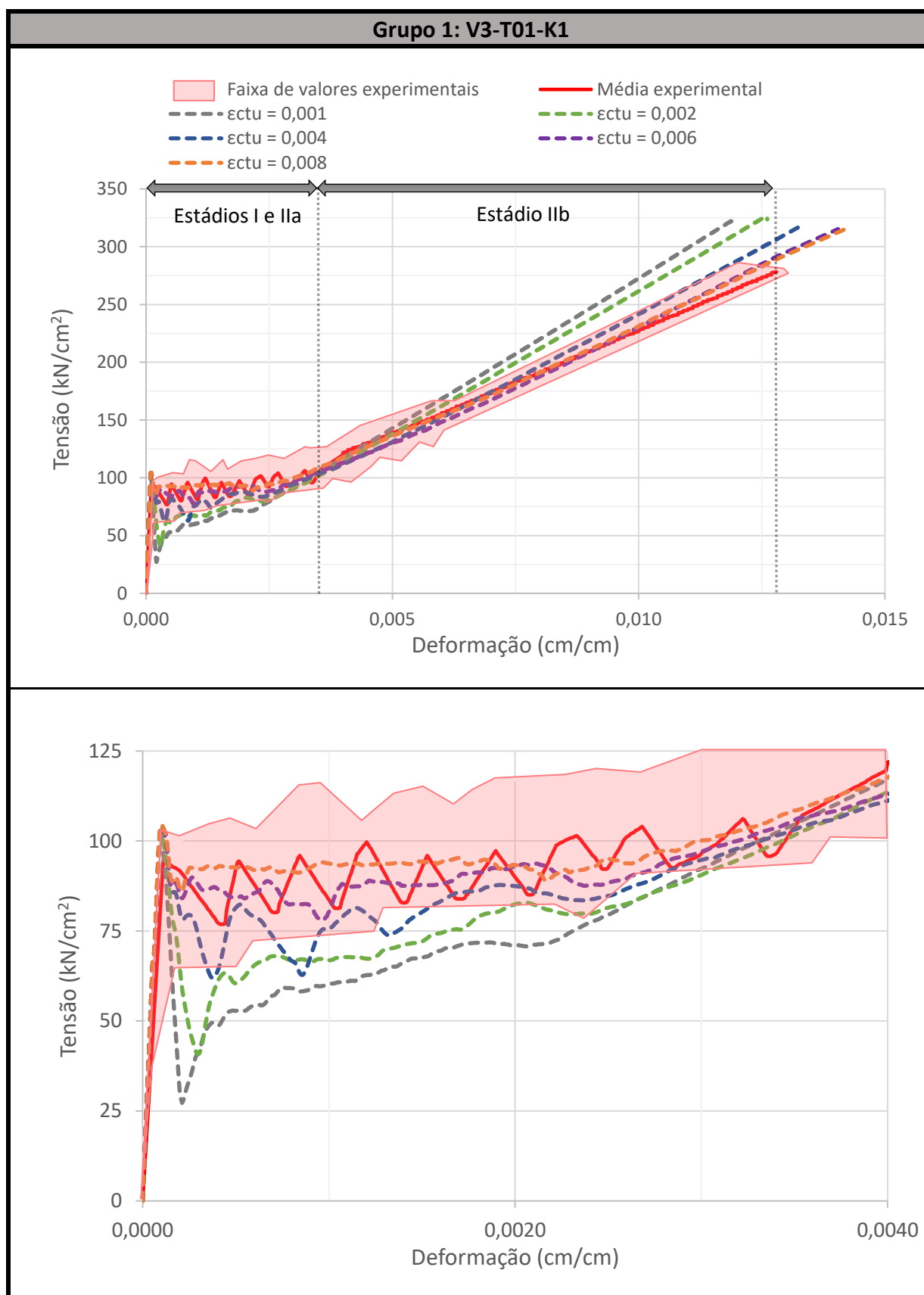
Nos Quadros 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 são apresentados os gráficos tensão *versus* deformação utilizados para calibração do *Tension Stiffening* dos grupos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Para cada grupo, apresentam-se dois gráficos: o primeiro é referente ao comportamento completo da peça em concreto têxtil (estádios I, IIa e IIb), enquanto que o segundo refere-se apenas ao comportamento registrado para baixas deformações. Através das curvas observadas, pode-se perceber a modificação no comportamento do concreto têxtil pós-fisuração (estádios IIa e IIb) à medida que se aumenta o parâmetro ϵ_{ctu} . A partir desse aspecto, pode-se determinar o *Tension Stiffening* mais apropriado para cada grupo de malha, conforme indicado na Tabela 5.9.

Os resultados obtidos corroboram com a ideia citada sobre a necessidade de aumentar, em relação ao proposto por Lazzari (2016), o valor do parâmetro ϵ_{ctu} para análise de peças em concreto têxtil. Enquanto a autora em questão adotou, para elementos em concreto armado, o valor de 0,001 para ϵ_{ctu} , este presente trabalho optou por valores entre 0,006 e 0,008 de acordo com cada grupo de malha.

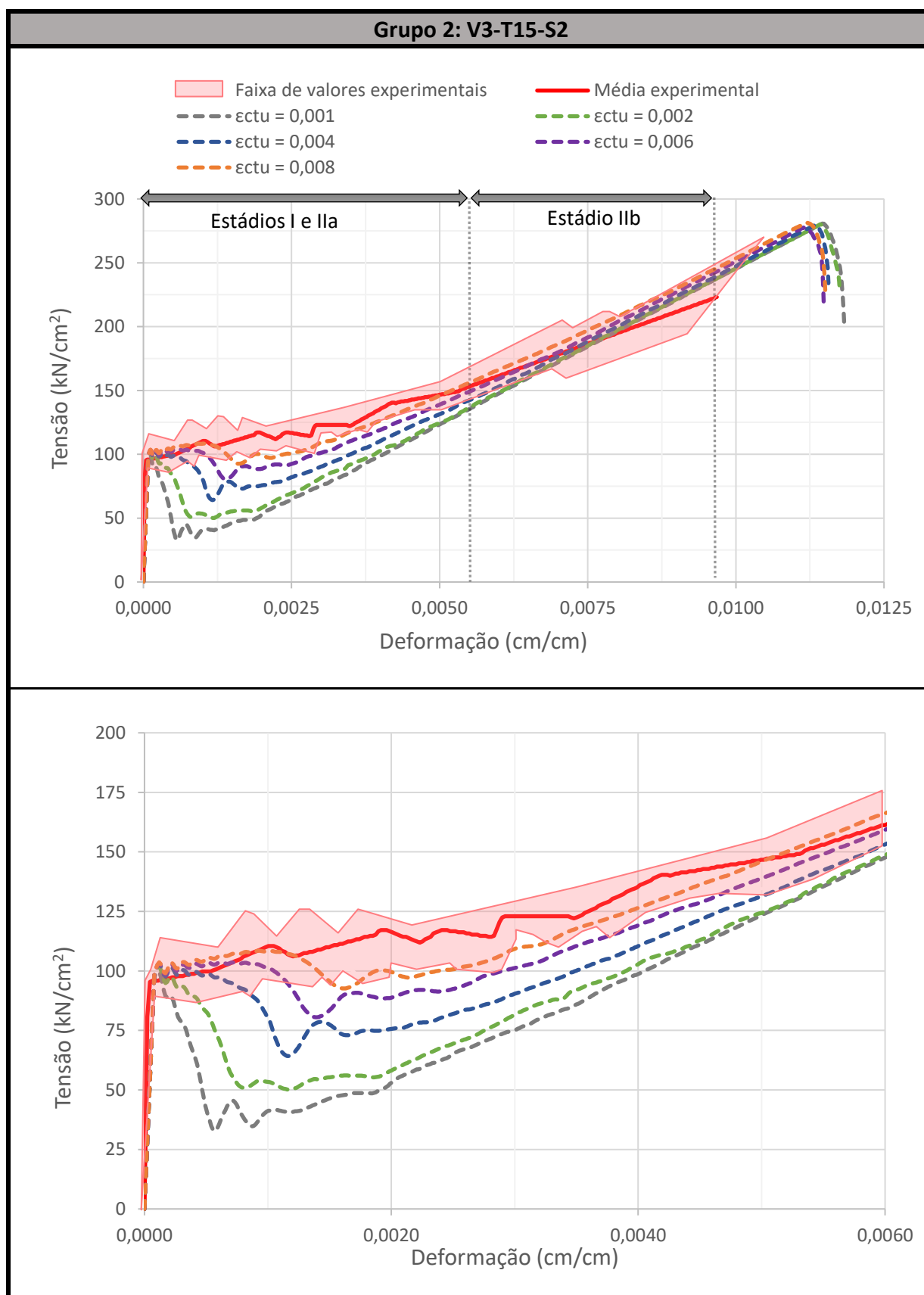
Tabela 5.9 – *Tension Stiffening* calibrados de acordo com os grupos de malha

Grupo	Malhas	Calibração <i>Tension Stiffening</i>
		ϵ_{ctu}
1	T01 / T02	0,006
2	T15	0,008
3	T52 / T61	0,008
4	T81 / T82	0,008

(Fonte: elaborada pelo autor)

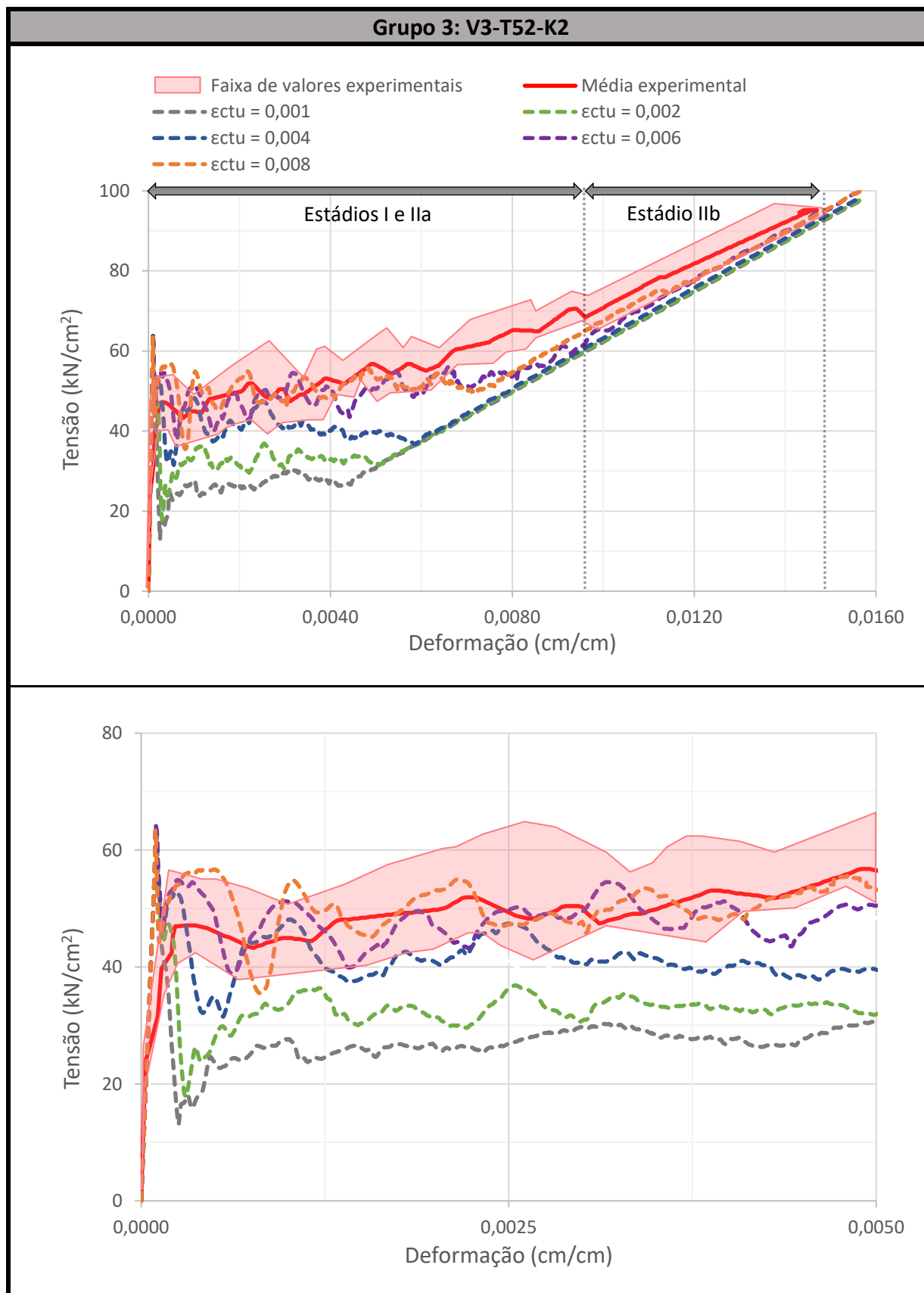
Quadro 5.3 – Comparação para calibração do *Tension Stiffening* do grupo 1 através do V3-T01-K1

(Fonte: elaborada pelo autor)

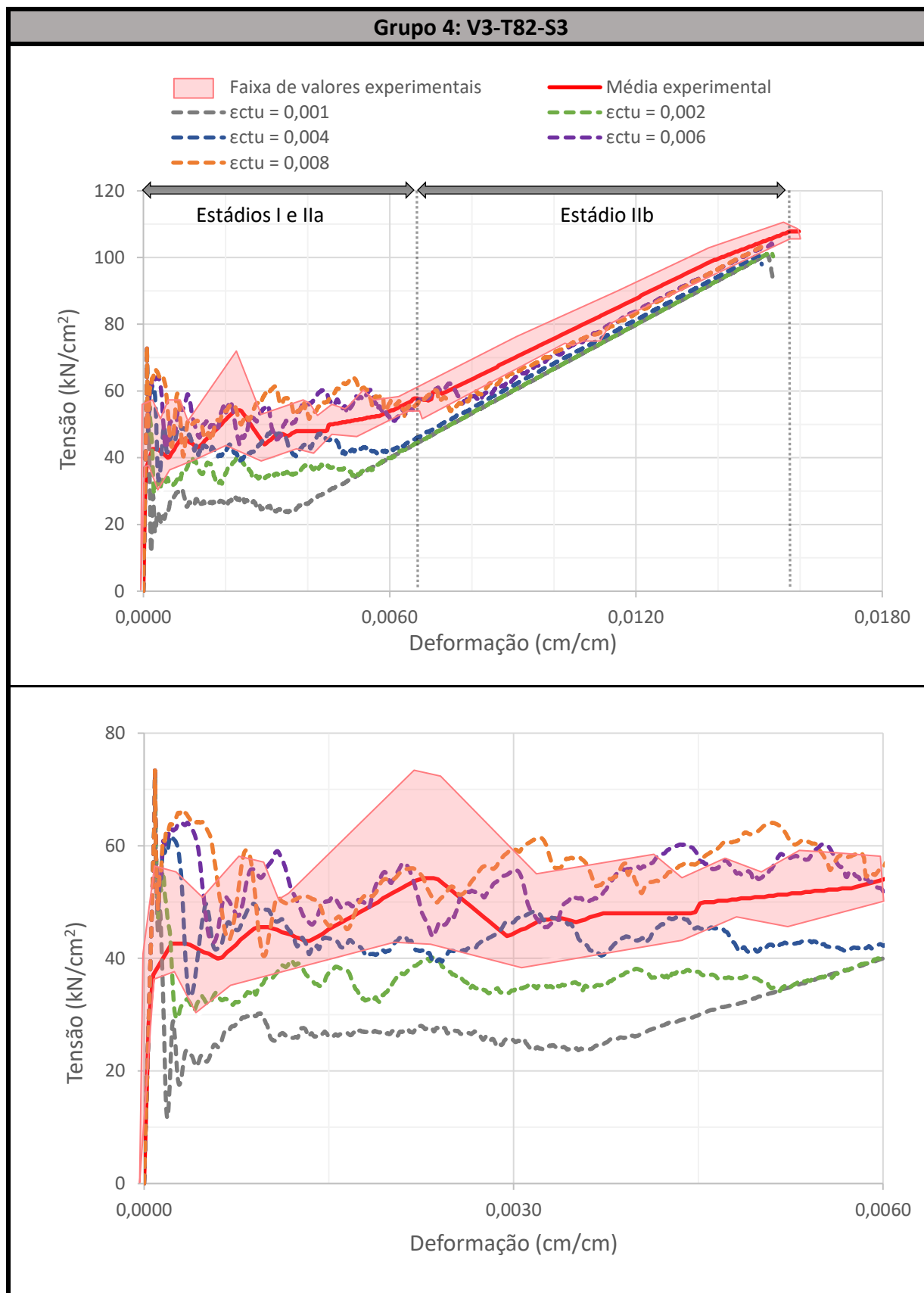
Quadro 5.4 – Comparação para calibração da *Tension Stiffening* do grupo 2 através do V3-T15-S2

(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.5 – Comparação para calibração da *Tension Stiffening* do grupo 3 através do **V3-T52-K2**



(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.6 – Comparação para calibração da *Tension Stiffening* do grupo 4 através do V3-T82-S3

(Fonte: elaborada pelo autor)

Através do processo de calibração, adotou-se, para o “grupo 1” e os “grupos 2,3 e 4”, o parâmetro ε_{ctu} igual a 0,006 e 0,008, respectivamente. Justifica-se esta diferenciação a partir das diferentes técnicas utilizadas na concepção das malhas analisadas. Enquanto que, para o “grupo 1”, Kulas (2013) utilizou o procedimento “*guia warp*”, os demais grupos foram concebidos através da técnica “*costura pilar*”, o que pode gerar, conforme Kulas (2013), uma alteração no comportamento da aderência malha-concreto.

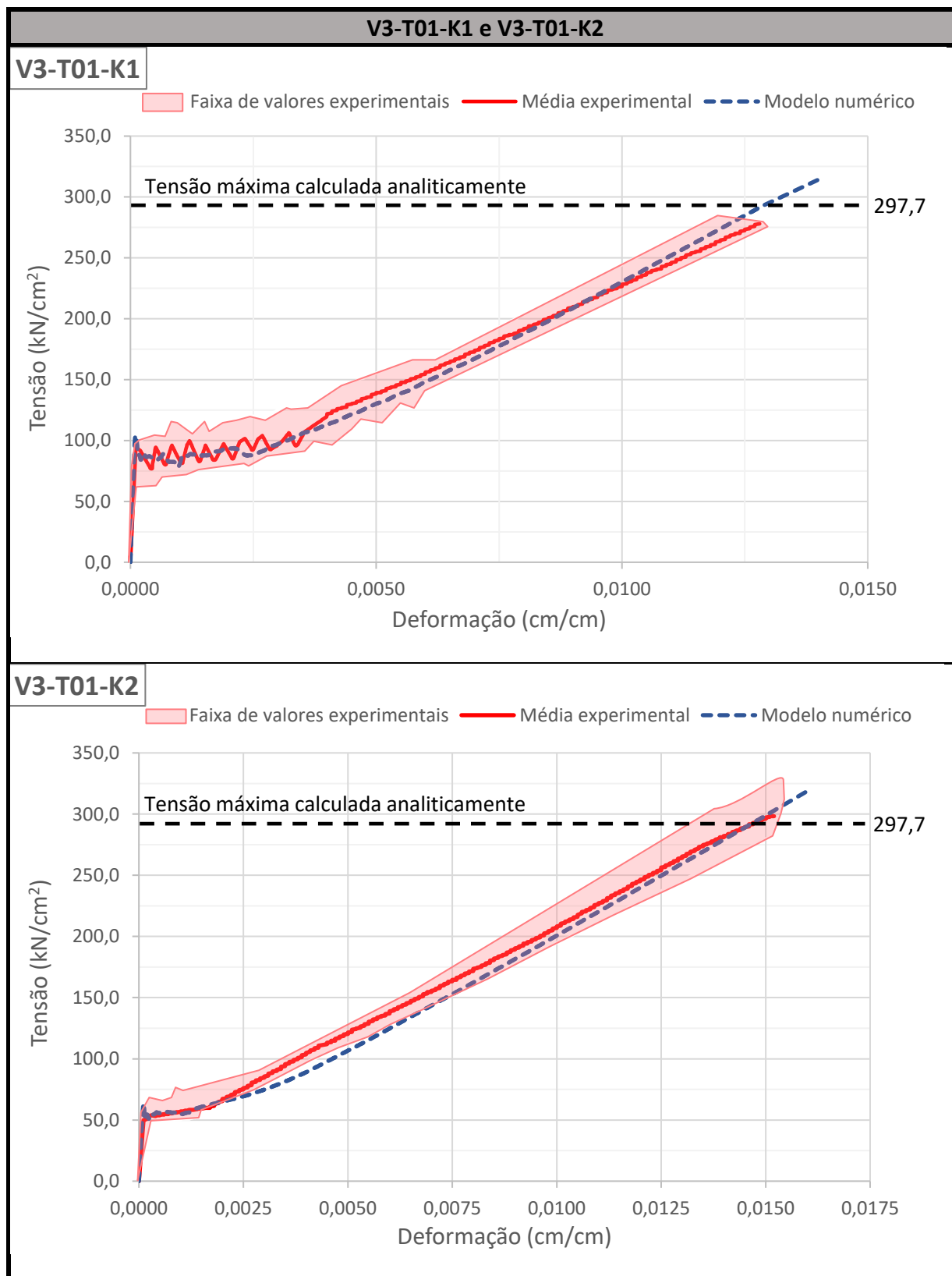
5.3.5 Resultados

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos, através da análise numérica de peças em concreto têxtil submetidas à tração uniaxial, para os exemplos apresentados na Tabela 5.2. Para tanto, apresentam-se os gráficos tensão *versus* deformação das peças em TRC, onde se demarcaram, também, as tensões máximas obtidas via o método analítico citado no tópico 2.5.2.1. Além da comparação gráfica, exibe-se, para o exemplo **V3-T01-K1**, a evolução das distribuições de tensão e deformação no concreto e na malha têxtil. Nota-se que, para a modelagem numérica, foram utilizados os parâmetros calibrados referentes ao *Tension stiffening*, retração e fluência, número de *substeps* mínimo e tamanho dos elementos finitos modelados. O Apêndice A apresenta o script de tração uniaxial utilizado para modelagem numérica do exemplo **V3-T01-K1**.

5.3.5.1 Curvas tensão *versus* deformação

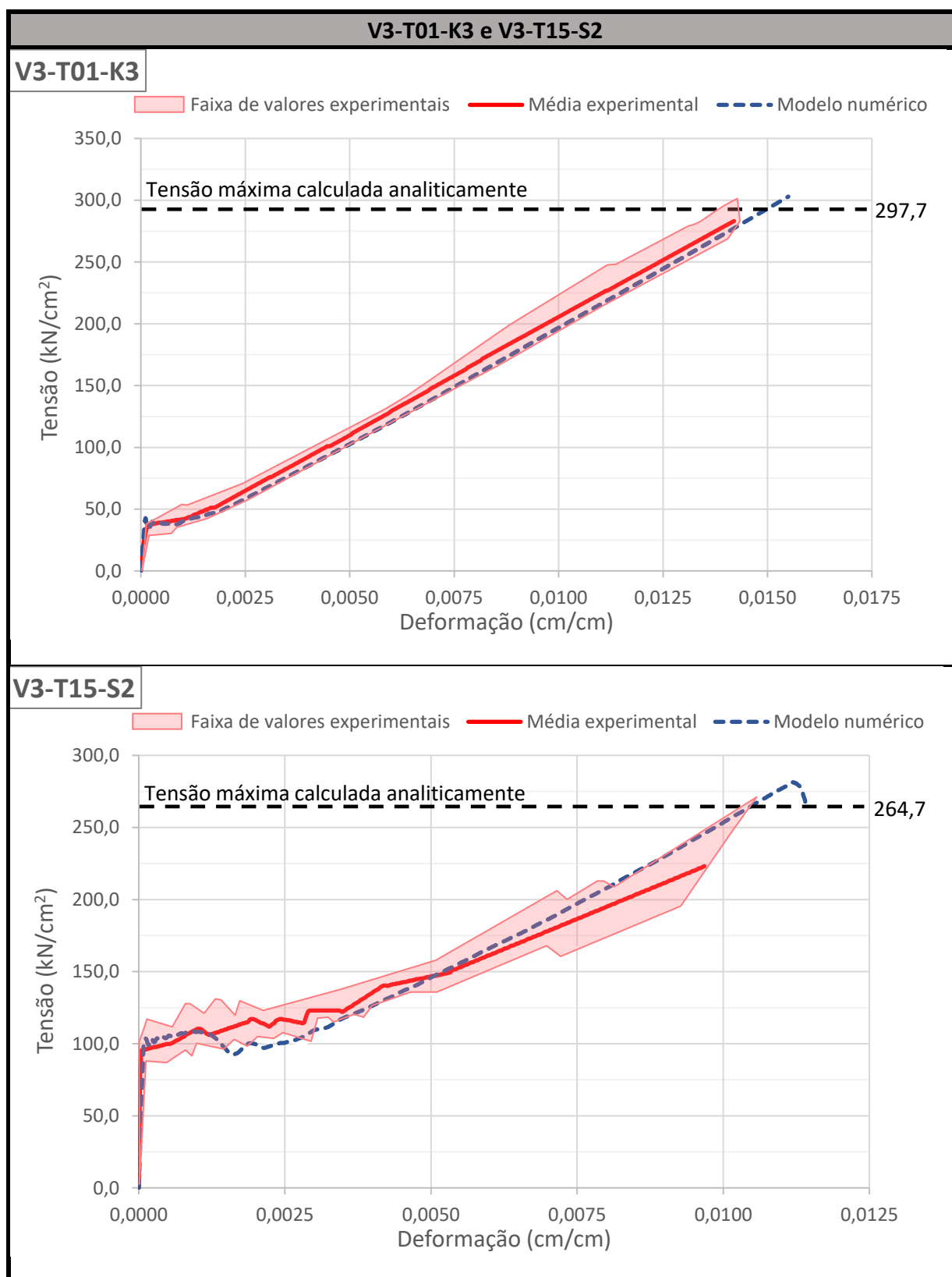
Os Quadros 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam as curvas experimentais tensão *versus* deformação confrontadas às obtidas via análise numérica por meio do programa ANSYS. Além das curvas experimental e numérica, delimita-se, nos gráficos, o valor para tensão máxima obtida via método analítico proposto por Kulas (2013). Ao total, foram analisados 14 experimentos em TRC solicitados à tração uniaxial, de maneira que se obteve boa concordância entre as curvas numéricas e experimentais. Nota-se que foi possível determinar, para as curvas numéricas, os estádios I, IIa e IIb. Além dos fatores citados, deve-se destacar que a tensão, indicada nos gráficos, foi obtida dividindo a força reativa pela área de seção transversal da malha. Dessa maneira, torna-se possível que, para casos com mesma malha, os gráficos de experimentos com diferentes taxas de armadura apresentem uma mesma tensão de ruptura.

Quadro 5.7 – Resultados dos experimentos V3-T01-K1 e V3-T01-K2



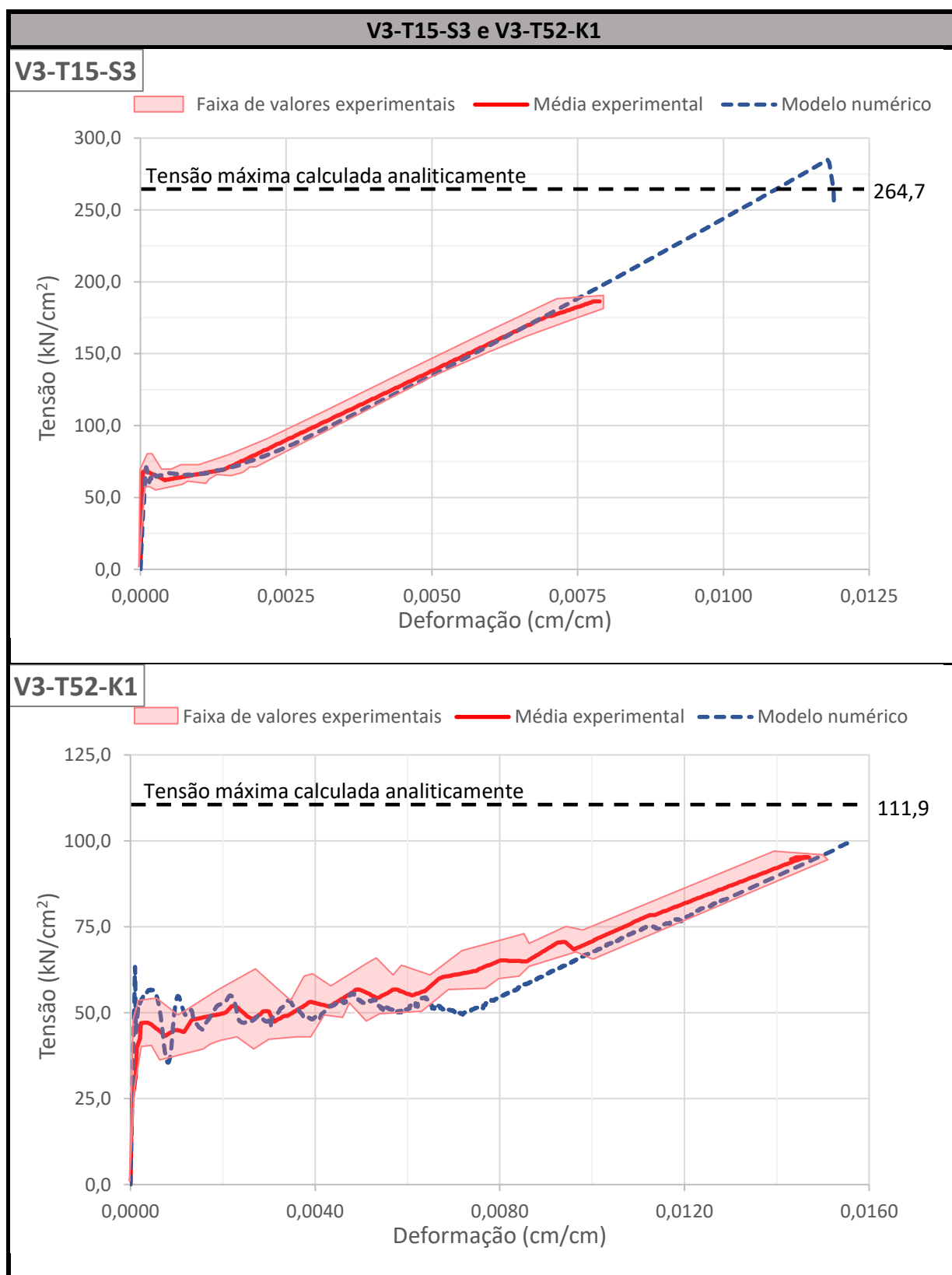
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.8 – Resultados dos experimentos V3-T01-K3 e V3-T15-S2



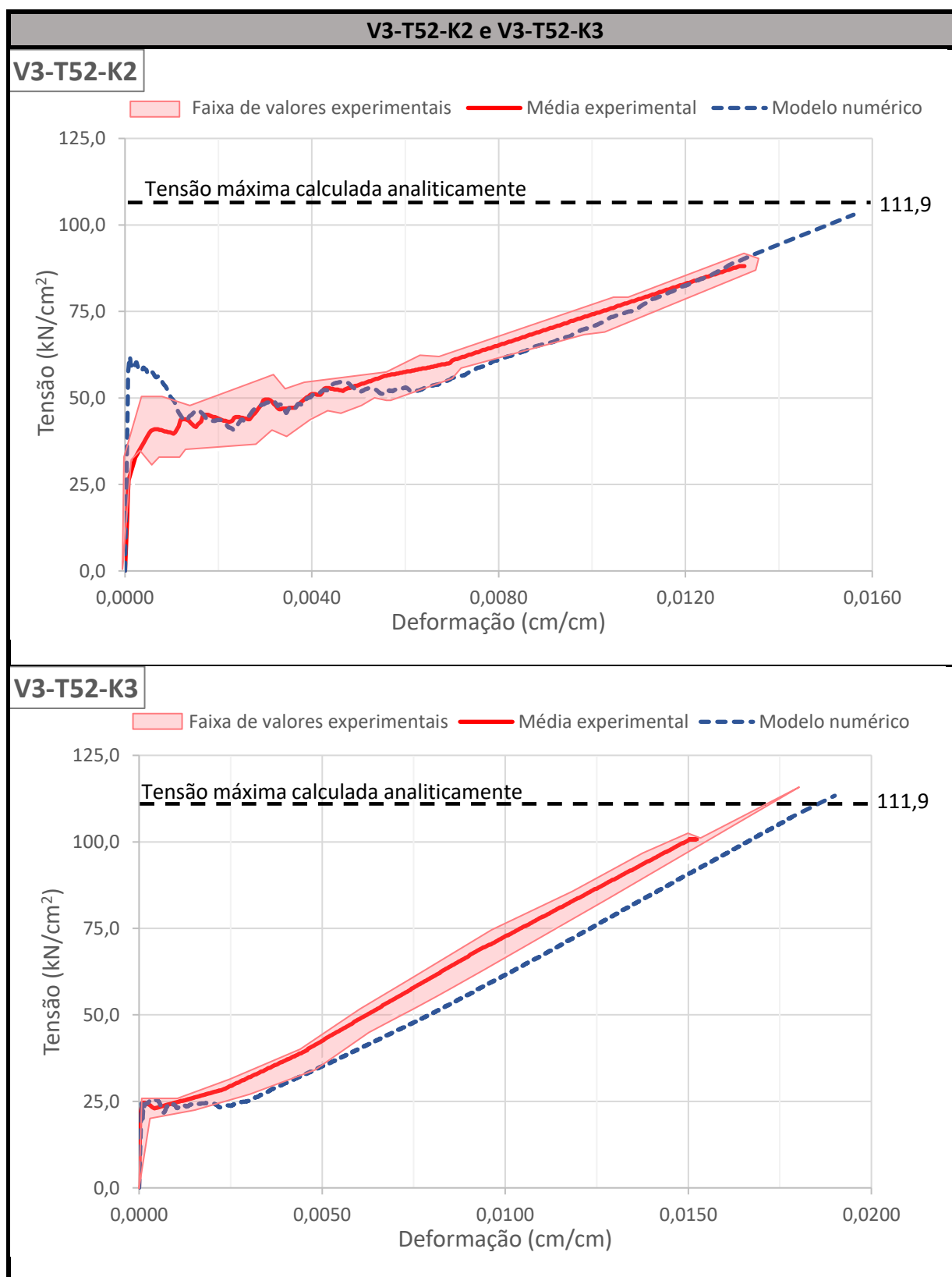
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.9 – Resultados dos experimentos V3-T15-S3 e V3-T52-K1



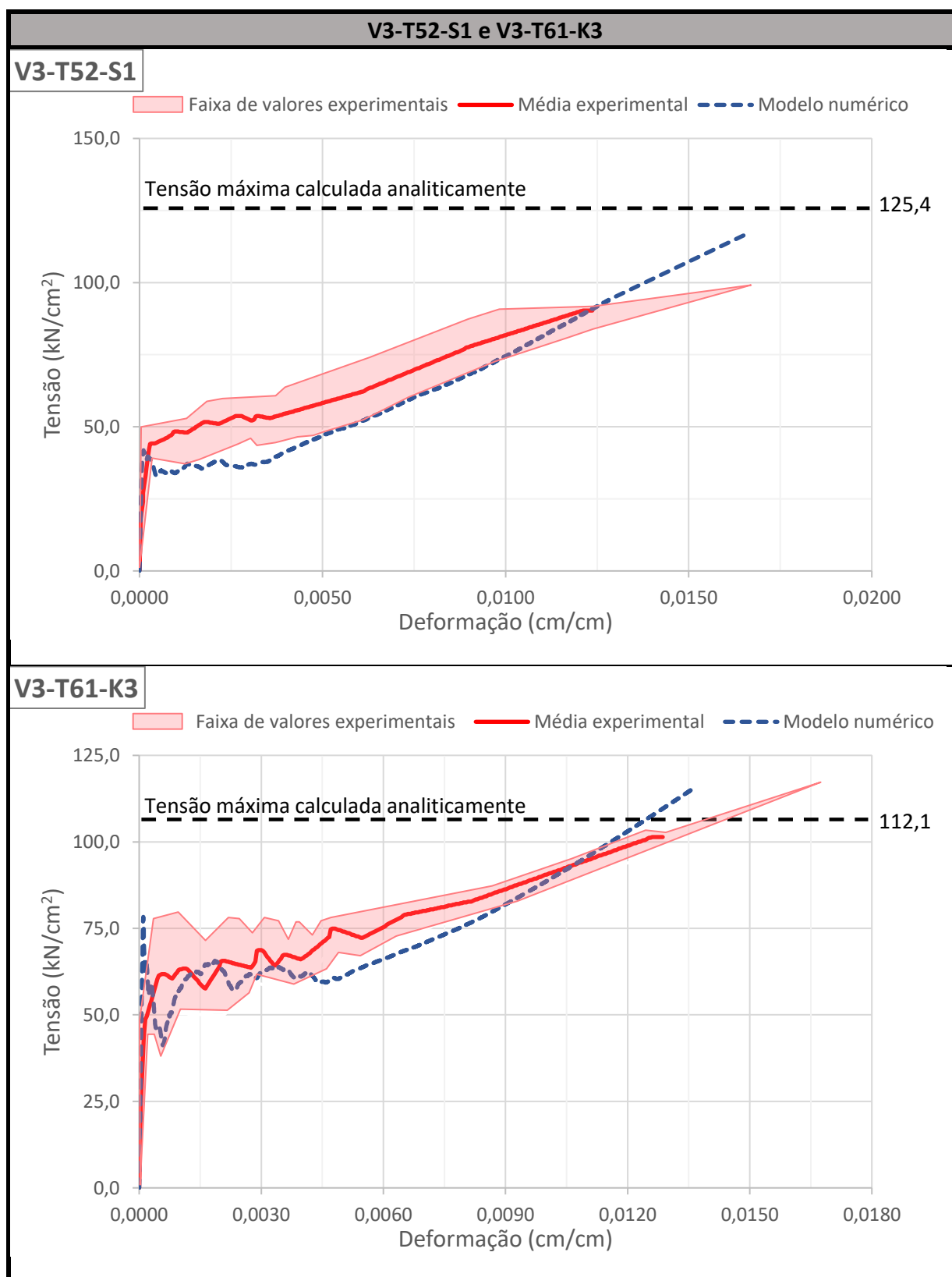
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.10 – Resultados dos experimentos V3-T52-K2 e V3-T52-K3



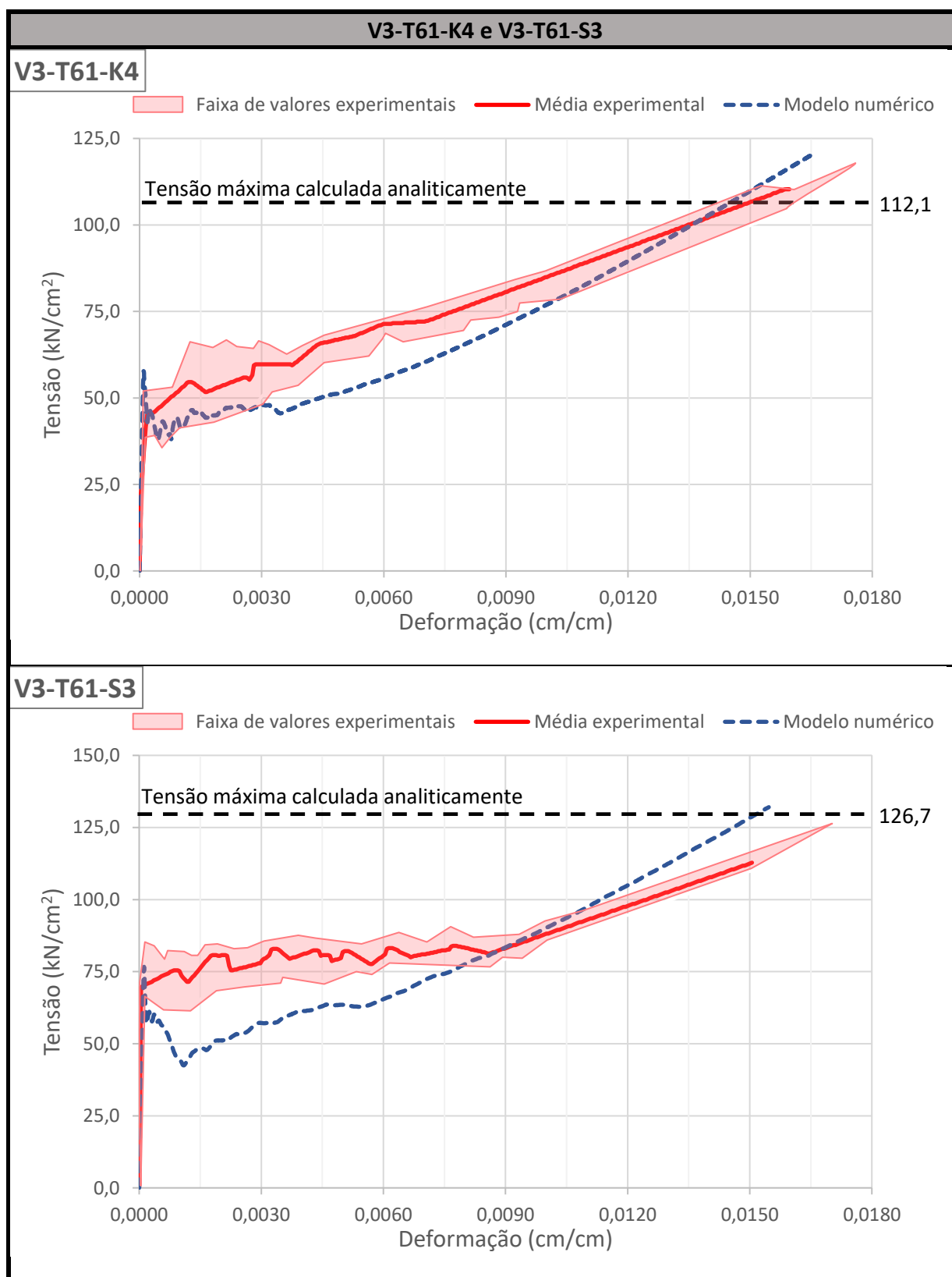
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.11 – Resultados dos experimentos V3-T52-S1 e V3-T61-K3



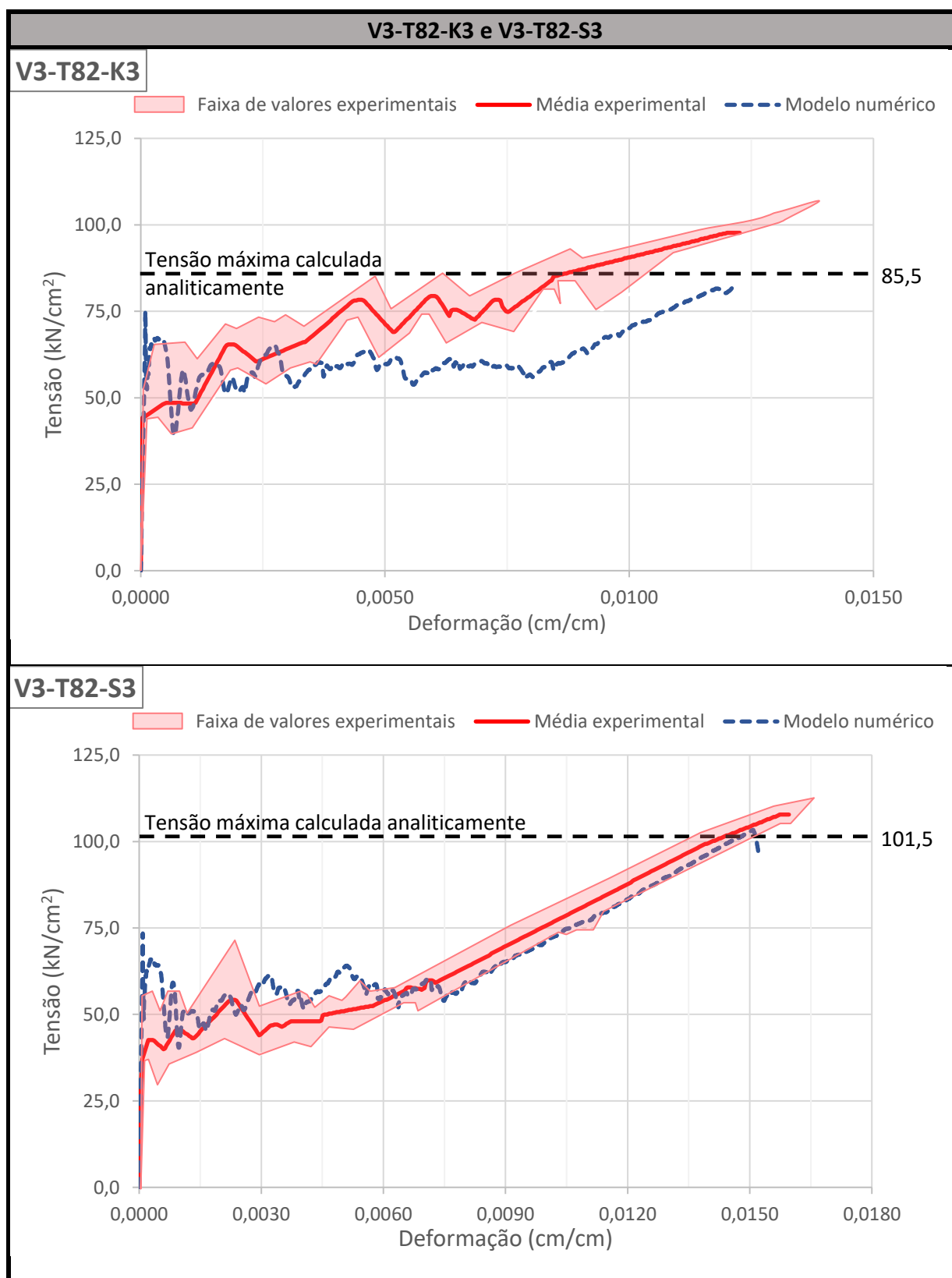
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.12 – Resultados dos experimentos V3-T61-K4 e V3-T61-S3



(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.13 – Resultados dos experimentos V3-T82-K3 e V3-T82-S3



(Fonte: elaborada pelo autor)

Na Tabela 5.10 são exibidos os valores da tensão de ruptura obtidos através da média experimental, do modelo numérico e do modelo analítico. Observa-se, na coluna referente aos erros, que a tensão de ruptura analisada numericamente se aproximou mais do modelo analítico, criado por Kulas (2013), do que da média dos resultados experimentais. A diferença entre a tensão de ruptura experimental para a analítica e numérica, pode ser justificada por um efeito de escala que pode reduzir em torno de 14% a resistência última, segundo Kulas (2013). Além deste fator, observa-se que, para os modelos com erro superior à 14%, os resultados experimentais, mostrados por Kulas, exibiram valores de tensão na malha, no instante da ruptura, distantes dos indicados na Tabela 5.1 referente as propriedades das malhas.

Por último, para justificar esta diferença, aponta-se a grande variabilidade entre os resultados dos corpos de prova de um mesmo experimento. Assim, a comparação dos erros através, unicamente, da média dos resultados experimentais pode ser equivocada, de modo que se apresenta, também, o erro entre a tensão última obtida via modelo numérico e modelo analítico proposto por Kulas (2013).

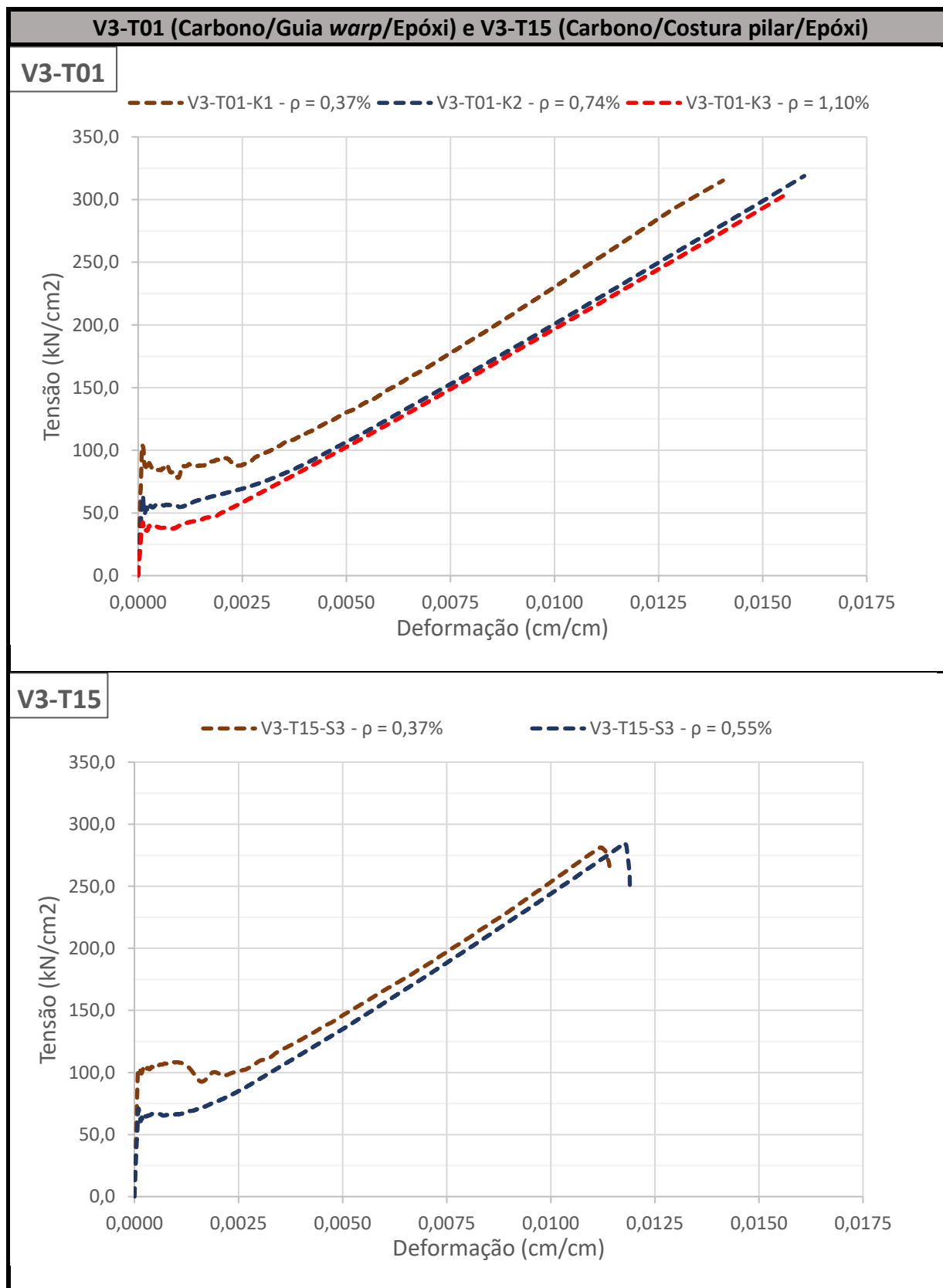
Por fim, apresentam-se, nos Quadros 5.14, 5.15 e 5.16, as curvas numéricas tensão *versus* deformação para cada tipo de malha. Através destes gráficos, percebe-se que, quanto menor a taxa de armadura utilizada, mais instável e longa se torna a região do estágio IIa. Além deste aspecto, pode-se destacar que a inclinação do estágio IIb é similar para experimentos com a mesma malha.

Tabela 5.10 – Resultados das análises de TRC sob tração uniaxial

Malha	Experimento	Tensão de ruptura (kN/cm ²)			Erro (%)	
		Média Experimental	Numérico	Analítico	Numérico/Experimental	Numérico/Analítico
T01	V3-T01-K1	277,6	315,9	297,7	-13,80%	-6,11%
	V3-T01-K2	298,5	318,1	297,7	-6,57%	-6,85%
	V3-T01-K3	290,2	302,6	297,7	-4,27%	-1,65%
T15	V3-T15-S2	223,2	277,7	264,7	-24,42%	-4,91%
	V3-T15-S3	186,4	285,4	264,7	-53,11%	-7,82%
T52	V3-T52-K1	88,1	101,5	111,9	-15,21%	9,29%
	V3-T52-K2	95,2	108,6	111,9	-14,08%	2,95%
	V3-T52-K3	100,8	113,5	111,9	-12,60%	-1,43%
	V3-T52-S1	90,3	116,3	125,4	-28,79%	7,26%
T61	V3-T61-K3	101,4	116,1	112,1	-14,50%	-3,57%
	V3-T61-K4	110,3	123,4	112,1	-11,88%	-10,08%
	V3-T61-S3	112,8	133,3	126,7	-18,17%	-5,21%
T82	V3-T82-K3	97,7	81,7	85,5	16,38%	4,44%
	V3-T82-S3	107,8	103,4	101,5	4,08%	-1,87%

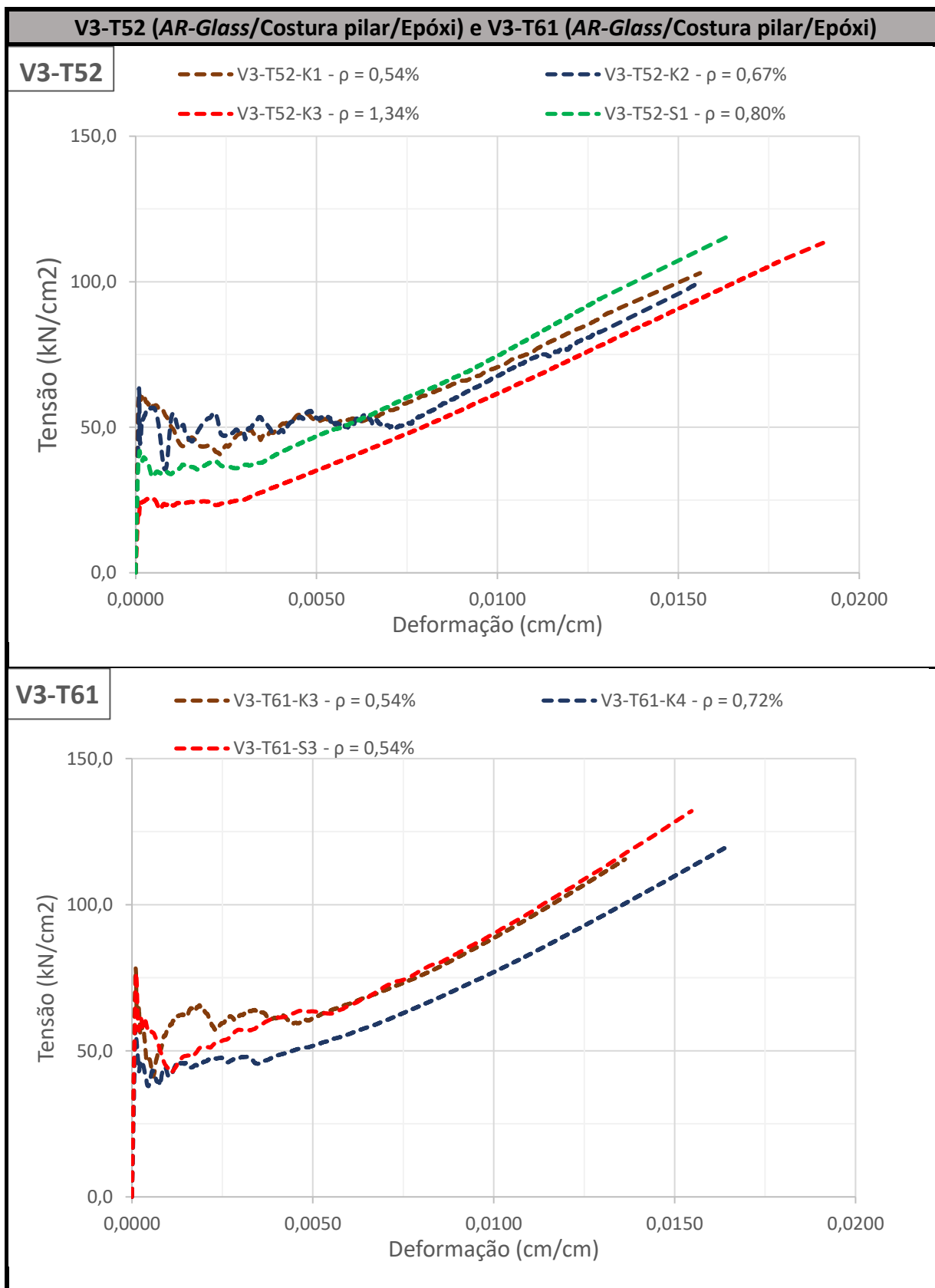
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.14 – Resultados dos experimentos V3-T01 e V3-T15

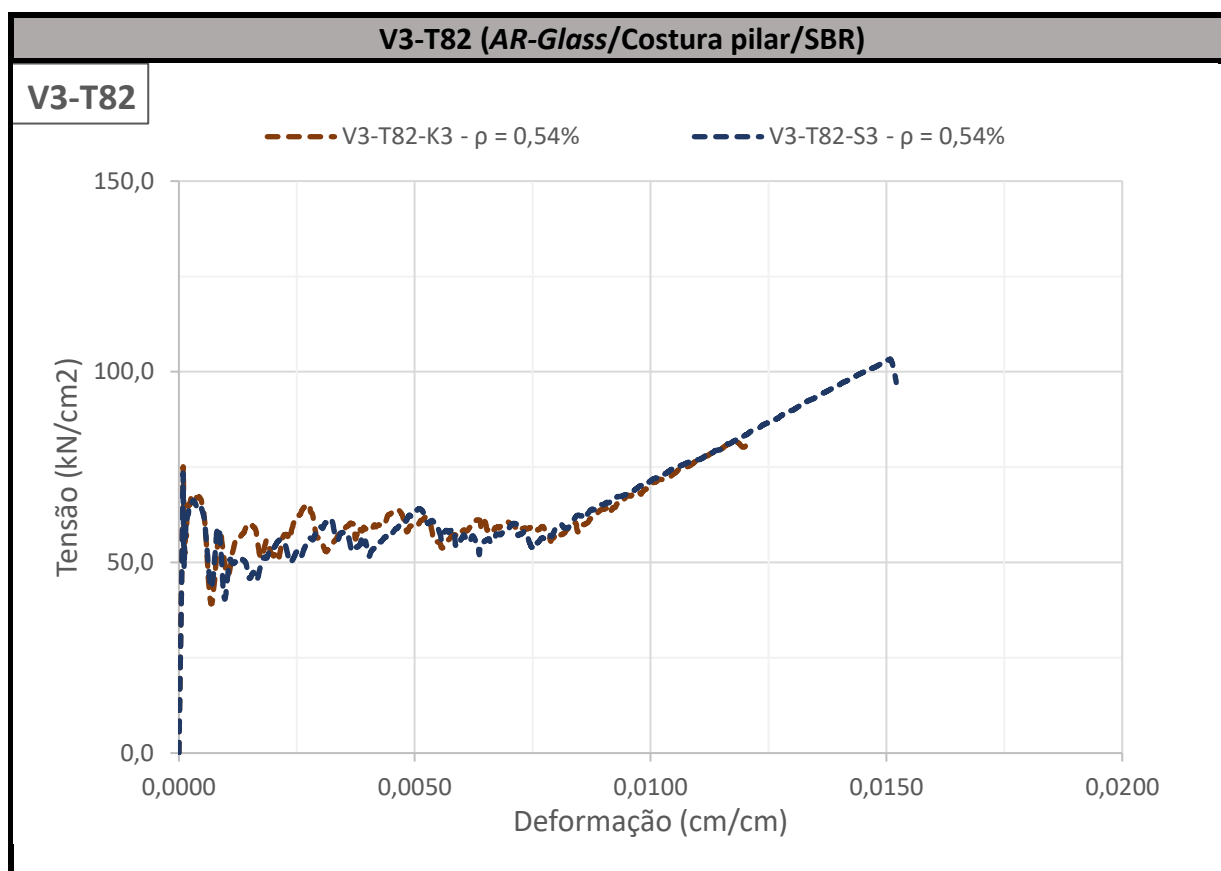


(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.15 – Resultados dos experimentos V3-T52 e V3-T61



(Fonte: elaborada pelo autor)

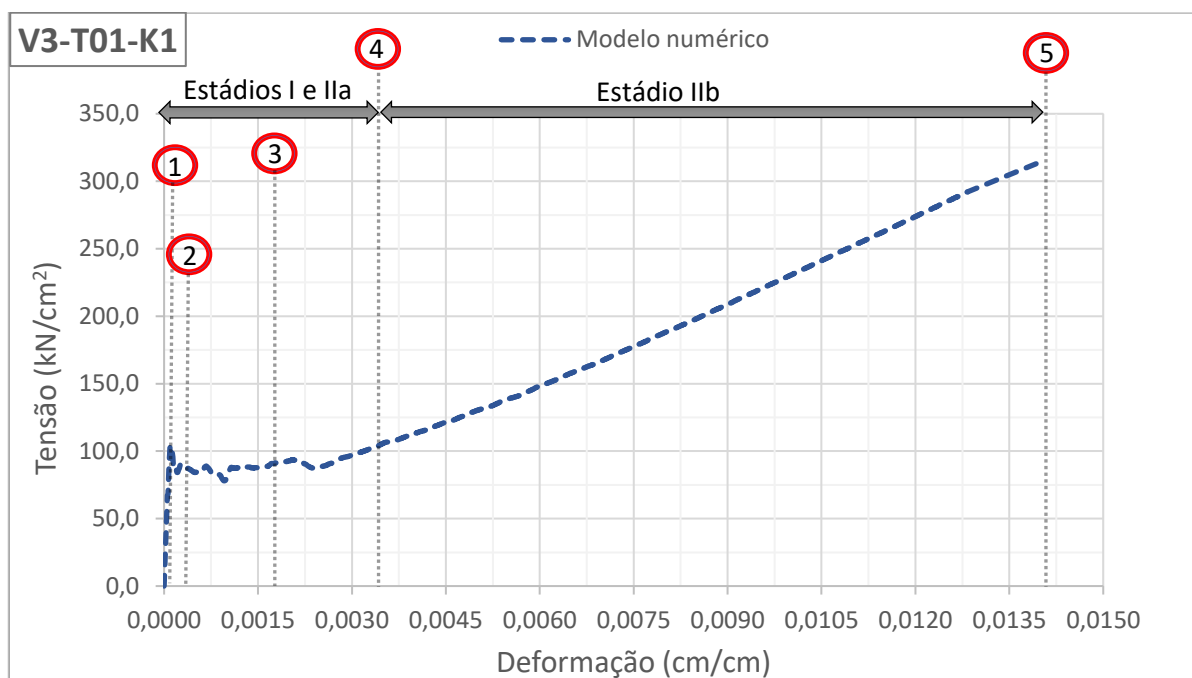
Quadro 5.16 – Resultados dos experimentos **V3-T82**

(Fonte: elaborada pelo autor)

5.3.5.2 Tensões e deformações no concreto **V3-T01-K1**

Para melhor visualização e entendimento dos processos evolutivos das tensões e deformações no concreto, foram determinados cinco instantes, conforme indicado na Figura 5.9, para ilustração das distribuições de tensão e deformação do modelo numérico **V3-T01-K1**.

Figura 5.9 – Instantes para apresentação das distribuições da tensão e deformação

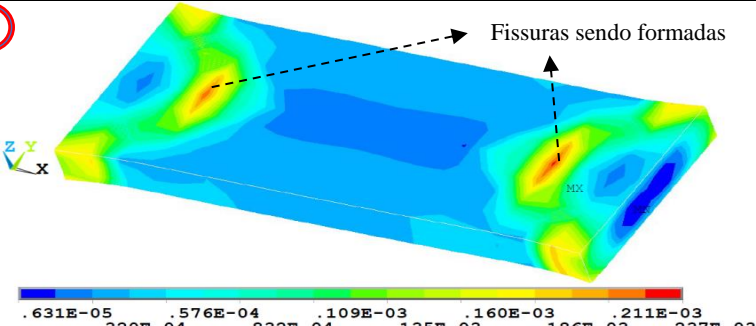
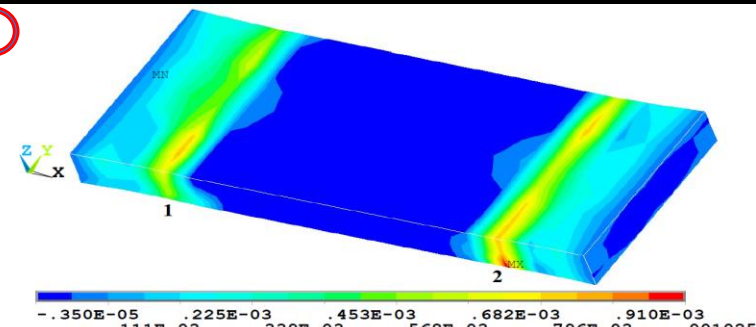
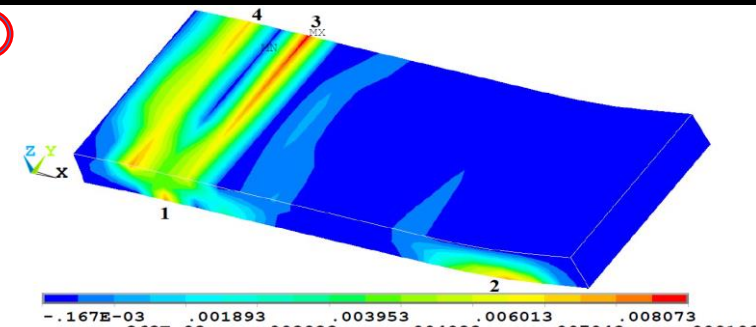
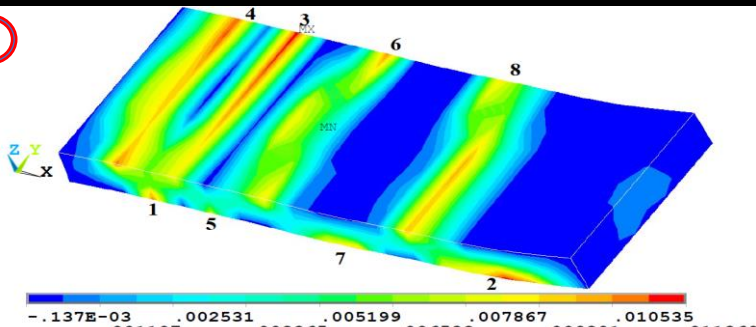
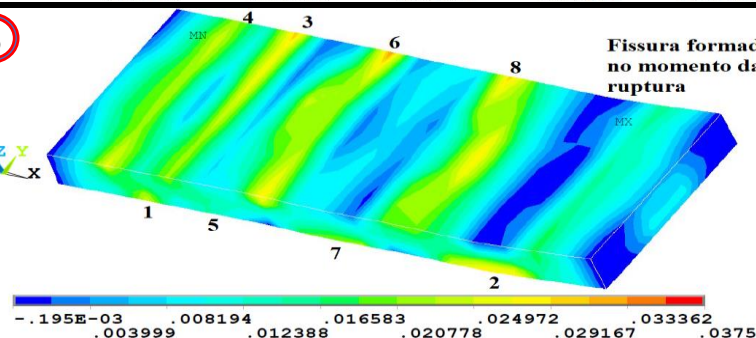


(Fonte: elaborada pelo autor)

No Quadro 5.17 apresenta-se o processo evolutivo das deformações no concreto. A primeira ilustração, refere-se ao instante que ocorre a transição entre os estádios I e IIa, quando se inicia o processo de fissuração no concreto. Em seguida, têm-se a representação das primeiras fissuras formadas ao longo da seção transversal da peça. Nota-se que, para cada fissura, foi posicionado um número representando a ordem da sequência de formação de fissuras. Na terceira imagem, percebe-se que, à medida que se avança no estágio IIa, ocorrem mais formações de fissuras, o que é previsto de acordo com Voss (2008) e Kulas (2013). Já a quarta figura, ilustrada no Quadro 5.17, representa o instante de término do estágio IIa e início do estágio IIb, quando se encerra o processo de fissuração com oito fissuras formadas.

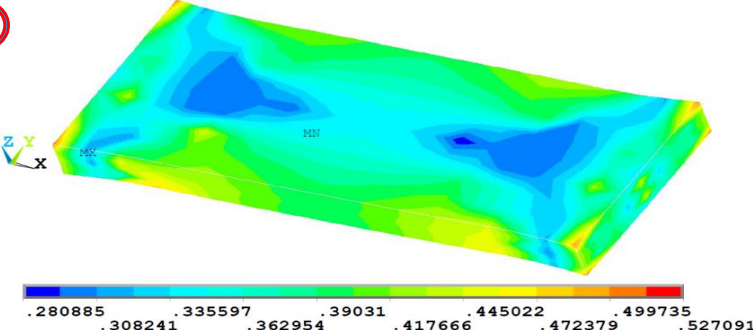
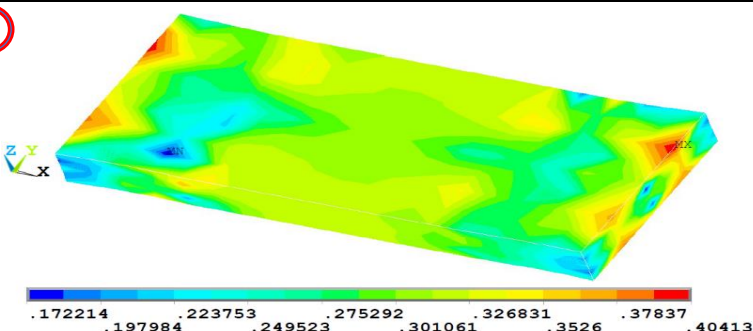
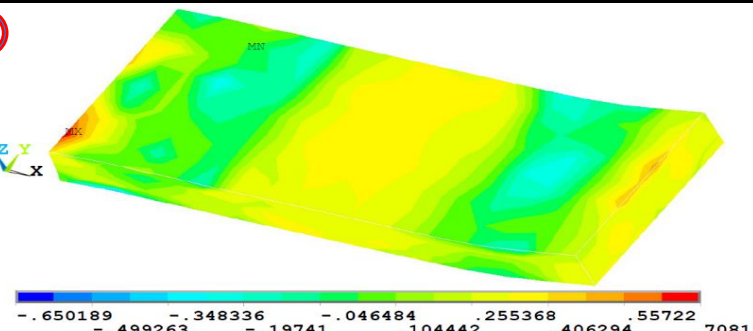
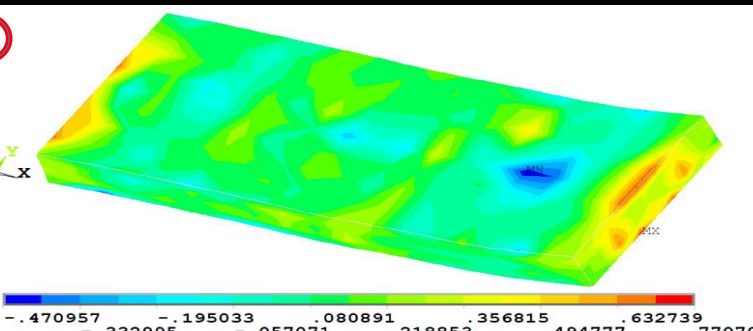
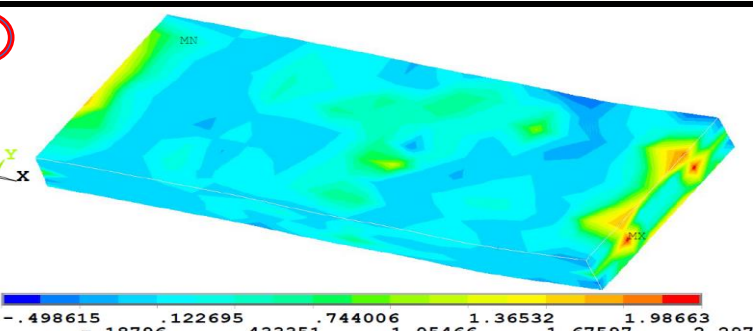
A última situação retratada refere-se à ruptura do concreto têxtil. Neste instante, pode-se perceber que, em relação a figura anterior, houve incremento de apenas uma fissuração no modelo. Entretanto, como a fissura adicional surge no instante da ruptura do TRC, pode-se afirmar que, ao longo do trecho de estágio IIb, não ocorreu processo de formação de fissura, o qual foi cessado com o fim do estágio IIa, como observado por Kulas (2013). Já o Quadro 5.18 apresenta a evolução das tensões na direção x no concreto. Percebe-se que, à medida que ocorre o processo de fissuração, o concreto vai perdendo sua capacidade resistente.

Quadro 5.17 – Evolução da distribuição de deformação no concreto para o caso V3-T01-K1

Detalhes	Deformação em X no concreto (cm/cm)
<p>Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa</p>	<p>①</p> 
<p>Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.</p>	<p>②</p> 
<p>Continuação do processo de fissuração, com aumento do número de fissuras. Estádio IIa.</p>	<p>③</p> 
<p>Fim do processo de fissuração, sendo estabelecido o número de 8 fissuras formadas. Mudança do estágio IIa para IIb</p>	<p>④</p> 
<p>Instante da ruptura do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.</p>	<p>⑤</p> 

(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.18 – Evolução da distribuição de tensão no concreto para o caso V3-T01-K1

Detalhes	Tensão em X no concreto (kN/cm ²)
<p>①</p> <p>Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa</p>	
<p>②</p> <p>Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.</p>	
<p>③</p> <p>Continuação do processo de fissuração, com aumento do número de fissuras. Estádio IIa.</p>	
<p>④</p> <p>Fim do processo de fissuração. Mudança do estágio IIa para IIb</p>	
<p>⑤</p> <p>Instante da ruptura do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.</p>	

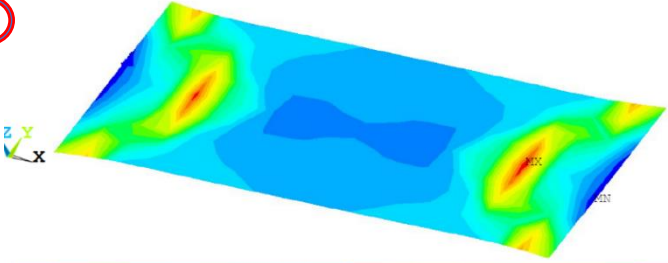
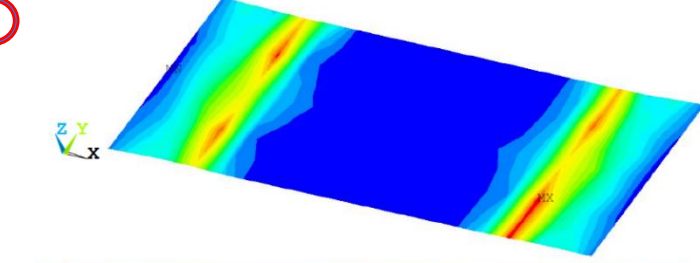
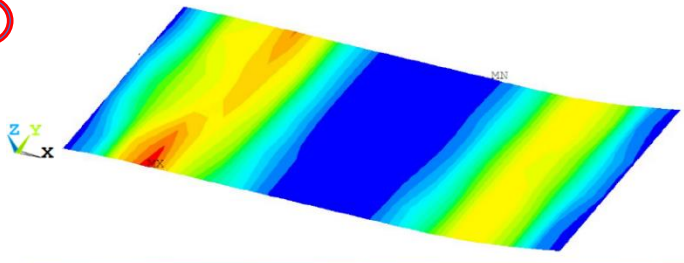
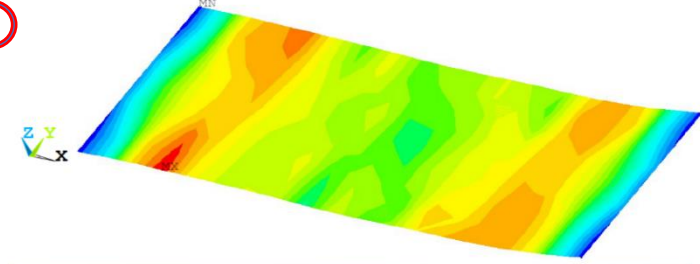
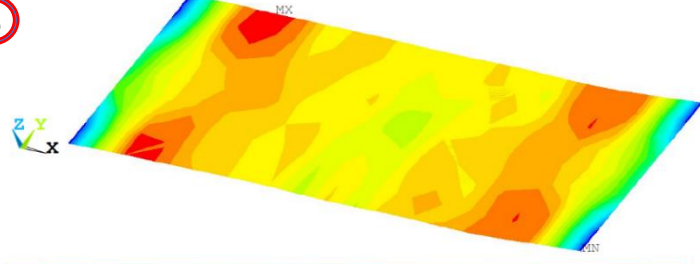
(Fonte: elaborada pelo autor)

5.3.5.3 Tensões e deformações na malha **V3-01-K1**

A visualização dos processos evolutivos das tensões e deformações na malha foi realizada de maneira similar ao tópico anterior, onde foram determinados os cinco pontos de análise para ilustração das distribuições de tensão e deformação do modelo numérico **V3-T01-K1**.

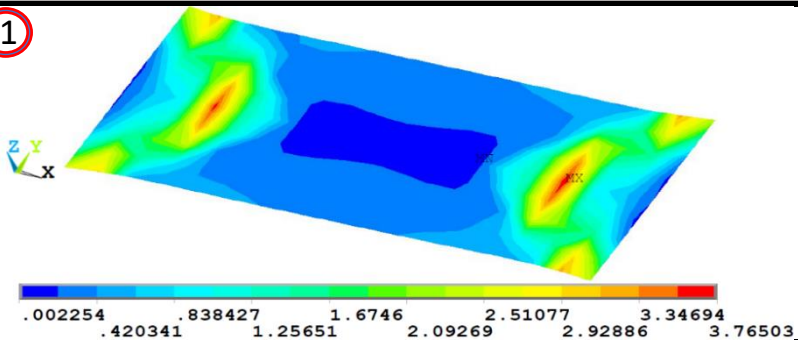
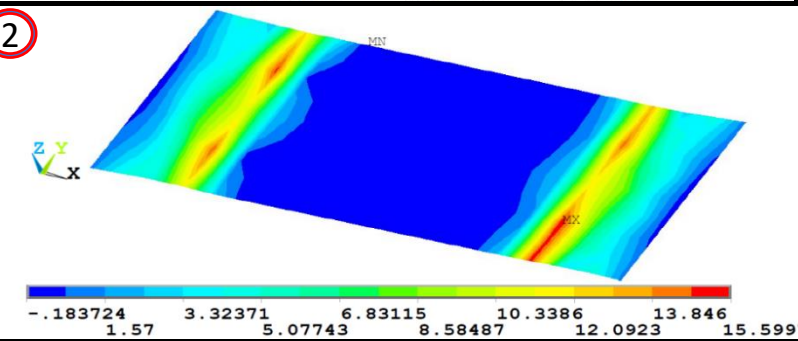
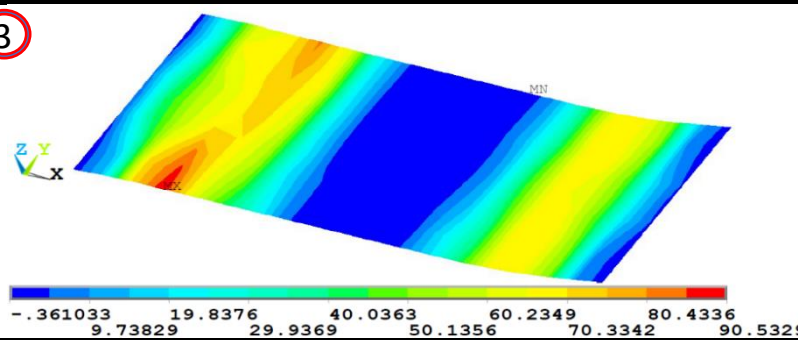
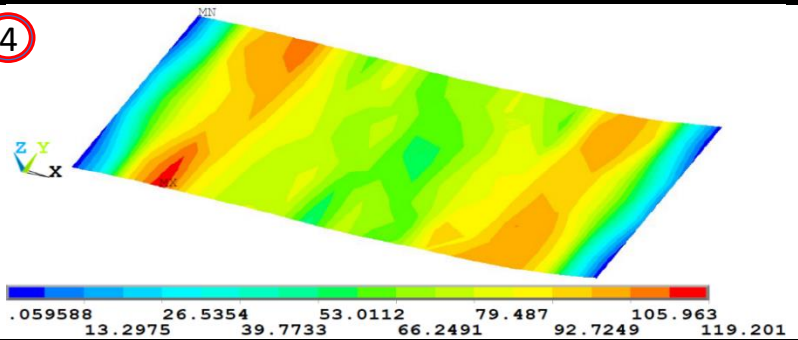
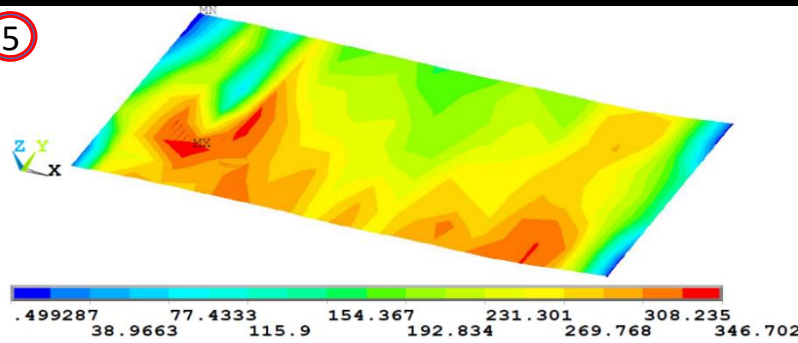
Nos Quadros 5.19 e 5.20 são ilustradas, respectivamente, as evoluções das deformações e tensões na malha têxtil. Nelas, pode-se observar a maior sollicitação na malha de acordo com o aumento do processo de fissuração do concreto. Isso ocorre em decorrência da redução da capacidade resistiva do concreto fissurado, o que provoca a transmissão dos esforços para a malha têxtil. Com o término do processo de fissuração, percebe-se a manutenção, até o instante da ruptura da malha têxtil, da localização das regiões com maiores tensões na malha. Isto indica a ausência de novas fissuras ao longo do estágio IIb. Por fim, nas últimas ilustrações de cada quadro são retratadas as distribuições de deformação e tensão um *substep* antes do instante da falha. Analisando a tensão máxima ($346,7 \text{ kN/cm}^2$) apresentada na quinta figura do Quadro 5.20, verifica-se a sua proximidade com a tensão máxima atribuída a malha “T01” (354 kN/cm^2). Deve-se citar que, com o incremento de mais um *substep*, a tensão na malha ultrapassa o valor de 354 kN/cm^2 , o que caracteriza a ruptura da malha.

Quadro 5.19 – Evolução da distribuição de deformação na malha para o caso V3-T01-K1

Detalhes	Deformação em X na malha (cm/cm)
<p>①</p> <p>Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa</p>	 <p>.628E-05 .542E-04 .102E-03 .150E-03 .198E-03 .302E-04 .781E-04 .126E-03 .174E-03 .222E-03</p>
<p>②</p> <p>Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.</p>	 <p>-.719E-05 .180E-03 .366E-03 .553E-03 .740E-03 .862E-04 .273E-03 .460E-03 .646E-03 .833E-03</p>
<p>③</p> <p>Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.</p>	 <p>.172E-06 .001056 .002112 .003168 .004224 .528E-03 .001584 .00264 .003696 .004752</p>
<p>④</p> <p>Fim do processo de fissuração. Mudança do estágio IIa para IIb</p>	 <p>.764E-05 .001395 .002782 .004169 .005557 .701E-03 .002088 .003476 .004863 .00625</p>
<p>⑤</p> <p>Instante da ruptura da malha têxtil e do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.</p>	 <p>.387E-03 .004276 .008165 .012054 .015943 .002332 .006221 .01011 .013999 .017888</p>

(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.20 – Evolução da distribuição de tensão na malha para o caso V3-T01-K1

Detalhes	Evolução da distribuição de tensão na malha (kN/cm ²)
<p>Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa</p>	<p>①</p>  <p>0.002254 0.420341 0.838427 1.25651 1.6746 2.09269 2.51077 2.92886 3.34694 3.76503</p>
<p>Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.</p>	<p>②</p>  <p>-0.183724 1.57 3.32371 5.07743 6.83115 8.58487 10.3386 12.0923 13.846 15.5997</p>
<p>Continuação do processo de fissuração e maior solicitação na malha. Estádio IIa.</p>	<p>③</p>  <p>-0.361033 9.73829 19.8376 29.9369 40.0363 50.1356 60.2349 70.3342 80.4336 90.5329</p>
<p>Fim do processo de fissuração com altas tensões distribuídas ao longo de quase toda a malha. Mudança do estágio IIa para IIb</p>	<p>④</p>  <p>0.059588 13.2975 26.5354 39.7733 53.0112 66.2491 79.487 92.7249 105.963 119.201</p>
<p>Instante da ruptura da malha têxtil e do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.</p>	<p>⑤</p>  <p>0.499287 38.9663 77.4333 115.9 154.367 192.834 231.301 269.768 308.235 346.702</p>

(Fonte: elaborada pelo autor)

5.4 ANÁLISE DE ENSAIOS DE FLEXÃO

Neste tópico são apresentadas as modelagens numéricas realizadas dos experimentos de Kulas (2013) de flexão em laje e viga I. Para comparação dos comportamentos experimental e numérico, confrontam-se as curvas momento *versus* curvatura. A obtenção da curvatura no modelo numérico ocorre através da aplicação da equação (105) para uma mesma seção transversal.

$$\text{Curvatura} = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_c}{H_{t,c}} \quad (105)$$

Onde:

ε_t : deformação na malha têxtil;

ε_c : deformação no concreto;

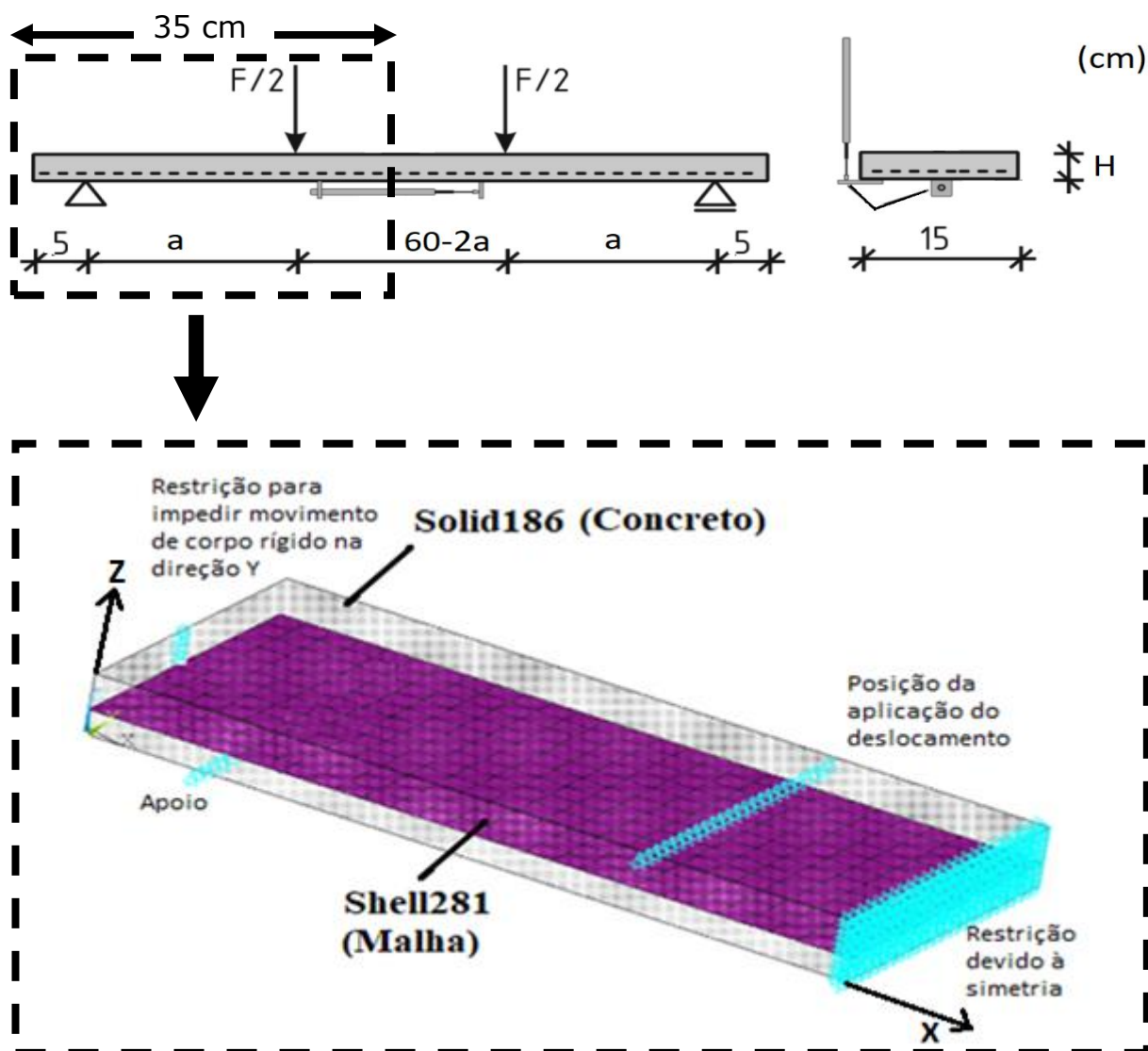
$H_{t,c}$: distância entre os pontos de captação da deformação do concreto e malha têxtil.

Durante a análise numérica dos ensaios à flexão foram utilizados os modelos de *Tension Stiffening* e retração e fluência já calibrados a partir da análise apresentada no Tópico 5.3. Deve-se destacar que, diferentemente da análise de peças sob tração uniaxial, quando se utilizou 72% do módulo de elasticidade da malha têxtil, o processo de análise de peças sob flexão não requer qualquer redução no módulo de elasticidade da malha têxtil.

5.4.1 Lajes

A modelagem numérica através do programa ANSYS considerou a existência de simetria geométrica e de carregamento, o que possibilitou execução computacional de apenas metade do experimento, conforme a Figura 5.10. Desta forma, o modelo numérico da laje apresenta as seguintes dimensões: 35 cm de comprimento, 15 cm de largura e espessura “H” variável entre 3 e 4 cm. Em relação às restrições, foram adicionados, para evitar movimento de corpo rígido, apoios simples na direção Y em todos os nós com pares de coordenadas X e Y iguais a 0 e 7,5, respectivamente. O apoio vertical existente no modelo experimental foi representado através da restrição de deslocamento na direção Z, enquanto que a simetria foi considerada através da restrição do deslocamento em X para todos os nós localizados na coordenada X = 35. O valor de “a”, ilustrado na Figura 5.10, varia entre 20 e 22,5 cm e representa a distância entre o apoio vertical e o local de aplicação de deslocamento.

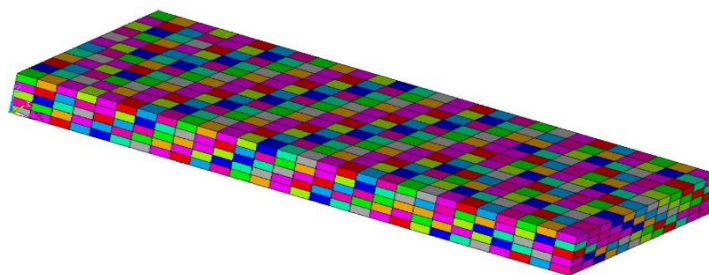
Figura 5.10 – Modelo da laje



(Fonte: elaborada pelo autor)

Para o estudo computacional dos ensaios à flexão de lajes em concreto têxtil, foi realizado o mesmo processo apresentado no Tópico 5.3 de calibração referente ao refinamento da malha e ao número de *substeps* mínimo. De maneira similar ao utilizado para os ensaios de tração uniaxial, foram empregadas as mesmas dimensões nas direções “X e Y” (1,25 cm e 1,25 cm) para os elementos finitos e utilizou-se um número de *substeps* mínimo entre 2000 e 6000. Já a dimensão do elemento finito na direção da espessura (“Z”) foi ajustada de acordo com o posicionamento da altura útil da malha têxtil na seção. Em geral, foram utilizados valores entre 0,5 e 0,625 cm para o tamanho do elemento finito na direção “Z”, de maneira que o refinamento da malha de elementos finitos é apresentado na Figura 5.11. A Tabela 5.11 fornece as características geométricas particulares de cada experimento analisado numericamente.

Figura 5.11 – Malha de elementos finitos utilizada para modelagem da laje



Número de elementos finitos = 2016

(Fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 5.11 – Características das lajes em TRC

Malha Têxtil	Experimento	Espessura "H" (cm)	Altura útil "d _T " (cm)	Distância apoio-carga "a" (cm)
T01	V4-T01-K1	3	1,8	20,0
	V4-T01-K2	3	1,5	22,5
	V4-T01-K3	3	1,9	20,0
	V4-T01-K4	3	1,6	20,0
T02	V4-T02-K2	3	1,9	20,0
	V4-T02-K2a	3	2,1	20,0
T52	V4-T52-K1	3	1,9	20,0
T81	V4-T81-K2	3	1,8	20,0
	V4-T81-K3	3	2,1	20,0
	V4-T81-S1	3	2,0	20,0
	V4-T81-S2	3	1,8	20,0
	V4-T81-S3	3	1,9	20,0
T82	V4-T82-K2	3	2,3	20,0
	V4-T82-K3	3	2,1	20,0
	V4-T82-K4	3	2,1	20,0
	V4-T82-K8	4	3,0	20,0

(Fonte: elaborada pelo autor)

A comparação dos resultados numéricos e experimentais é efetuada a partir do gráfico momento *versus* curvatura da laje. De maneira similar ao realizado por Kulas (2013), o momento foi obtido através da multiplicação da soma das forças reativas nos apoios com restrições na direção “Z” pela distância “a”, enquanto que a curvatura foi calculada de acordo com a equação (105) para a seção transversal correspondente à simetria da peça, onde a coordenada X é igual a 35 cm.

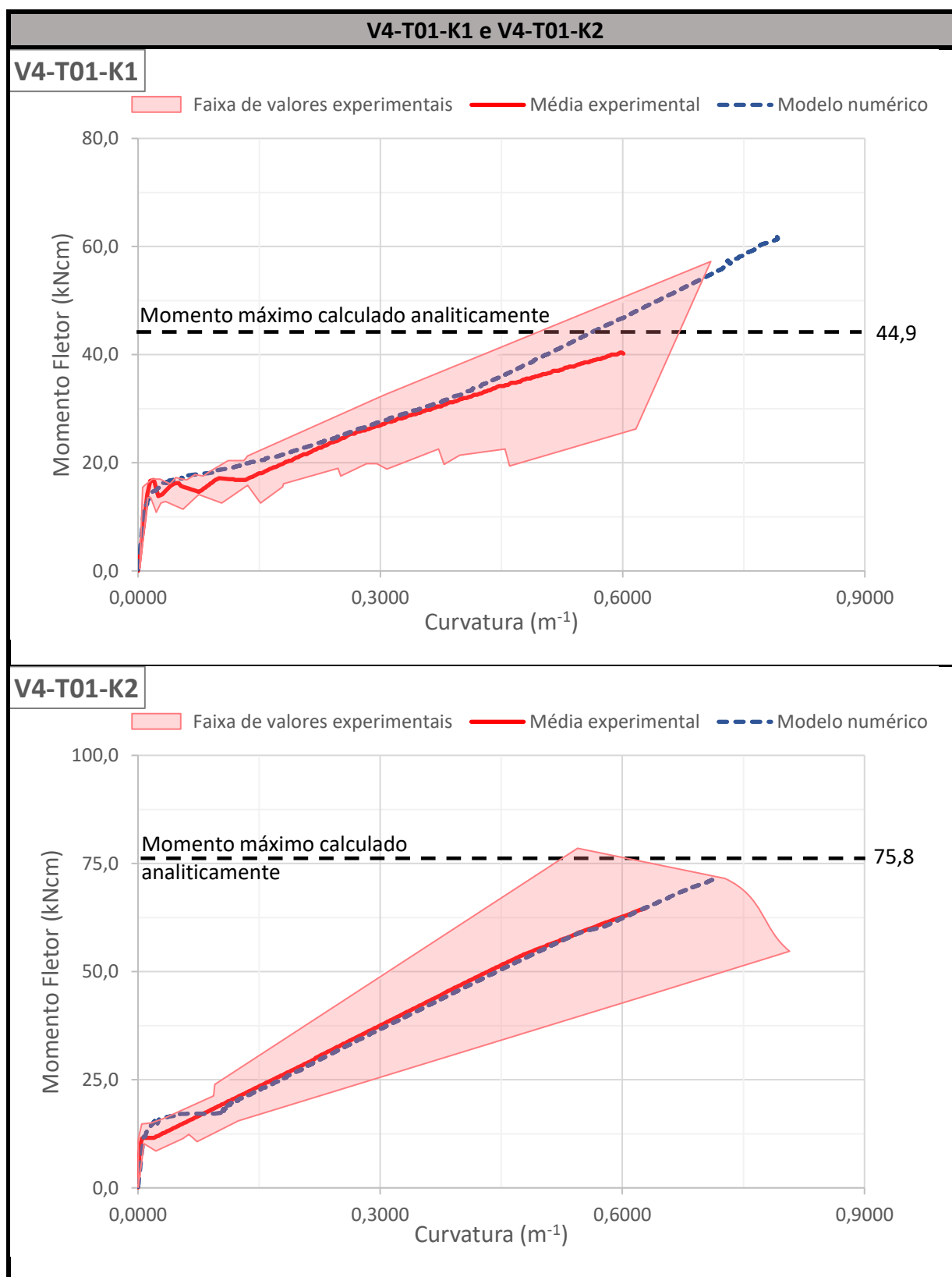
5.4.1.1 Resultados

Nesta seção são exibidos os resultados obtidos, através da análise numérica de lajes em concreto têxtil submetidas à flexão simples, para os exemplos indicados nas Tabelas 5.4 e 5.11. Para tanto, apresentam-se os gráficos momento *versus* curvatura, onde se demarcaram, também, os momentos máximos obtidos via o método analítico citado no tópico 2.5.2.2. Além da comparação gráfica, ilustra-se, para o exemplo **V4-T01-K1**, a evolução da distribuição de tensão e deformação no concreto e na malha têxtil. O Apêndice B apresenta o script de flexão simples em laje utilizado para modelagem numérica do exemplo **V4-T01-K1**.

5.4.1.2 Curvas momento *versus* curvatura

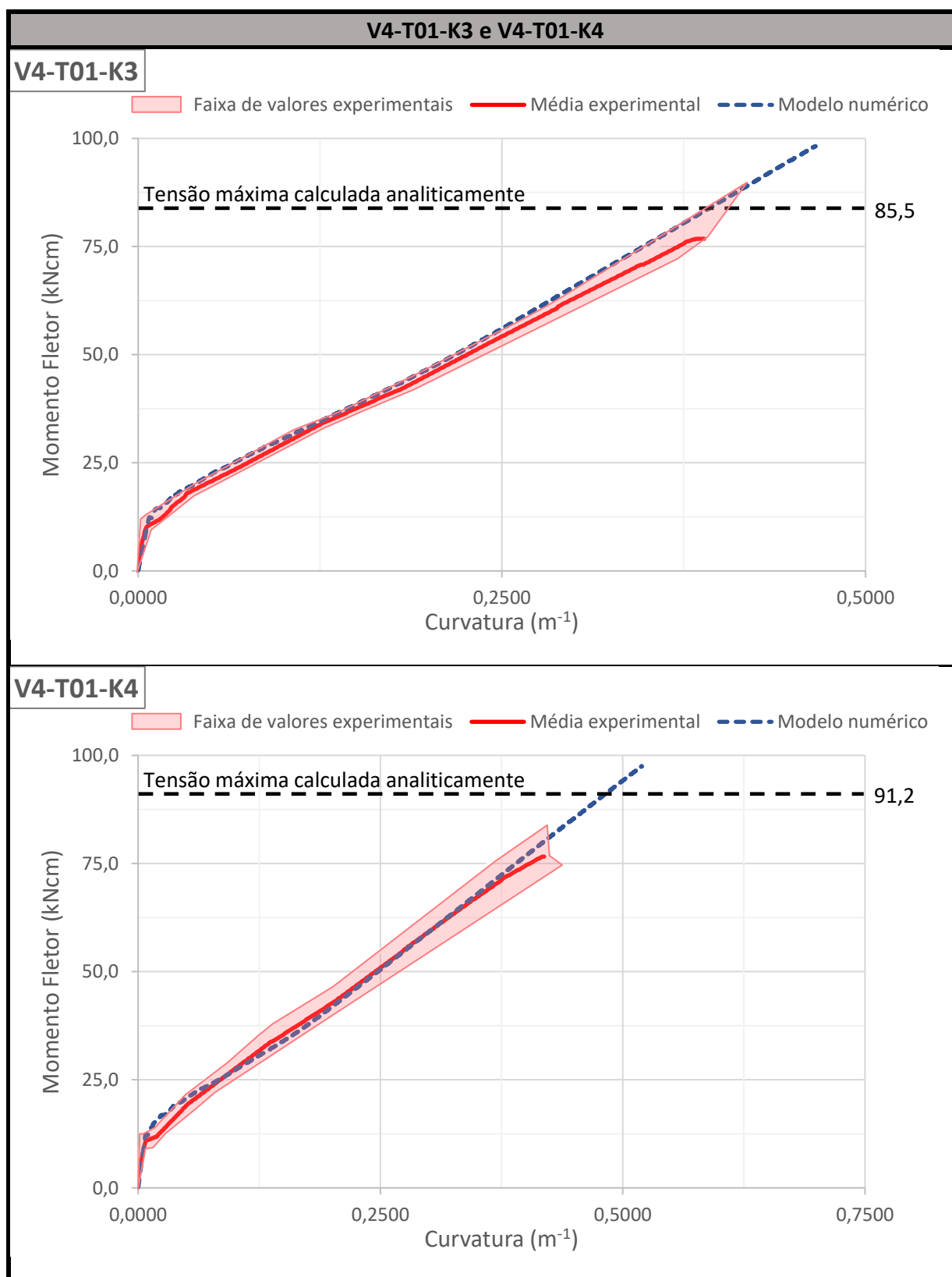
As curvas numéricas momento *versus* curvatura foram determinadas até o instante da ruptura, a qual pode ocorrer em função do esgotamento da capacidade de tração da malha ou do esmagamento do concreto. Para ambos os casos, após a manifestação de um destes efeitos, as curvas desenvolvem um comportamento altamente instável e de queda, de maneira que, para melhor apresentação, ilustram-se os gráficos até o instante de início da instabilidade. Ao total, foram analisadas 16 lajes em TRC solicitadas à flexão simples. Em geral, as curvas numéricas e experimentais confrontadas tiveram boa concordância em todos os estádios. A diferença existente entre os momentos de ruptura numérico e experimental, para casos onde houve esmagamento do concreto, pode ser justificada a partir da adoção dos parâmetros de deformação na máxima tensão na compressão (ϵ_{c1}) e deformação de compressão última (ϵ_{cu}) através do *CEB-FIP Model Code 2010* (2012). Os valores sugeridos, pelo código citado, se diferenciam, um pouco, do obtido por Kulas (2013) para a média do concreto de traço “C1”. Enquanto Kulas (2013) obteve ϵ_{c1} igual a 2,4 ‰ para a média do concreto “C1”, o código *CEB-FIP Model Code 2010* (2012) indica, para concretos com $f_{cm} = 8,7$ MPa, a utilização de 2,7‰ como valor de ϵ_{c1} . Os Quadros 5.21 até 5.28 apresentam as curvas experimentais momento *versus* curvatura confrontadas às obtidas via análise numérica por meio do programa ANSYS.

Quadro 5.21 – Resultados dos experimentos V4-T01-K1 e V4-T01-K2



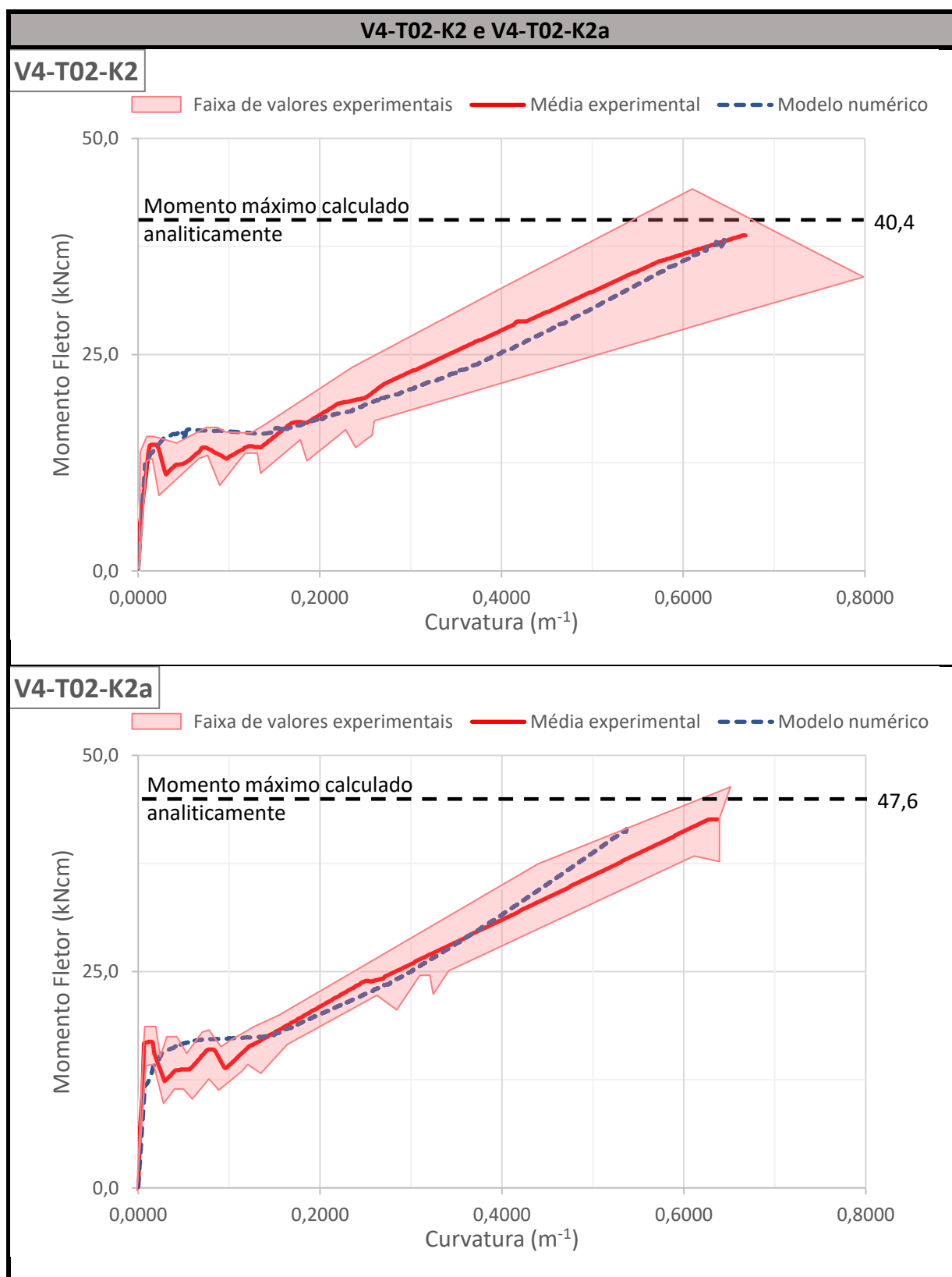
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.22 – Resultados dos experimentos V4-T01-K3 e V4-T01-K4



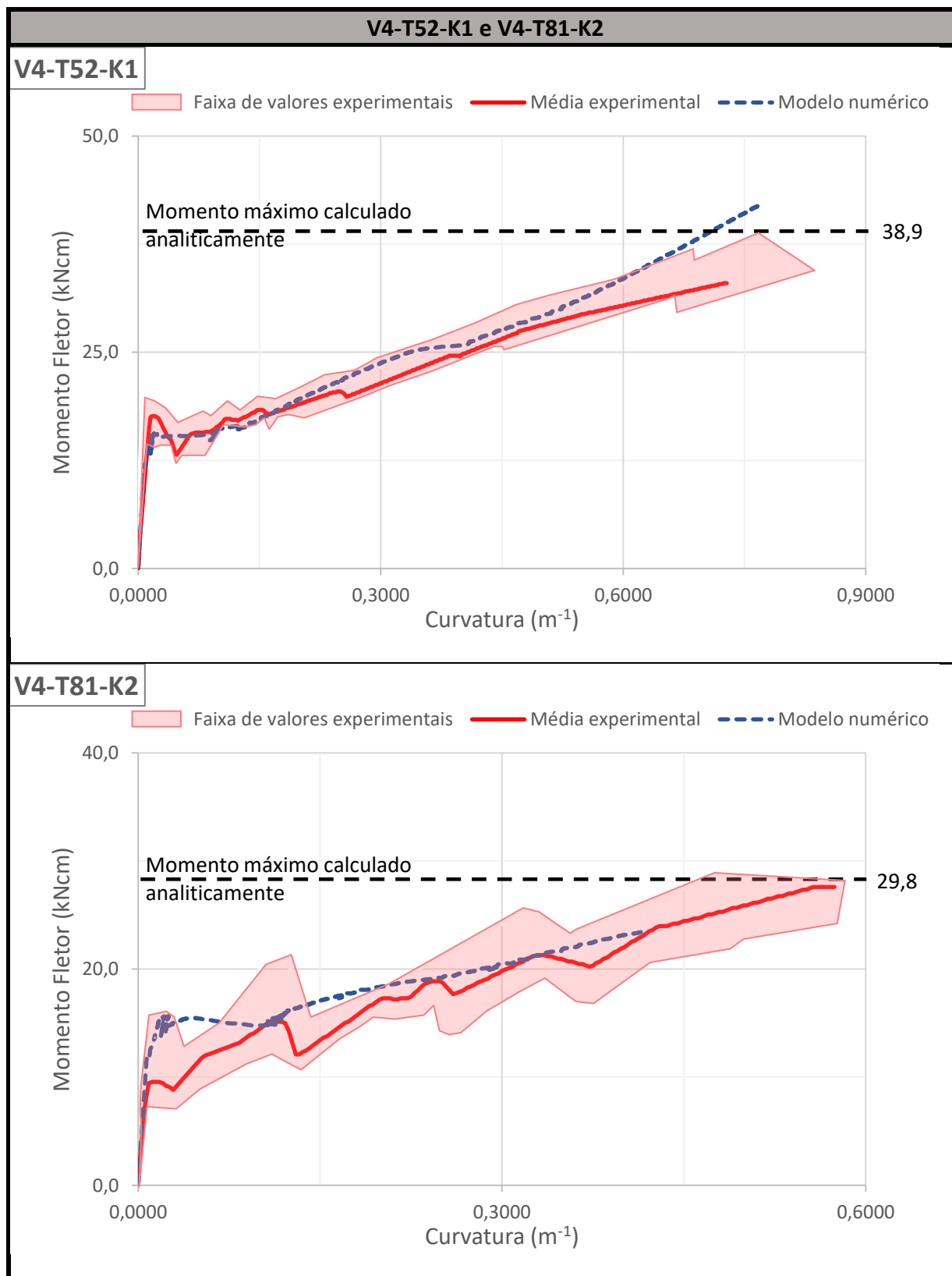
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.23 – Resultados dos experimentos V4-T02-K2 e V4-T02-K2a



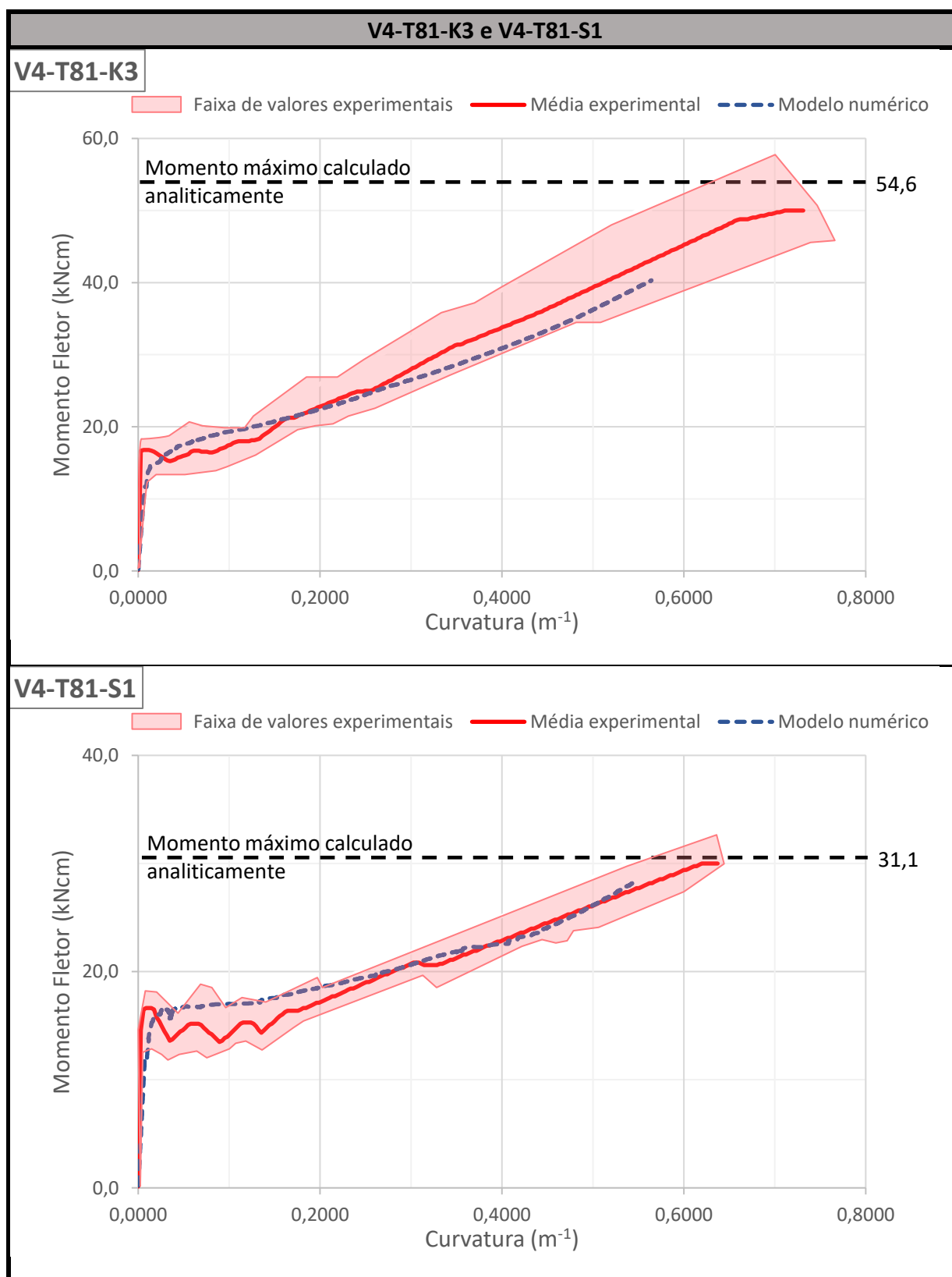
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.24 – Resultados dos experimentos V4-T52-K1 e V4-T81-K2



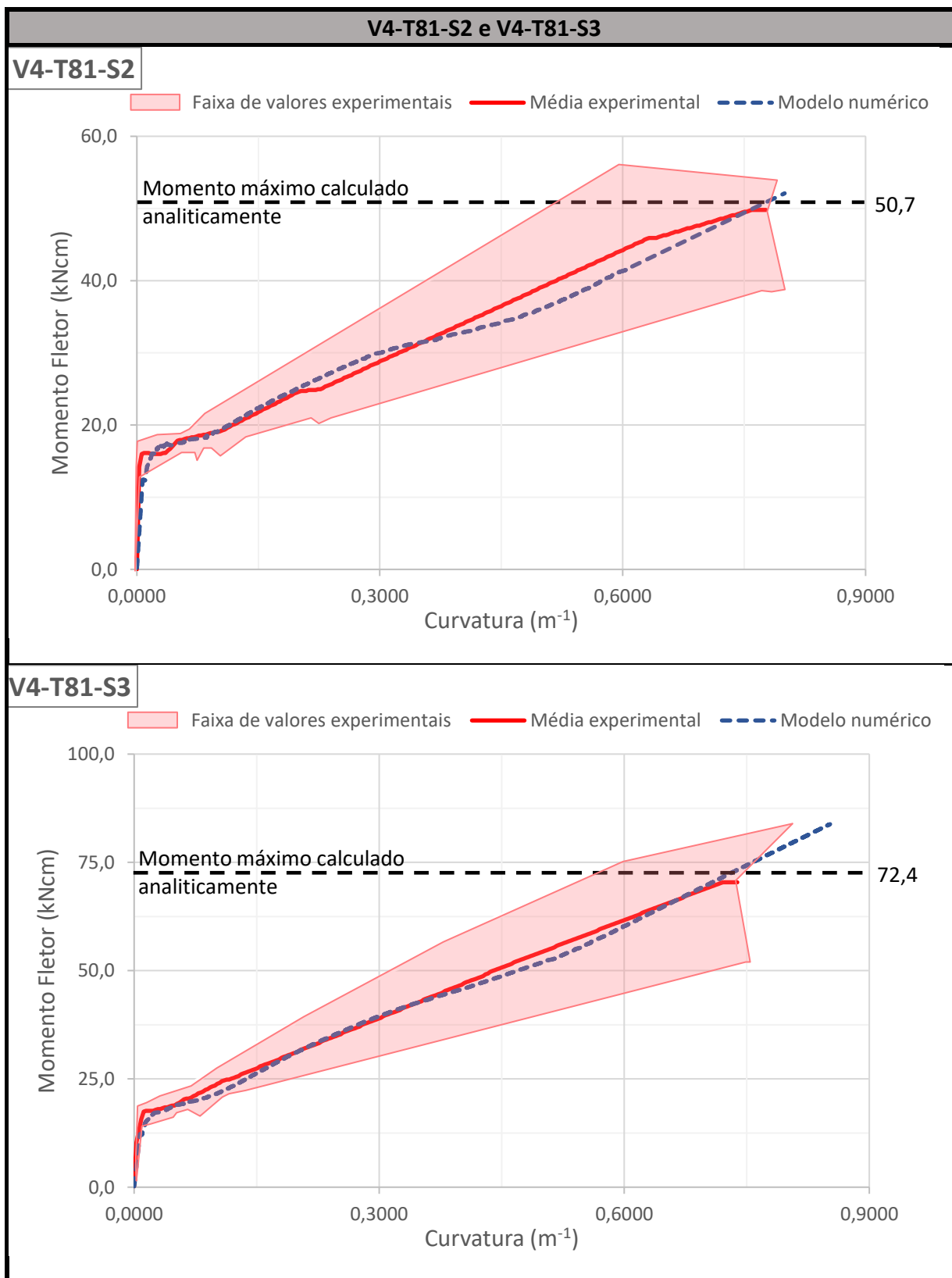
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.25 – Resultados dos experimentos V4-T81-K3 e V4-T81-S1



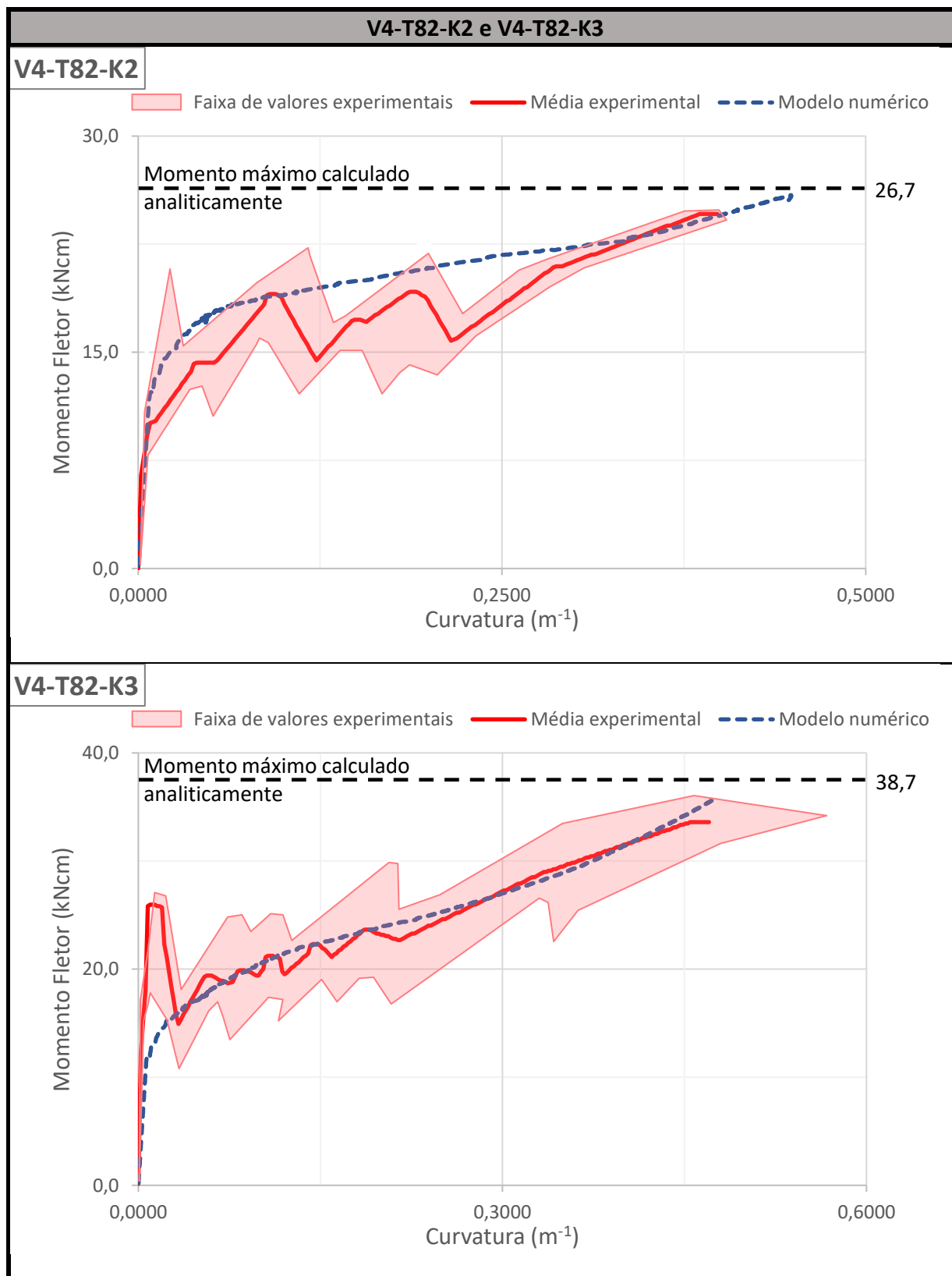
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.26 – Resultados dos experimentos V4-T81-S2 e V4-T81-S3



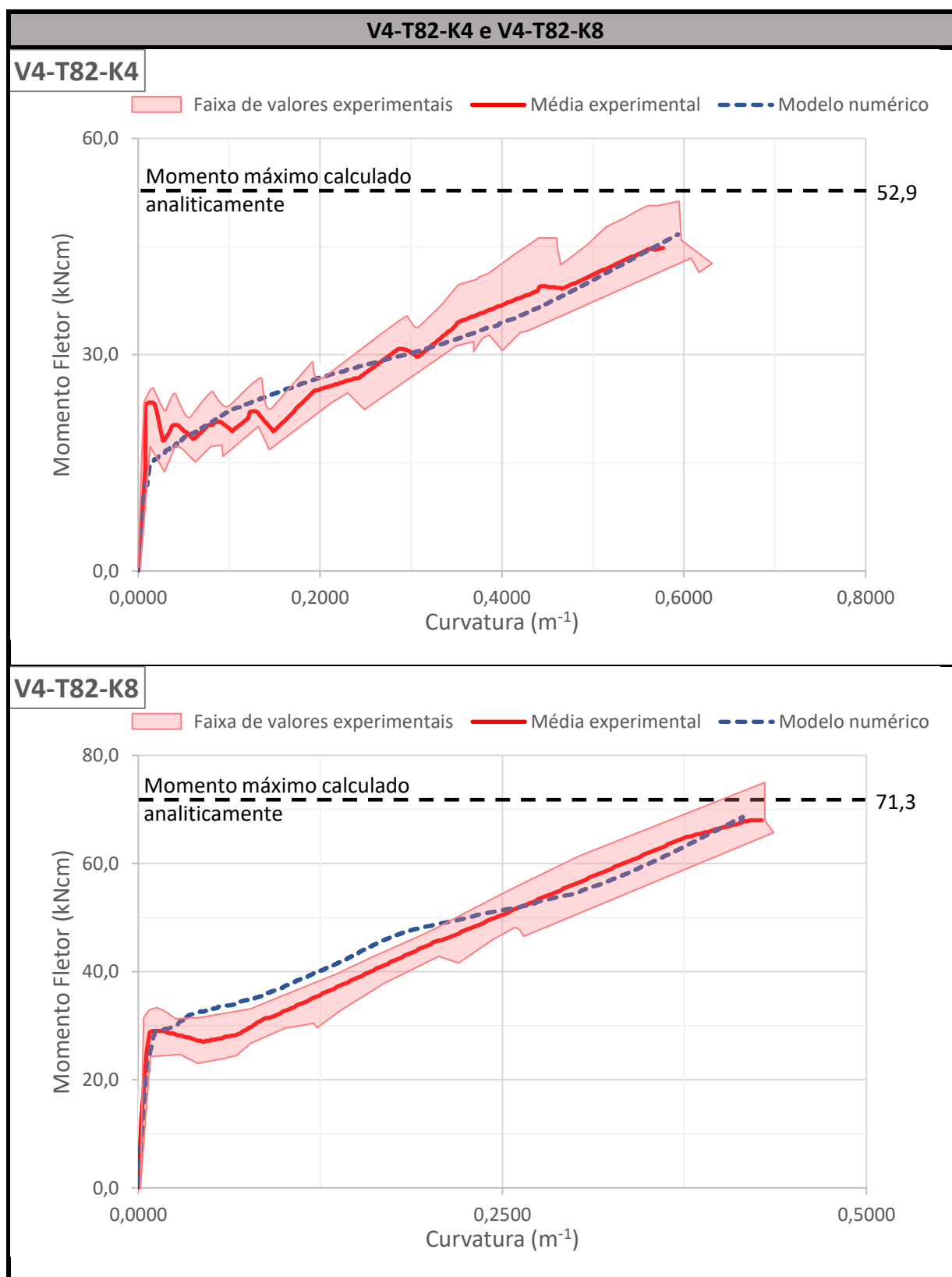
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.27 – Resultados dos experimentos V4-T82-K2 e V4-T82-K3



(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.28 – Resultados dos experimentos V4-T82-K4 e V4-T82-K8



(Fonte: elaborada pelo autor)

A Tabela 5.12 exhibe, para cada experimento analisado, os momentos fletores na ruptura conforme a média experimental, modelo numérico e processo analítico. A partir destes valores, apresentam-se, também, os erros relativos entre o valor numérico e os valores experimental e analítico. Além das comparações citadas, identificam-se os modos de ruptura obtidos experimentalmente e numericamente. As falhas captadas podem ocorrer por esmagamento do concreto ou esgotamento da capacidade à tração da malha têxtil. Analisando os valores dos erros obtidos, torna-se nítido o maior erro relativo apresentado para os experimentos que romperam por esmagamento do concreto. Esta característica decorre da modelagem a partir de parâmetros fornecidos conforme o *CEB-FIP Model Code 2010* (2012). Apesar da dificuldade de se detectar o exato instante da ruptura por esmagamento do concreto, pode-se dizer que os modelos numéricos apresentaram um comportamento condizente ao observado experimentalmente pelas lajes em TRC submetidas à flexão simples. Por fim, como citado no Tópico 5.3.5.1, evidencia-se a grande variabilidade apresentada entre os resultados experimentais, o que sugere que a uma única comparação por meio da média experimental pode ser equivocada.

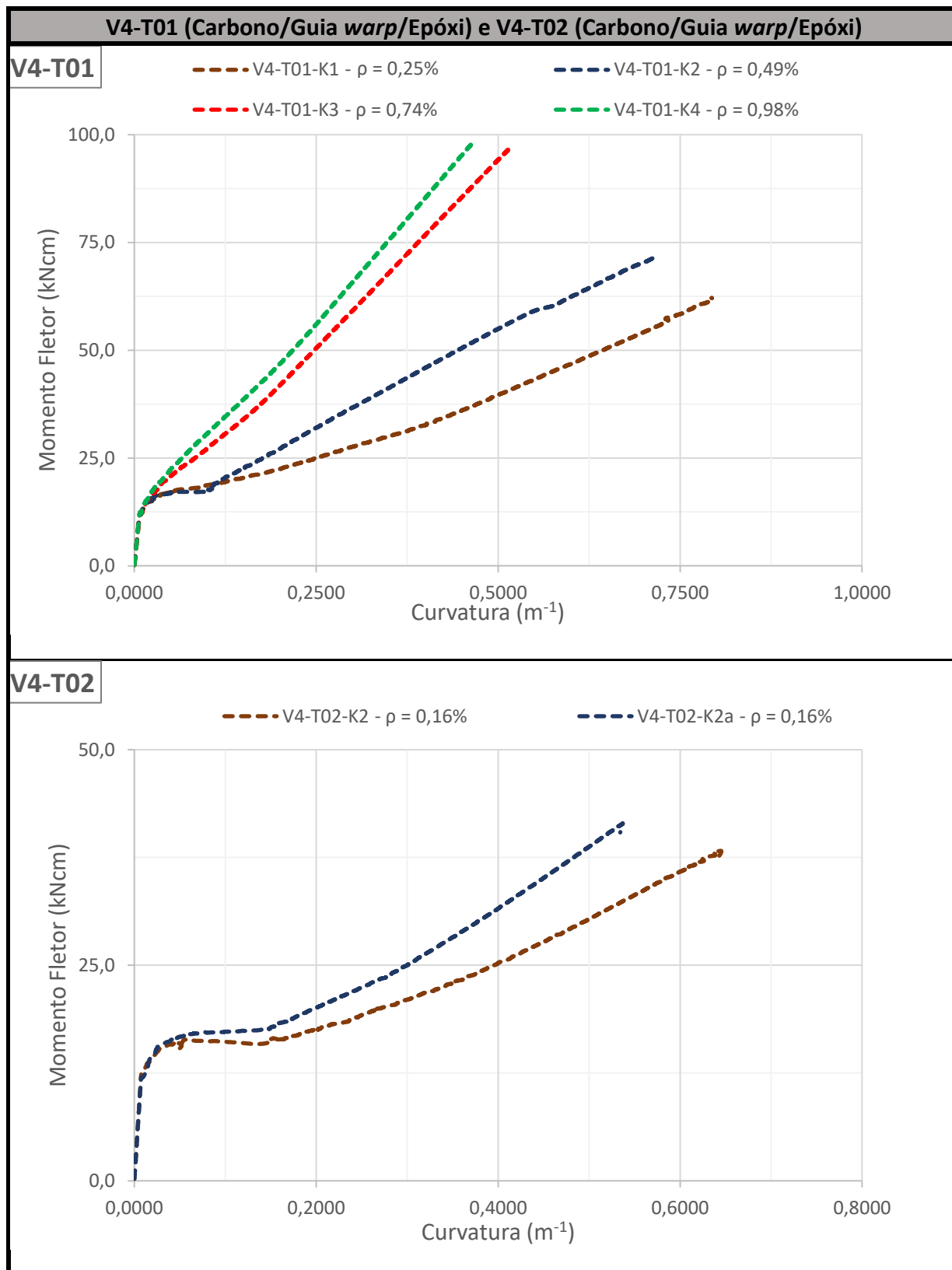
Por fim, apresentam-se, nos Quadros 5.29, 5.30 e 5.31, as curvas numéricas tensão *versus* deformação para cada tipo de malha. De maneira similar ao analisado para os ensaios de tração uniaxial, percebe-se que, quanto menor a taxa de armadura utilizada, mais instável e longa se torna a região do estágio IIa. Além deste aspecto, observa-se que a inclinação do estágio IIb varia de acordo com a taxa de armadura adotada e que a capacidade resistente de peças com malha têxtil em carbono é superior à apresentada por peças com malha têxtil em fibra AR-glass.

Tabela 5.12 – Resultados das análises de lajes em TRC sob flexão

Malha	Experimento	Momento fletor na ruptura (kNcm)			MODO DE RUPTURA		Erro (%)	
		Média Exper.	Num.	Analítico	Exper.	Num.	Num./Exper.	Num./Analítico
T01	V4-T01-K1	40,00	61,30	44,90	Esmag. concreto	Malha têxtil	53,25%	36,53%
	V4-T01-K2	64,00	72,10	75,80	Esmag. concreto	Esmag. concreto	12,66%	-4,88%
	V4-T01-K3	77,00	98,50	85,50	Esmag. concreto	Esmag. concreto	27,92%	15,20%
	V4-T01-K4	77,00	98,30	91,20	Esmag. concreto	Esmag. concreto	27,66%	7,79%
T02	V4-T02-K2	39,00	38,30	40,40	Malha têxtil	Malha têxtil	-1,79%	-5,20%
	V4-T02-K2a	43,00	41,50	47,60	Malha têxtil	Malha têxtil	-3,49%	-12,82%
T52	V4-T52-K1	33,00	41,80	38,90	Esmag. concreto	Malha têxtil	26,67%	7,46%
T81	V4-T81-K2	28,00	23,60	29,80	Malha têxtil	Malha têxtil	-15,71%	-20,81%
	V4-T81-K3	50,00	40,60	54,60	Malha têxtil	Malha têxtil	-18,80%	-25,64%
	V4-T81-S1	30,00	28,70	31,10	Esmag. concreto	Malha têxtil	-4,33%	-7,72%
	V4-T81-S2	50,00	52,10	50,70	Esmag. concreto	Malha têxtil	4,20%	2,76%
	V4-T81-S3	70,00	83,30	72,40	Esmag. concreto	Malha têxtil	19,00%	15,06%
T82	V4-T82-K2	25,00	25,90	26,60	Malha têxtil	Malha têxtil	3,60%	-2,63%
	V4-T82-K3	34,00	37,30	38,70	Malha têxtil	Malha têxtil	9,71%	-3,62%
	V4-T82-K4	46,00	49,30	52,90	Malha têxtil	Malha têxtil	7,17%	-6,81%
	V4-T82-K8	68,00	68,60	71,30	Malha têxtil	Malha têxtil	0,88%	-3,79%

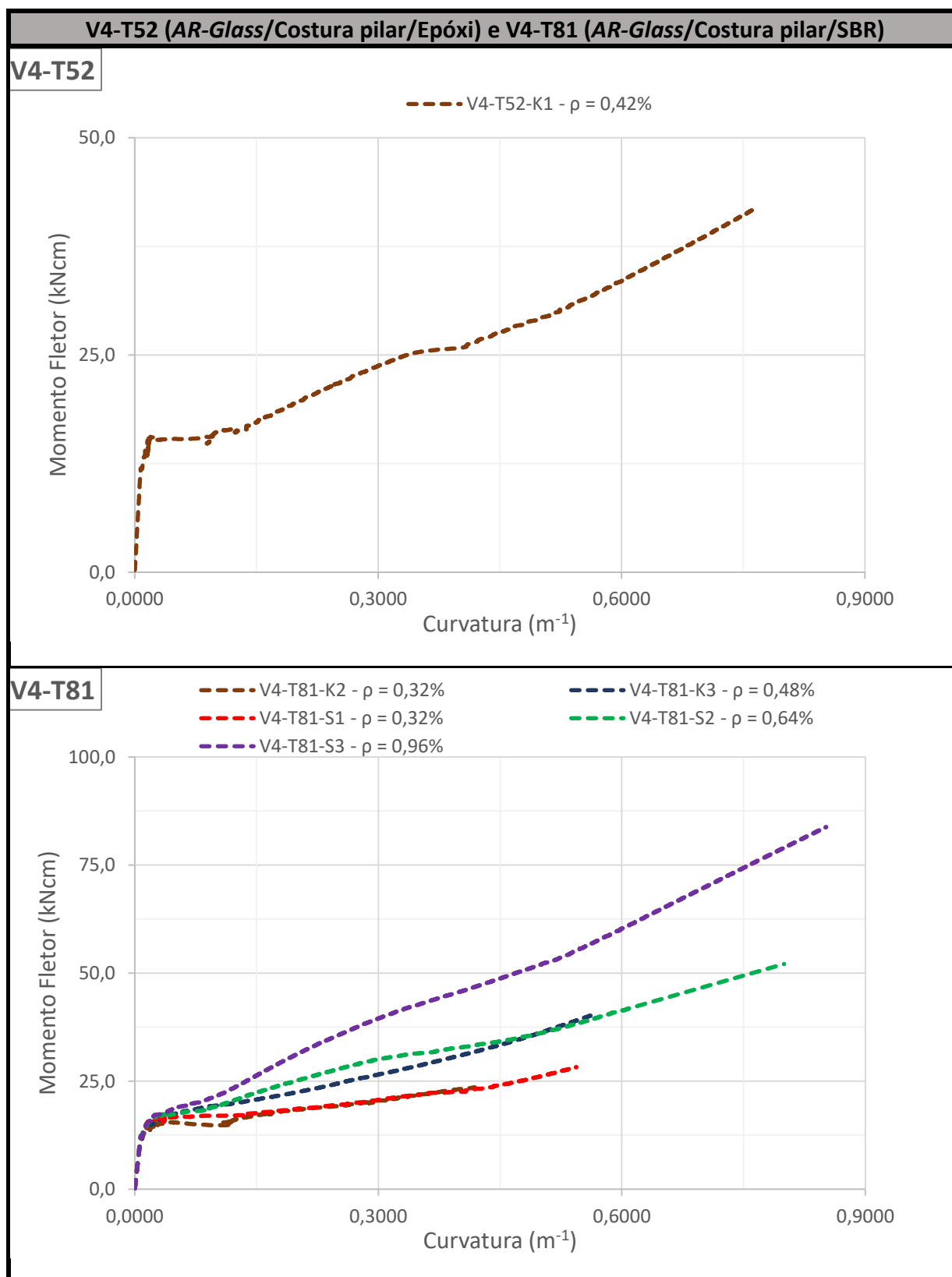
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.29 – Resultados dos experimentos V4-T01 e V4-T02 (Mudar taxa v4-t01k-k1)

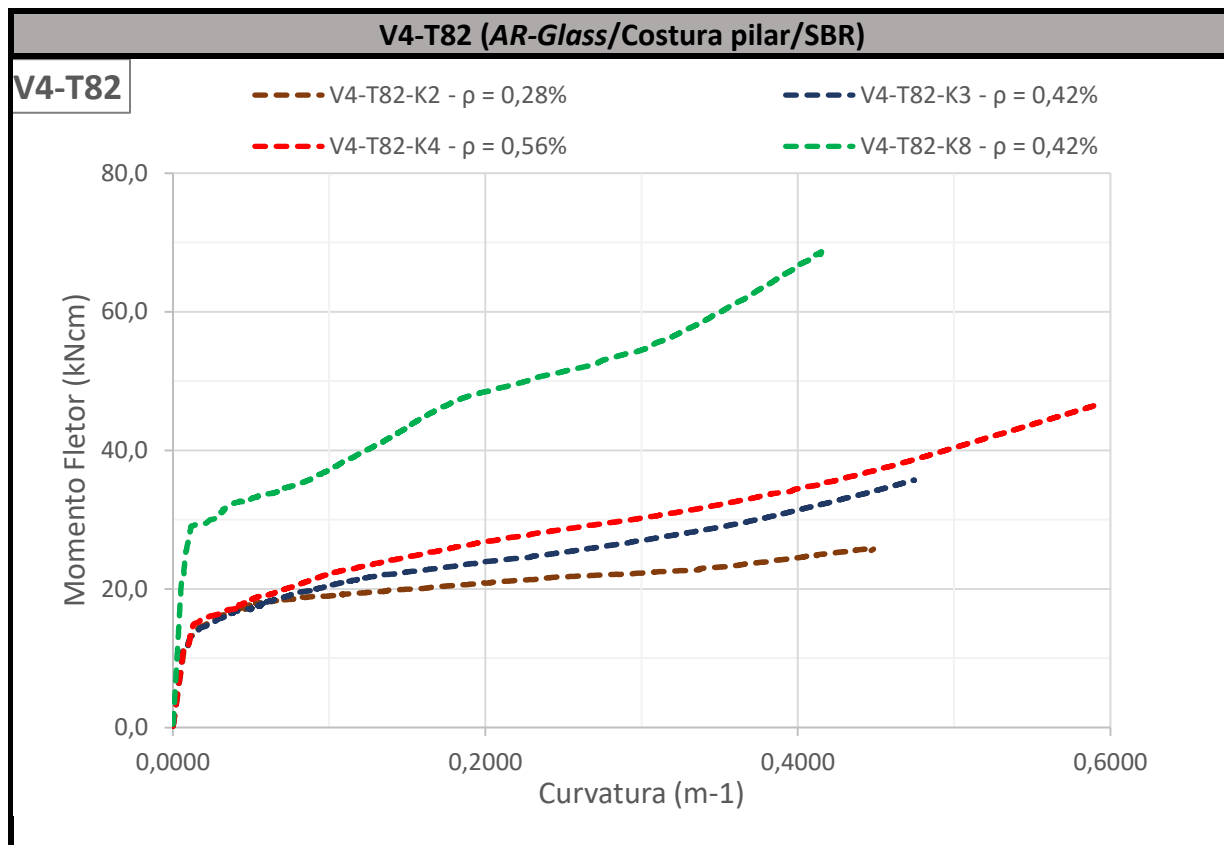


(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.30 – Resultados dos experimentos V4-T52 e V4-T81



(Fonte: elaborada pelo autor)

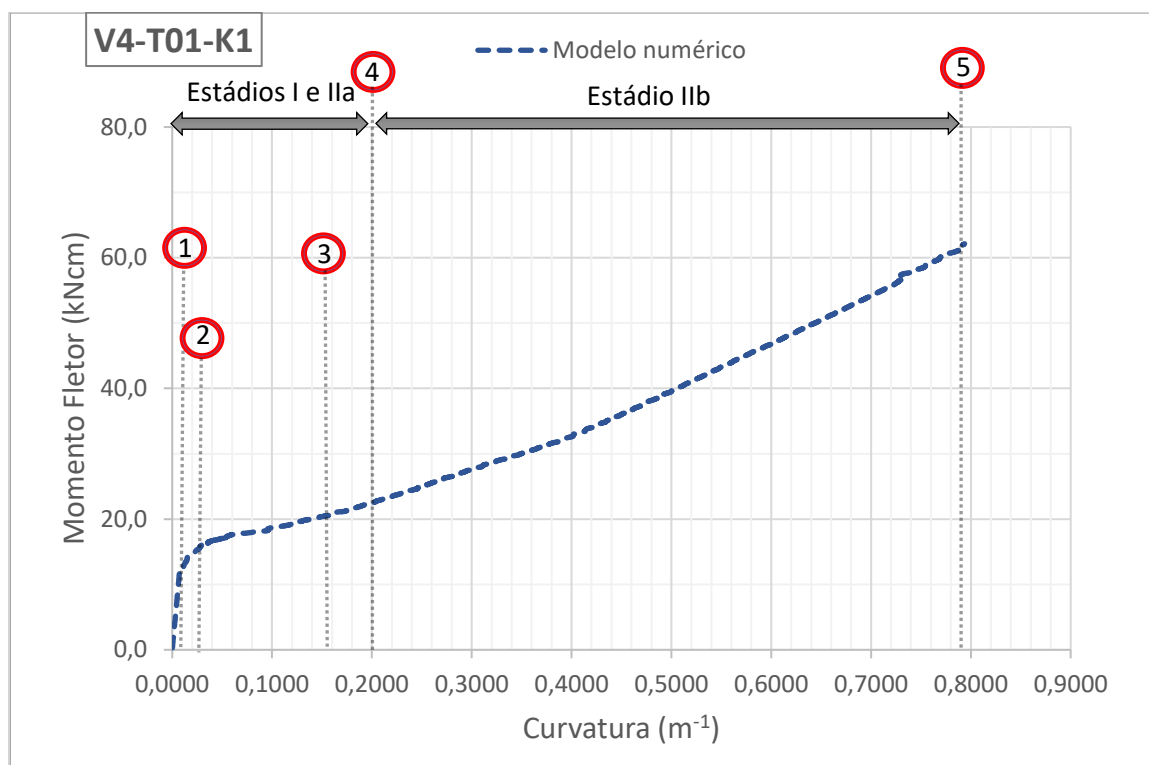
Quadro 5.31 – Resultados dos experimentos **V4-T82**

(Fonte: elaborada pelo autor)

5.4.1.3 Tensões e deformações no concreto **V4-T01-K1**

De maneira semelhante ao realizado no tópico 5.3.5.2, foram determinados cinco instantes, conforme a Figura 5.12, para ilustração da evolução das distribuições de tensão e deformação do modelo numérico **V4-T01-K1**.

Figura 5.12 – Instantes para apresentação das distribuições da tensão e deformação

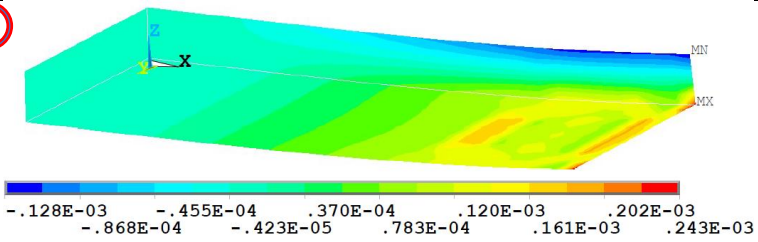
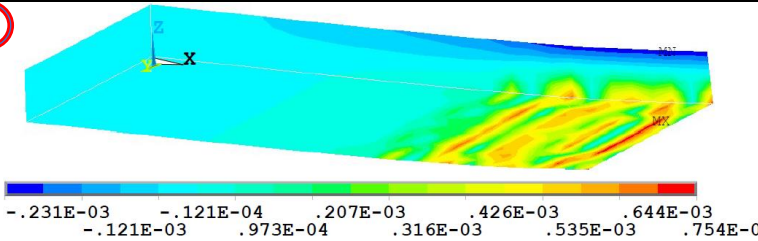
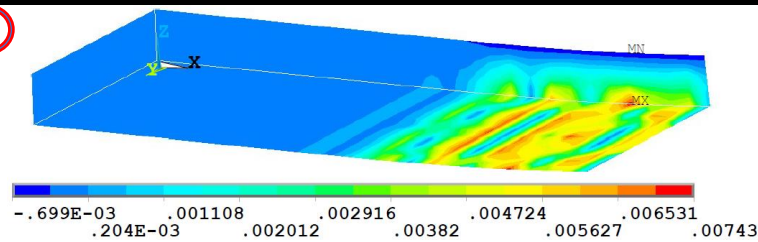
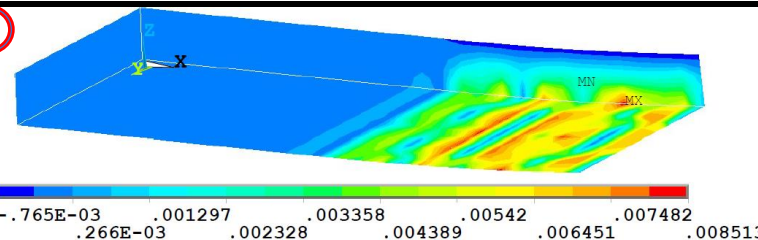
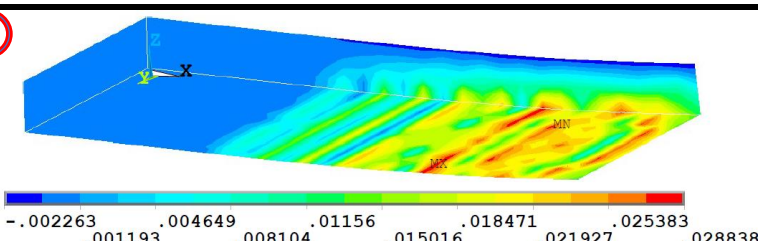


(Fonte: elaborada pelo autor)

O Quadro 5.32 apresenta o processo evolutivo das deformações no concreto. A primeira ilustração, refere-se ao instante de início do processo de fissuração, quando ocorre a transição do estágio I para IIa. Em seguida, com o desenvolvimento do processo de fissuração, surgem novas fissuras ao longo da laje, com apresentado nas figuras 2, 3 e 4. A quarta figura, ilustrada na no respectivo quadro, representa o instante do término do estágio IIa e início do estágio IIb. O último instante ilustra o instante da ruptura do concreto têxtil, no qual, para este caso, se registra o esgotamento da capacidade de carga à tração da malha têxtil.

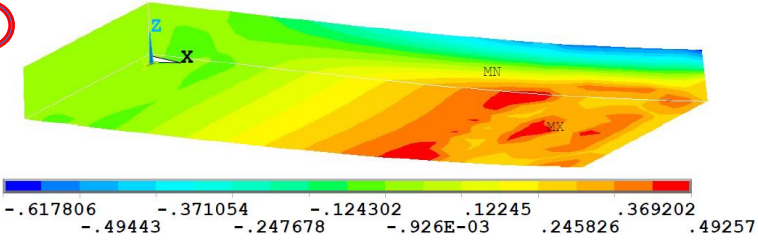
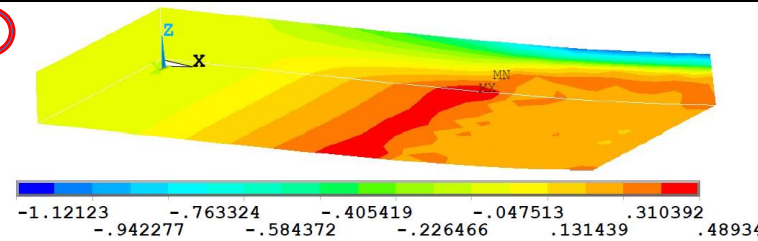
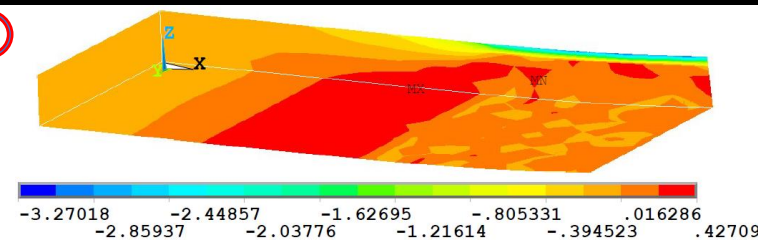
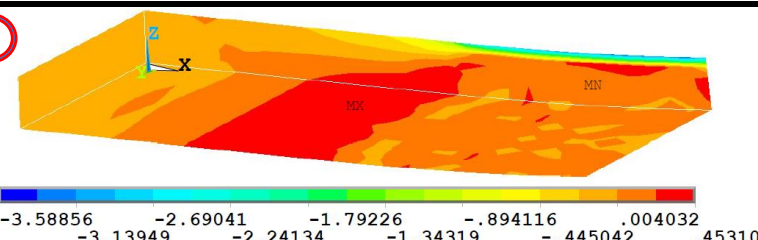
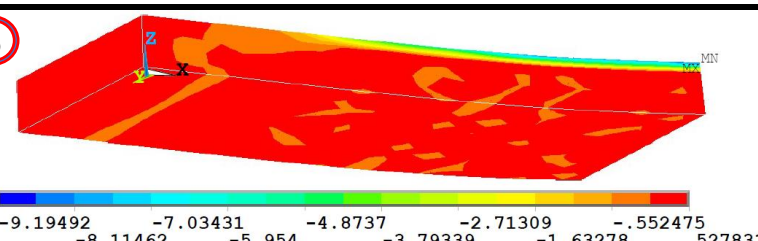
O Quadro 5.33 apresenta a evolução da distribuição de tensões na direção X no concreto. Nela, pode-se perceber que, à medida que ocorre o processo de fissuração, o concreto tem sua capacidade de resistência reduzida. Nota-se, além disso, que as tensões de compressão apresentadas na região da face superior da laje não ultrapassam a tensão máxima de compressão adotada para o concreto, de maneira que se pode afirmar a não ocorrência de esmagamento do concreto para o modelo numérico. Para o caso **V4-T01-K1** foi utilizado concreto com $f_{cm} = 10$ kN/cm², de maneira que a tensão máxima apresentada no modelo numérico ($\sigma_{xx} = 9,19$ kN/cm²) não provoca o esmagamento do concreto.

Quadro 5.32 – Evolução da distribuição de deformação no concreto

Detalhes	Deformação em X no concreto (cm/cm)
Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa	<p>①</p> 
Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.	<p>②</p> 
Continuação do processo de fissuração, com aumento do número de fissuras. Estádio IIa.	<p>③</p> 
Mudança do estágio IIa para IIb	<p>④</p> 
Instante da ruptura do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.	<p>⑤</p> 

(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.33 – Evolução da distribuição de tensão no concreto

Detalhes	Tensão em X no concreto (kN/cm ²)
Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa	<p>①</p> 
Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.	<p>②</p> 
Continuação do processo de fissuração, com aumento do número de fissuras. Estádio IIa.	<p>③</p> 
Mudança do estágio IIa para IIb	<p>④</p> 
Instante da ruptura do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.	<p>⑤</p> 

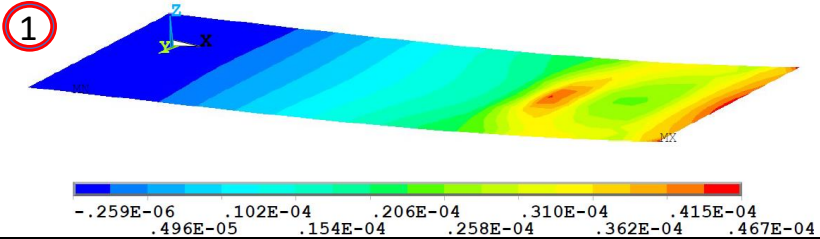
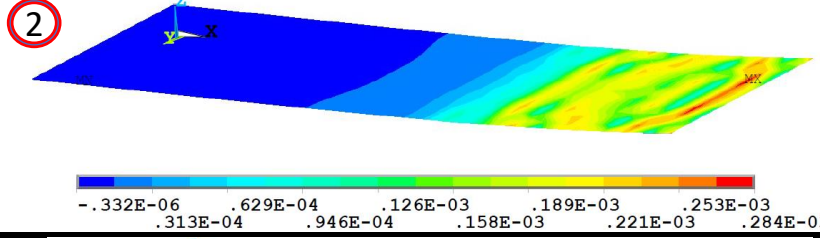
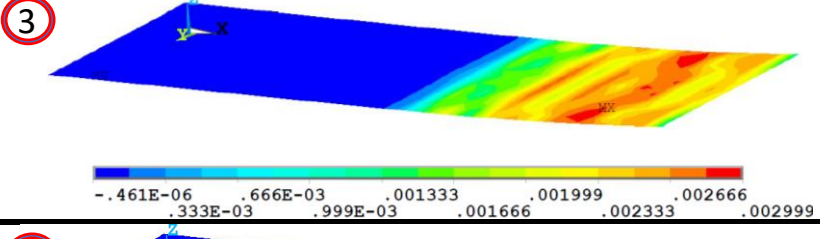
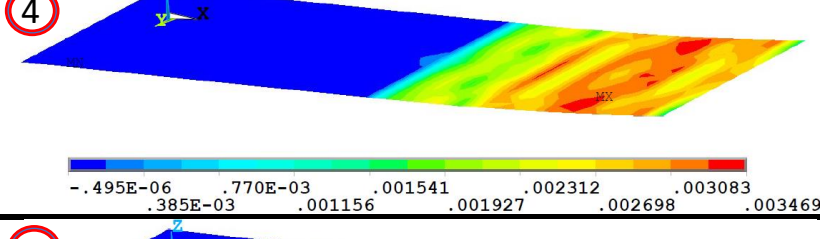
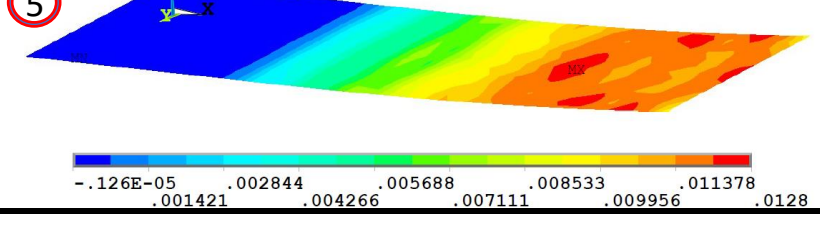
(Fonte: elaborada pelo autor)

5.4.1.4 Tensões e deformações na malha do exemplo V4-01-K1

Os Quadros 5.34 e 5.35 ilustram, respectivamente, as evoluções das distribuições de deformações e tensões na malha têxtil. A partir delas percebe-se a maior sollicitação na malha com o aumento do processo de fissuração do concreto. Identifica-se, também, as tensões e

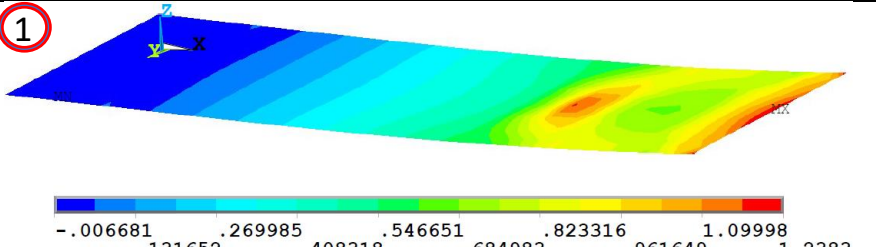
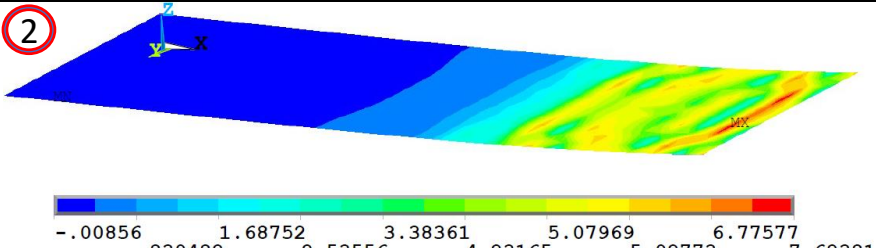
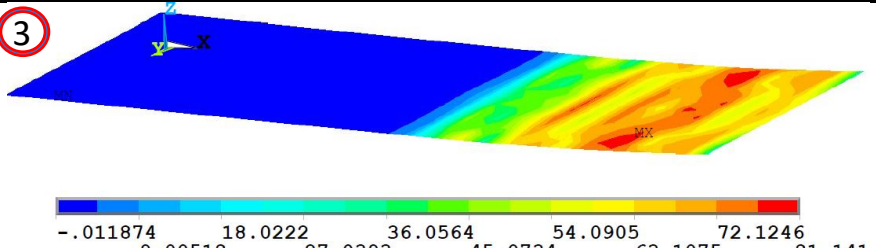
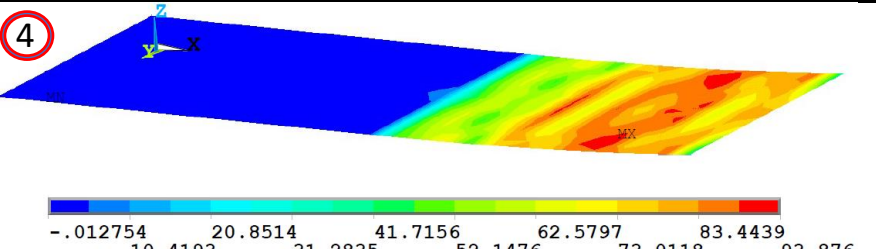
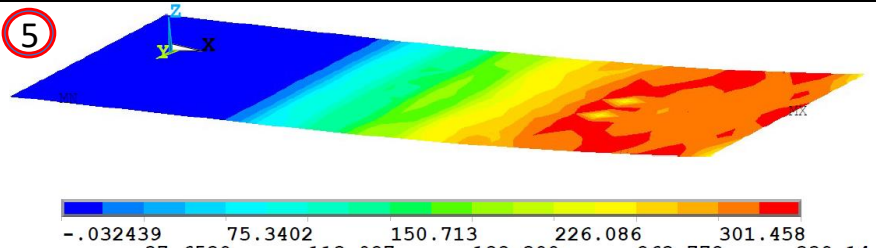
deformações apresentadas na malha têxtil no instante imediatamente anterior ao da ruptura. Analisando a tensão máxima ($339,14 \text{ kN/cm}^2$) apresentada na quinta figura do Quadro 5.35, verifica-se a sua proximidade com a tensão máxima atribuída a malha “T01” (354 kN/cm^2). Como já dito anteriormente, ao haver mais um incremento de carga (*substep*), a tensão na malha ultrapassa o valor de 354 kN/cm^2 e inicia o processo de dano.

Quadro 5.34 – Evolução da distribuição de deformação na malha

Detalhes	Deformação em X na malha (cm/cm)
Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa	 <p>1</p> <p>-.259E-06 .102E-04 .206E-04 .310E-04 .415E-04 .496E-05 .154E-04 .258E-04 .362E-04 .467E-04</p>
Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.	 <p>2</p> <p>-.332E-06 .629E-04 .126E-03 .189E-03 .253E-03 .313E-04 .946E-04 .158E-03 .221E-03 .284E-03</p>
Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.	 <p>3</p> <p>-.461E-06 .666E-03 .001333 .001999 .002666 .333E-03 .999E-03 .001666 .002333 .002999</p>
Fim do processo de fissuração. Mudança do estágio IIa para IIb	 <p>4</p> <p>-.495E-06 .770E-03 .001541 .002312 .003083 .385E-03 .001156 .001927 .002698 .003469</p>
Instante da ruptura da malha têxtil e do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.	 <p>5</p> <p>-.126E-05 .002844 .005688 .008533 .011378 .001421 .004266 .007111 .009956 .0128</p>

(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.35 – Evolução da distribuição de tensão na malha

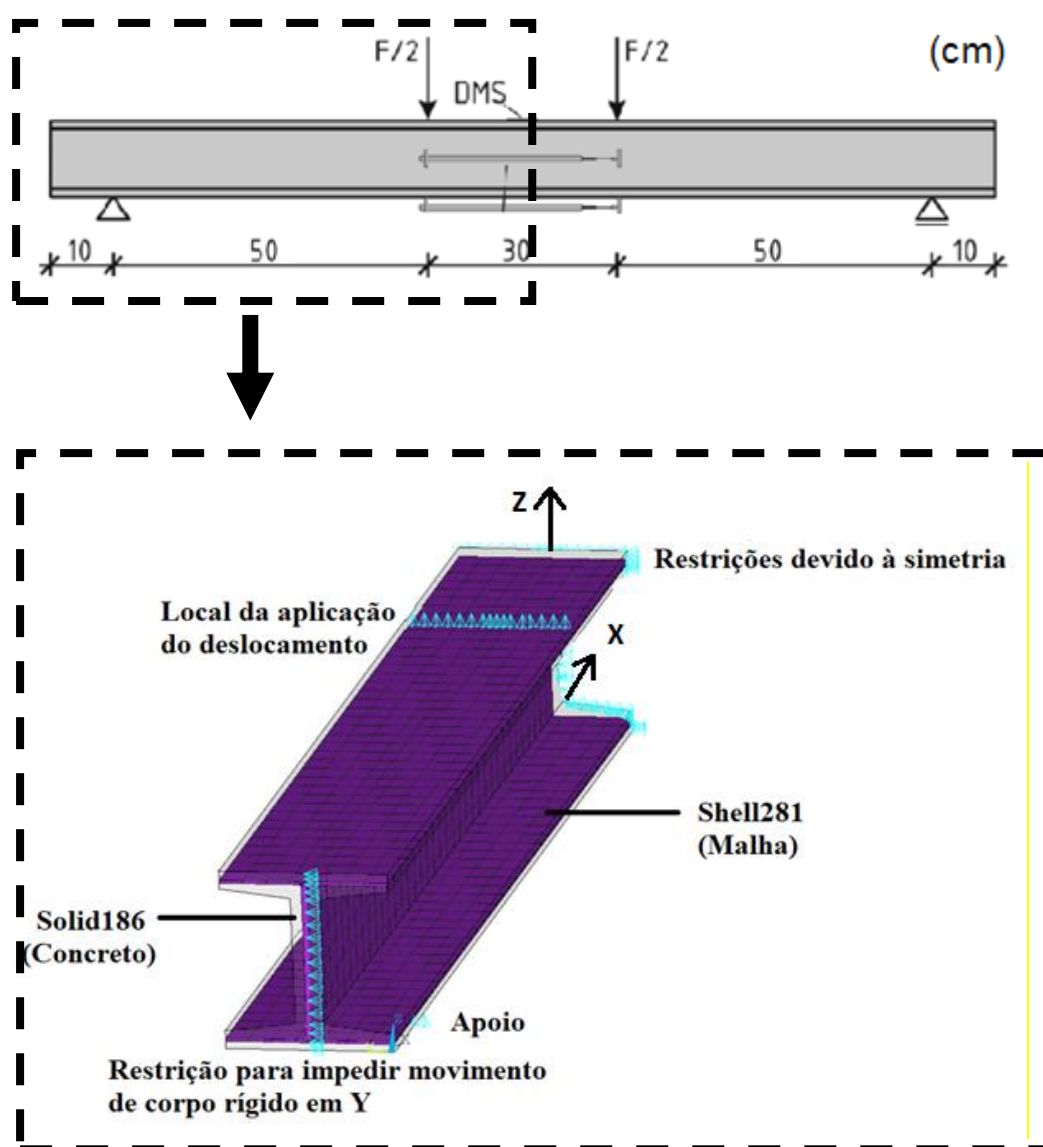
Detalhes	Tensão em X na malha (kN/cm ²)
Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa	<p>①</p>  <p>-.006681 .131652 .269985 .408318 .546651 .684983 .823316 .961649 1.09998 1.2383</p>
Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.	<p>②</p>  <p>-.00856 .839482 1.68752 2.53556 3.38361 4.23165 5.07969 5.92773 6.77577 7.62381</p>
Continuação do processo de fissuração e maior sollicitação na malha. Estádio IIa.	<p>③</p>  <p>-.011874 9.00518 18.0222 27.0393 36.0564 45.0734 54.0905 63.1075 72.1246 81.141</p>
Fim do processo de fissuração. Mudança do estágio IIa para IIb	<p>④</p>  <p>-.012754 10.4193 20.8514 31.2835 41.7156 52.1476 62.5797 73.0118 83.4439 93.876</p>
Instante da ruptura da malha têxtil e do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.	<p>⑤</p>  <p>-.032439 37.6539 75.3402 113.027 150.713 188.399 226.086 263.772 301.458 339.14</p>

(Fonte: elaborada pelo autor)

5.4.2 Vigas I

De maneira similar ao executado para a modelagem numérica das lajes, a representação computacional das vigas em I, considerando a existência de simetria geométrica, de carregamento e das condições de contorno, retratou-se apenas metade do experimento, conforme a Figura 5.13. Assim, enquanto a viga I experimentada por Kulas (2013) apresenta 1,5 m de comprimento, o modelo numérico contém apenas 0,75 m.

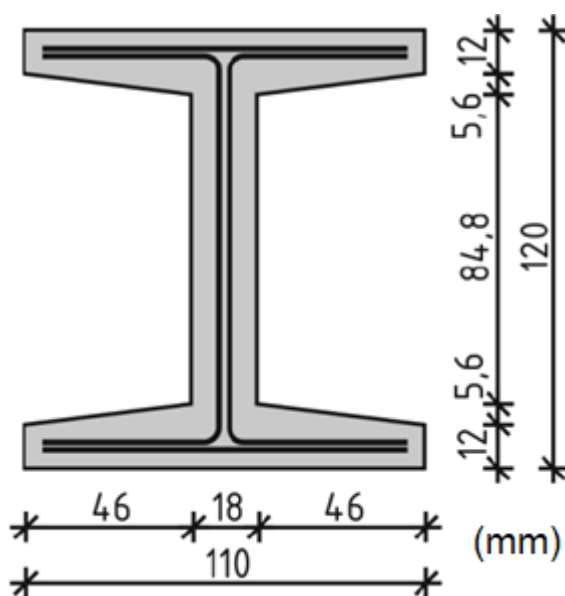
Figura 5.13 – Modelo da viga I



(Fonte: elaborada pelo autor)

As restrições adicionadas ao modelo foram: apoio simples na direção Y nos nós com par de coordenadas $X = 0$ e $Y = 5,5$ cm, para impedir movimento de corpo rígido nesta direção; restrição do deslocamento na direção Z para os nós com par de coordenadas $Z = 0$ e $X = 10$ cm, para representação do apoio existente no modelo experimental; e apoio simples na direção em X para todos os nós com coordenada $X = 75$ cm, a fim de considerar o efeito da simetria geométrica e de carregamento. A seção transversal da peça é indicada de acordo com a Figura 5.14.

Figura 5.14 – Seção transversal viga I



(Fonte: Adaptado de KULAS, 2013)

A Tabela 5.13 fornece as características geométricas particulares de cada experimento analisado numericamente. Deve-se destacar que, para casos onde há mais de uma camada de malha têxtil na mesa inferior ou superior, a representação computacional foi realizada através do condensamento, em uma única área, das diversas camadas de malha têxtil. Todas as vigas I apresentam duas camadas de malha na região da alma. A seção condensada foi, então, posicionada no centro geométrico dos elementos têxteis.

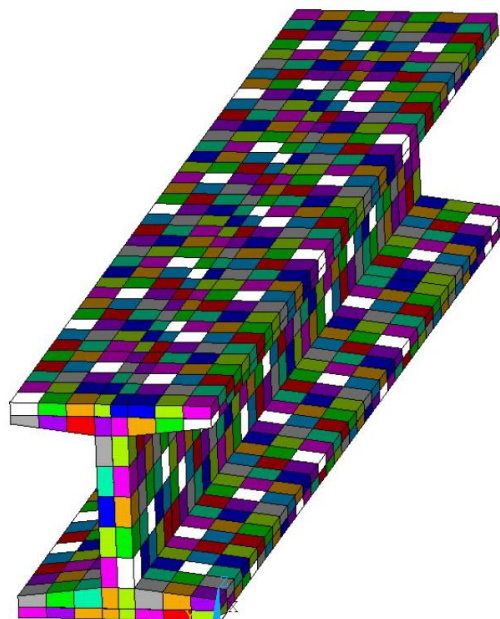
Tabela 5.13 – Características particulares Vigas I

Malha	Experimento	Número de camadas		Altura útil (cm)	
		Malha na mesa inferior	Malha na mesa superior	Malha na mesa inferior	Malha na mesa superior
T01	V5-T01-K1	1	1	11,9	0,7
T02	V5-T02-K1	1	1	11,6	0,9
T15	V5-T15-S1	1	1	11,0	0,4
	V5-T15-S2	2	1	11,4	0,5
T52	V5-T52-S1	1	1	11,5	0,5
T61	V5-T61-S3	3	1	11,5	0,4

(Fonte: elaborada pelo autor)

Para a análise numérica das vigas em I também foram realizados os processos de calibração do número de *substeps* mínimo e do refinamento da malha de elementos finitos. A partir do estudo referente ao refinamento da malha, decidiu-se empregar 2 cm como dimensão máxima para os lados dos elementos finitos, conforme apresentado na Figura 5.15. Já em relação ao número de *substeps* mínimo, obteve-se resultado similar aos apresentados para os demais tipos de análise, de modo que foram adotados valores entre 2000 e 6000.

Figura 5.15 – Refinamento da malha de elementos finitos viga I



Número de elementos finitos = 2470

(Fonte: elaborada pelo autor)

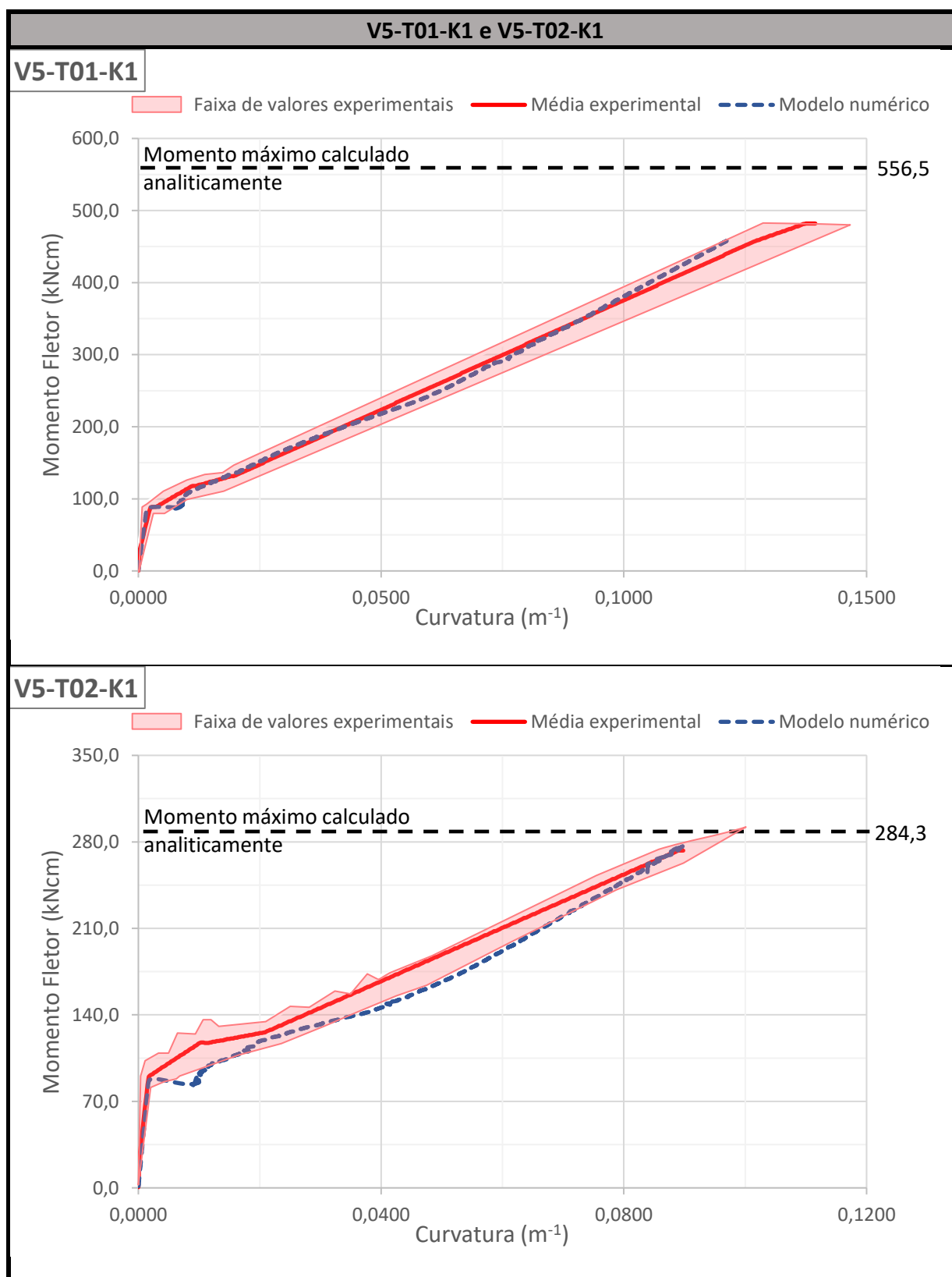
5.4.2.1 Resultados

Neste tópico exibem-se os resultados das análises numéricas das vigas I submetidas à flexão simples. Para tal, confrontam-se as curvas momento *versus* curvatura das análises numérica e experimental. Além disto, demarca-se, também, os momentos máximos obtidos via o método analítico apresentado na seção 2.5.2.2. Por último, apresenta-se, para o exemplo **V5-T01-K1**, a evolução da distribuição de tensão e deformação no concreto e na malha têxtil. O Apêndice C apresenta o script de flexão simples em Viga I utilizado para modelagem numérica do exemplo **V5-T01-K1**.

5.4.2.2 Curvas momento *versus* curvatura

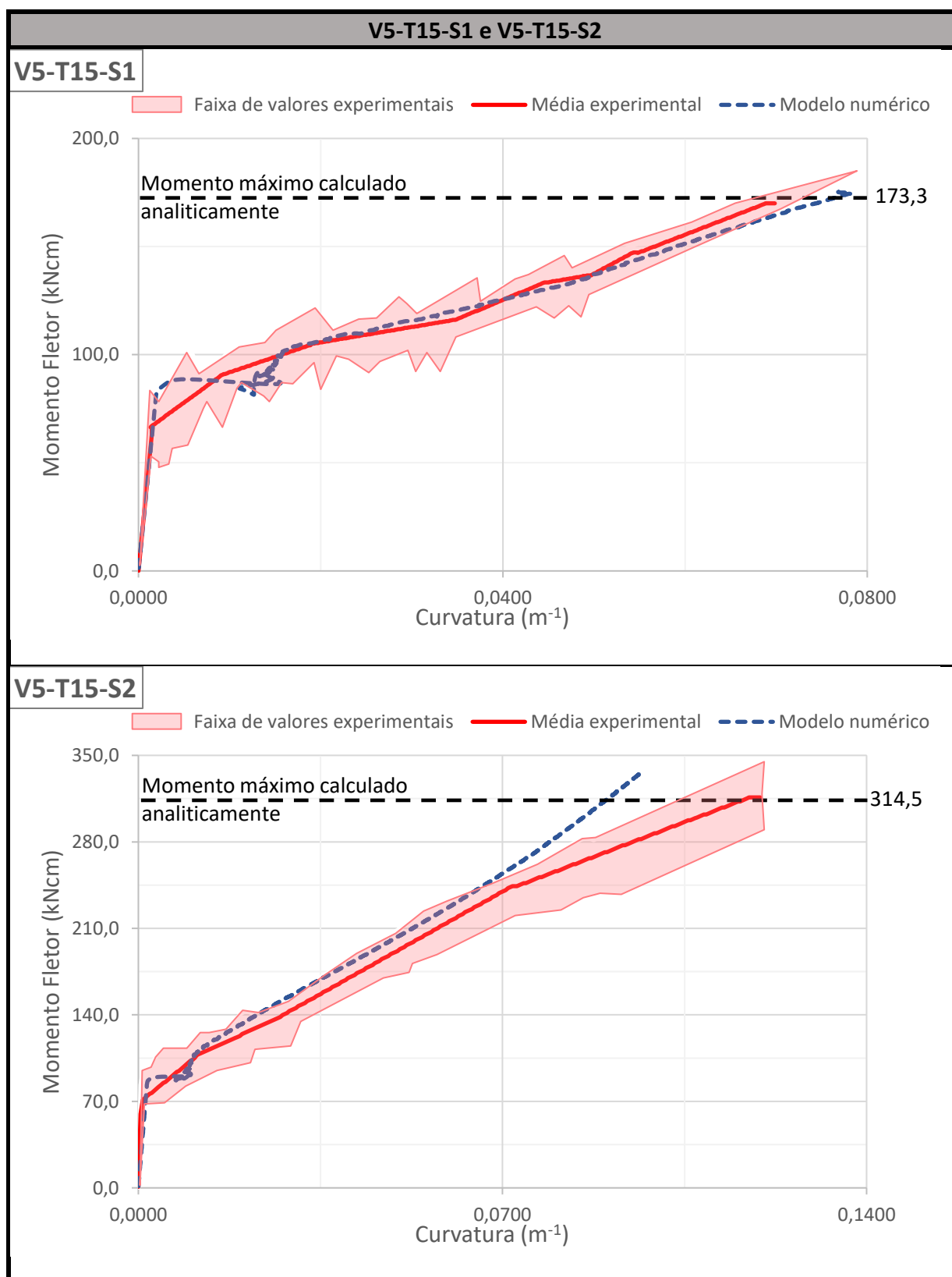
As curvas numéricas momento *versus* curvatura foram determinadas como citado durante o tópico 5.4.1. Ao total, foram modeladas numericamente seis vigas I em TRC solicitadas à flexão simples. De maneira geral, as curvas numéricas e experimentais apresentaram boa concordância em todos os estádios. Deve-se destacar que, diferentemente do observado para as lajes, todas as rupturas foram decorrentes da falha no elemento têxtil. Os Quadros 5.36, 5.37 e 5.38 apresentam as curvas experimentais momento *versus* curvatura confrontadas às obtidas via análise numérica por meio do programa ANSYS.

Quadro 5.36 – Resultados dos experimentos V5-T01-K1 e V5-T02-K1



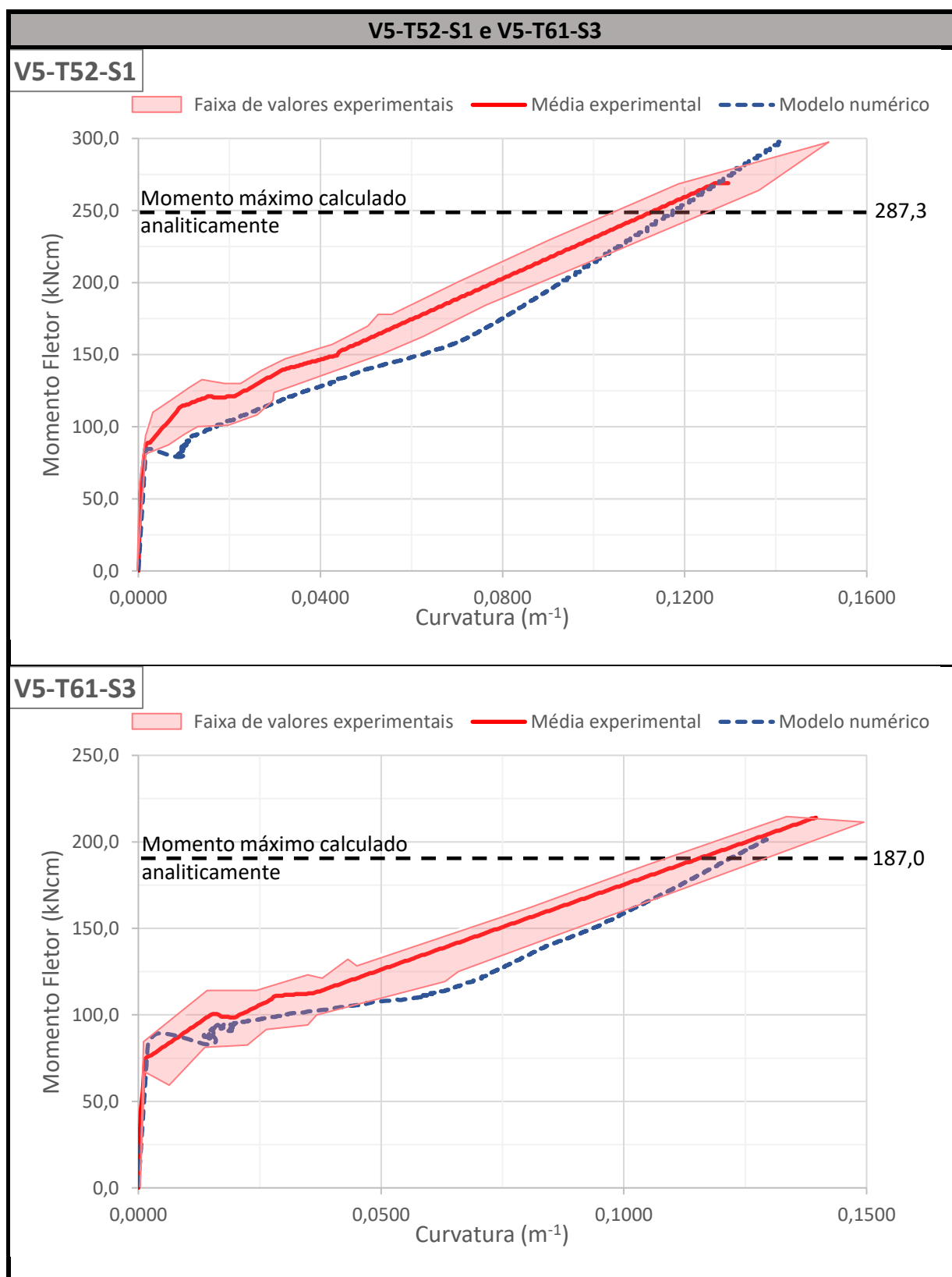
(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.37 – Resultados dos experimentos V5-T15-S1 e V5-T15-S2



(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.38 – Resultados dos experimentos V5-T52-S1 e V5-T61-S3



(Fonte: elaborada pelo autor)

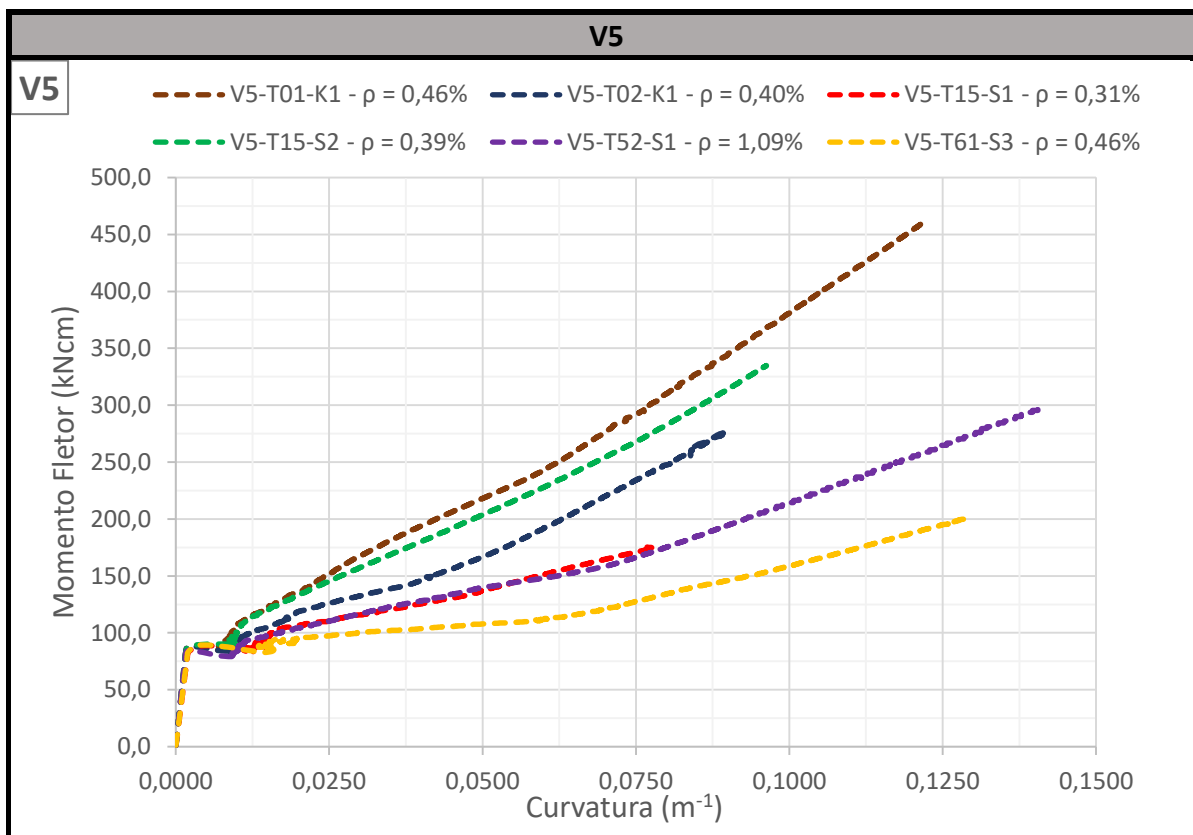
A Tabela 5.14 aponta o momento fletor na ruptura para a média experimental e para os modelos numérico e analítico. De maneira similar ao realizado para as lajes, apresentam-se os erros relativos entre o valor numérico e os valores experimental e analítico. Além destas comparações, identificam-se os modos de ruptura obtidos experimentalmente e numericamente. Através da análise dos valores dos erros obtidos, percebe-se uma ótima aproximação entre os modelos apresentados.

Tabela 5.14 – Momentos máximos obtidos para Vigas I

Malha	Experimento	Momento na ruptura (kNcm)			MODO DE RUPTURA		Erro (%)	
		Média Exper.	Num.	Analítico	Exper.	Num.	Num./Exper.	Num./Analítico
T01	V5-T01-K1	482,00	468,00	556,50	Malha têxtil	Malha têxtil	-2,90%	-15,90%
T02	V5-T02-K1	273,00	277,00	284,30	Malha têxtil	Malha têxtil	1,47%	-2,57%
T15	V5-T15-S1	173,00	175,00	173,30	Malha têxtil	Malha têxtil	1,16%	0,98%
	V5-T15-S2	316,00	334,00	314,50	Malha têxtil	Malha têxtil	5,70%	6,20%
T52	V5-T52-S1	269,00	296,00	287,30	Malha têxtil	Malha têxtil	10,04%	3,03%
T61	V5-T61-S3	214,00	201,00	187,00	Malha têxtil	Malha têxtil	-6,07%	7,49%

(Fonte: elaborada pelo autor)

Por fim, apresentam-se, no Quadro 5.39, todas as curvas numéricas tensão *versus* deformação. Por meio delas, observa-se que a inclinação do estágio IIb varia de acordo com a taxa de armadura e tipo de fibra adotado na confecção da malha. Ademais, pode-se perceber a maior capacidade resistente apresentada pelas peças com malha têxtil em fibra carbono (T01, T02 e T15).

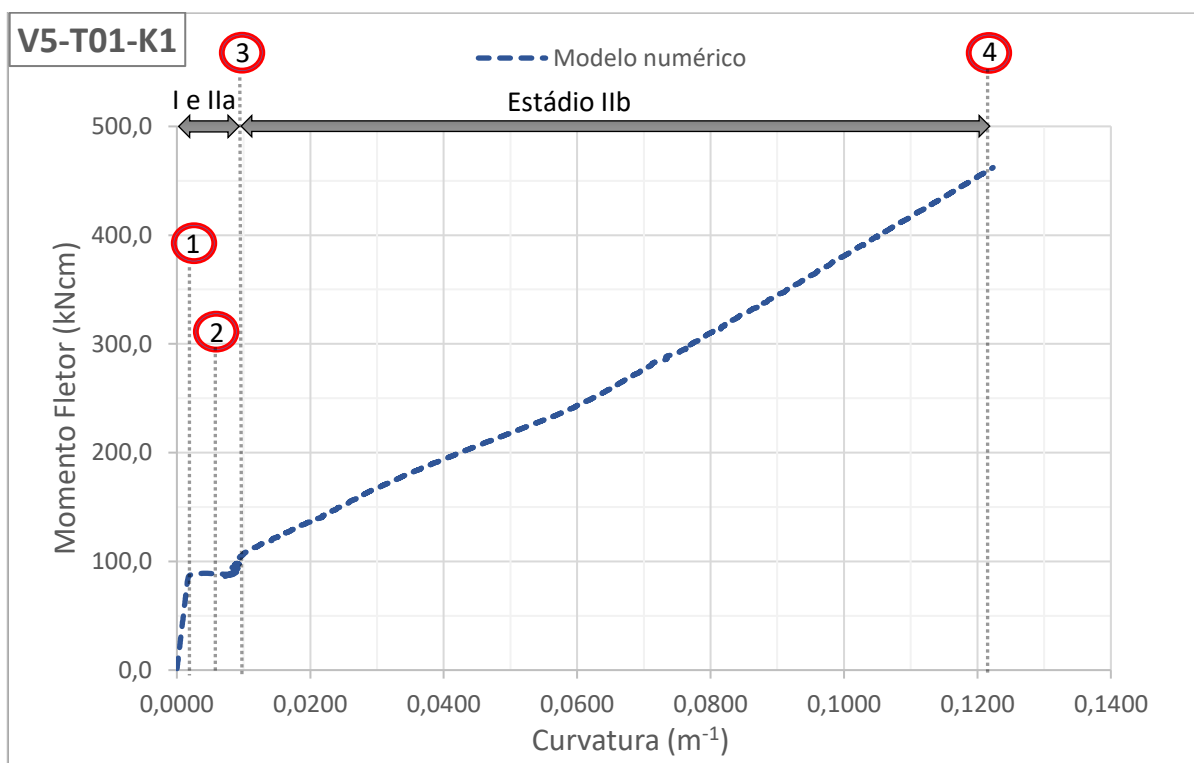
Quadro 5.39 – Resultados dos experimentos **V5**

(Fonte: elaborada pelo autor)

5.4.2.3 Tensões e deformações no concreto do exemplo **V5-T01-K1**

Na Figura 5.16, apresentam-se os quatro instantes utilizados para ilustração da evolução das distribuições de tensão e deformação do modelo numérico **V5-T01-K1**.

Figura 5.16 – Instantes para apresentação das distribuições da tensão e deformação **V5-T01-K1**

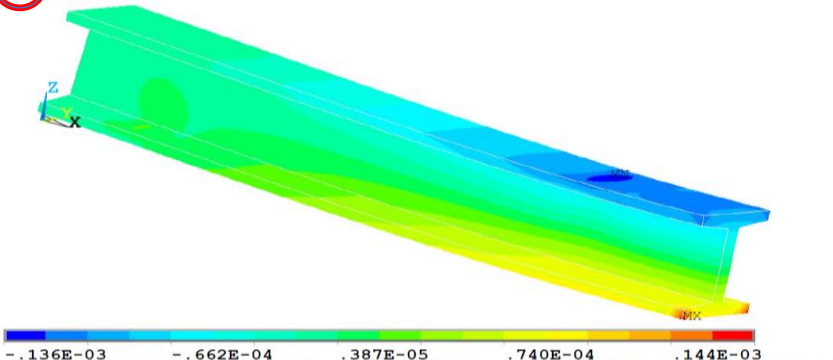
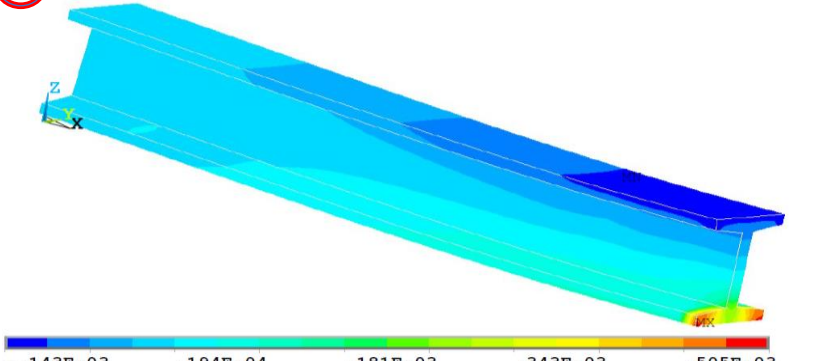
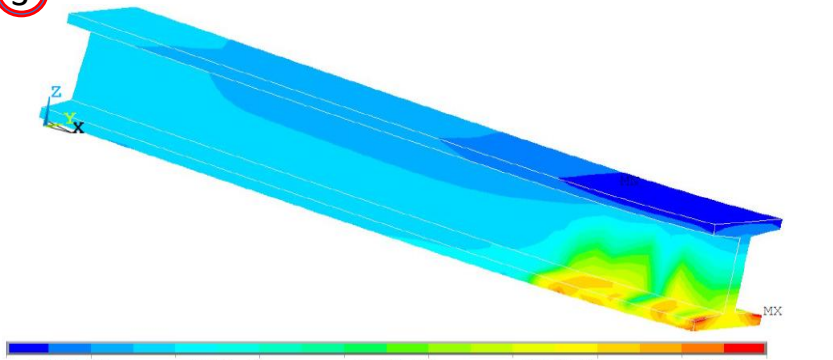
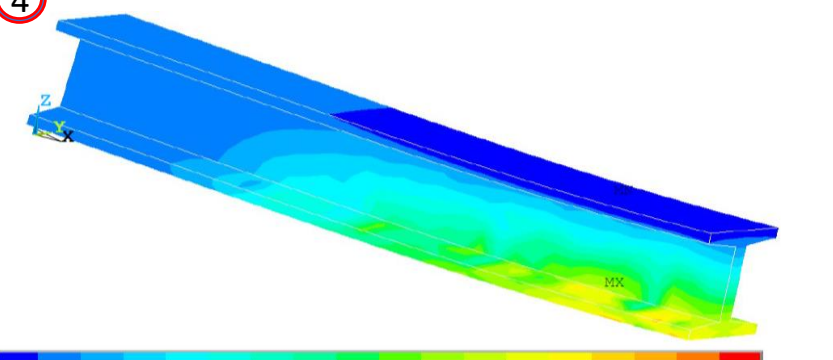


(Fonte: elaborada pelo autor)

O Quadro 5.40 apresenta o processo evolutivo das deformações no concreto. A primeira ilustração representa o momento da transição do estágio I para IIa. Em seguida, na segunda figura, ilustra-se a distribuição de deformação durante o estágio IIa. A terceira figura representa as deformações no instante do término do estágio IIa e início do estágio IIb. Por fim, é ilustrada, na quarta figura, a deformação do concreto no instante da ruptura da peça por esgotamento da capacidade à tração da malha têxtil.

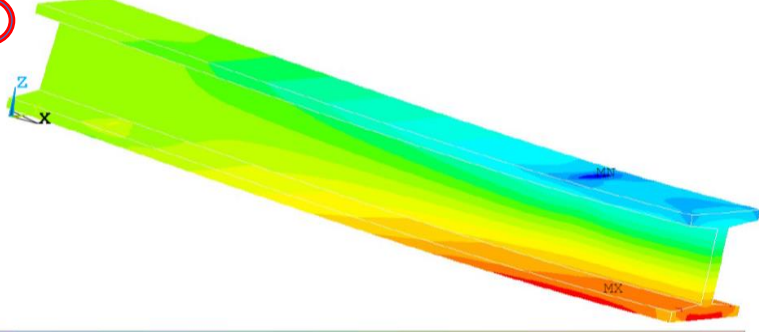
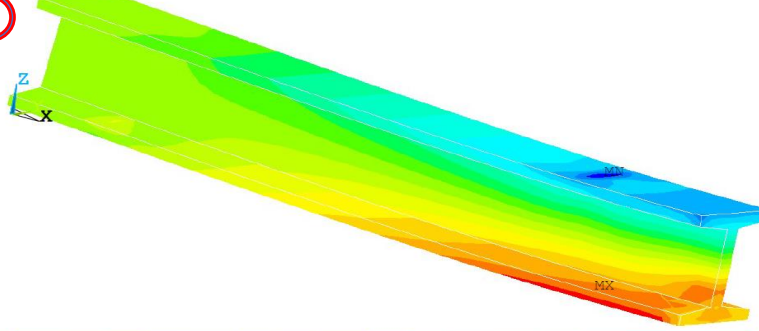
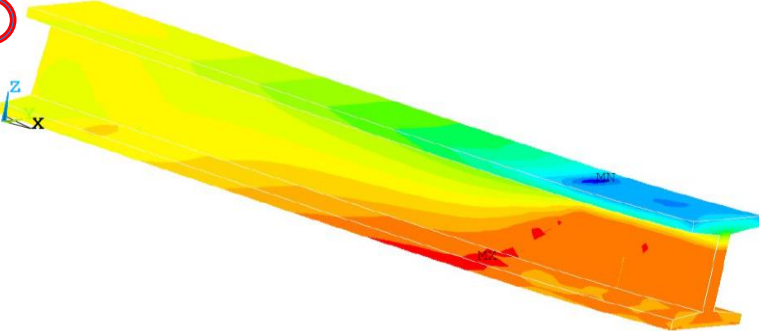
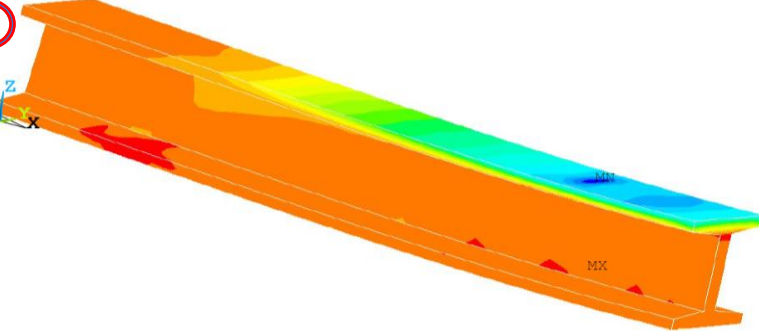
O Quadro 5.41 ilustra a evolução da distribuição de tensão na direção X no concreto. Observa-se que as tensões de compressão ilustradas na região da face superior da viga I não ultrapassam a tensão máxima de compressão adotada para o concreto, o que permite concluir a não ocorrência de esmagamento no concreto. Para o caso **V5-T01-K1** foi utilizado concreto com $f_{cm} = 10,6 \text{ kN/cm}^2$, de maneira que a tensão máxima apresentada no modelo numérico ($\sigma_{xx} = 8,10 \text{ kN/cm}^2$) não provoca o esmagamento do concreto.

Quadro 5.40 – Evolução da distribuição de deformação no concreto

Detalhes	Deformação em X no concreto (cm/cm)
<p>Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa</p>	<p>①</p> 
<p>Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.</p>	<p>②</p> 
<p>Mudança do estágio IIa para IIb</p>	<p>③</p> 
<p>Instante da ruptura do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.</p>	<p>④</p> 

(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.41 – Evolução da distribuição de tensão no concreto

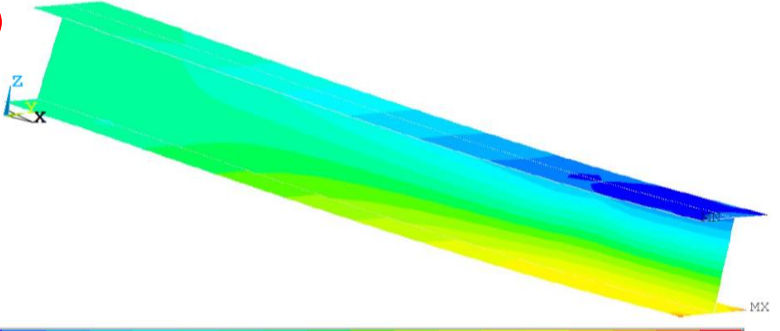
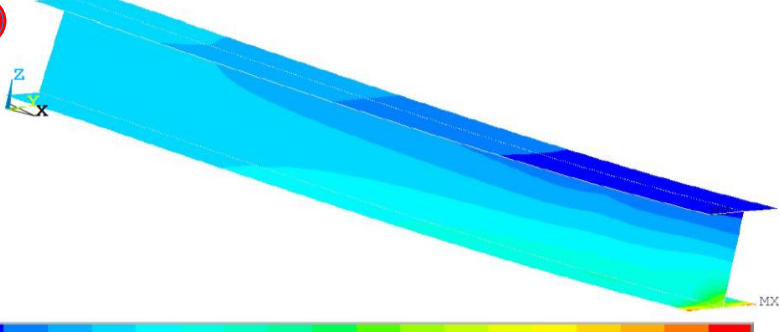
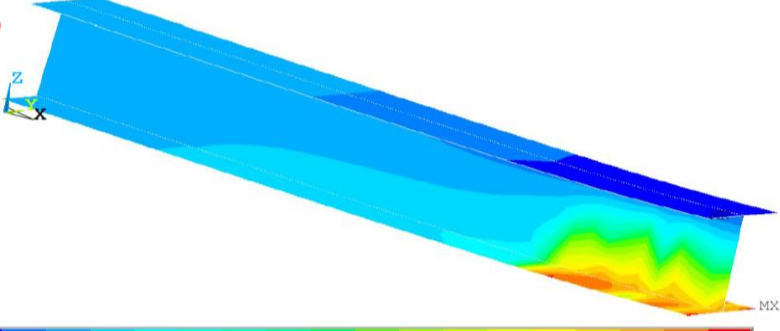
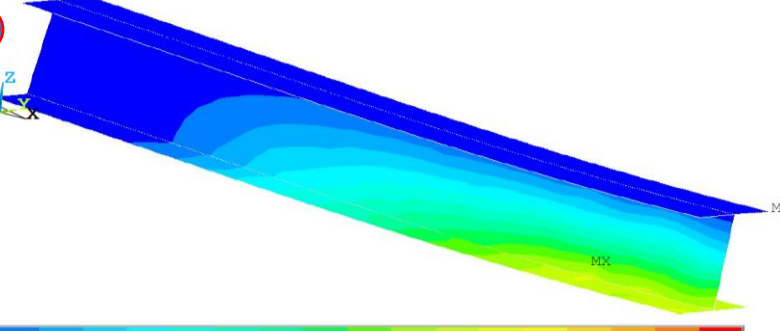
Detalhes	Tensão em X no concreto (kN/cm ²)
<p>Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa</p>	<p>①</p>  <p>-.667359 -.538481 -.409604 -.280726 -.151848 -.022971 .105907 .234785 .363662 .49254</p>
<p>Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.</p>	<p>②</p>  <p>-.698157 -.563109 -.428061 -.293014 -.157966 -.022918 .112129 .247177 .382224 .517272</p>
<p>Mudança do estágio IIa para IIb</p>	<p>③</p>  <p>-1.14823 -.971882 -.795539 -.619196 -.442853 -.26651 -.090167 .086177 .26252 .438863</p>
<p>Instante da ruptura do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.</p>	<p>④</p>  <p>-8.10205 -7.11889 -6.13573 -5.15257 -4.16942 -3.18626 -2.2031 -1.21994 -.236786 .746371</p>

(Fonte: elaborada pelo autor)

5.4.2.4 Tensões e deformações na malha do exemplo **V5-01-K1**

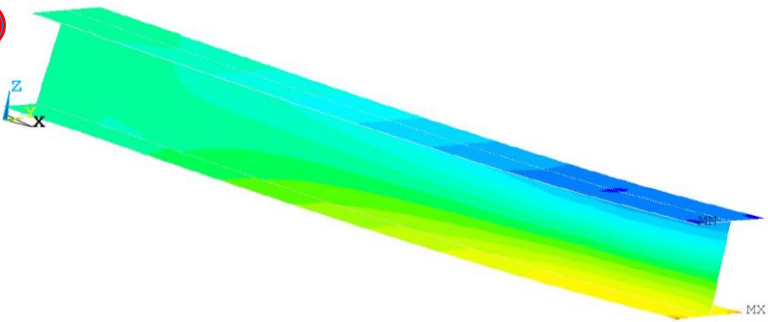
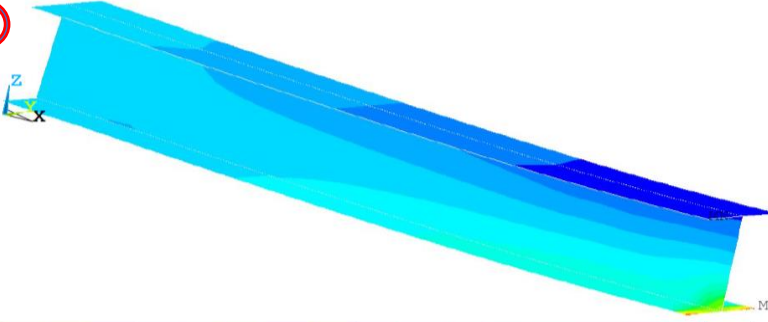
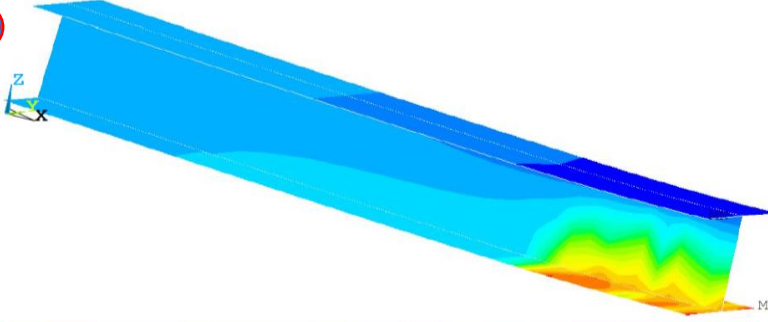
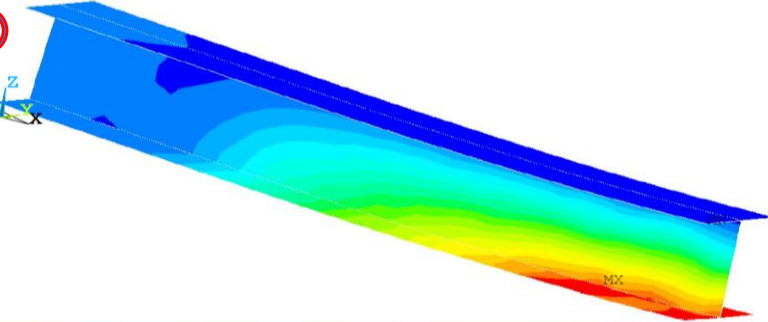
Os Quadros 5.42 e 5.43 ilustram, respectivamente, as evoluções das distribuições de deformações e tensões na malha têxtil. Analisando a tensão máxima ($353,98 \text{ kN/cm}^2$) apresentada na quarta figura do Quadro 5.43, verifica-se a sua proximidade com a tensão máxima atribuída a malha “T01” (354 kN/cm^2). Assim, ao haver mais um incremento de carga (*substep*), a tensão na malha ultrapassa o valor de 354 kN/cm^2 e inicia o processo de dano.

Quadro 5.42 – Evolução da distribuição de deformação na malha

Detalhes	Deformação em X na malha (cm/cm)
<p>Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa</p>	<p>①</p>  <p>-.108E-03 -.482E-04 .113E-04 .709E-04 .130E-03 .160E-03 -.780E-04 -.184E-04 .411E-04 .101E-03</p>
<p>Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.</p>	<p>②</p>  <p>-.120E-03 .280E-04 .176E-03 .323E-03 .471E-03 .545E-03 -.458E-04 .102E-03 .250E-03 .397E-03</p>
<p>Fim do processo de fissuração. Mudança do estágio IIa para IIb</p>	<p>③</p>  <p>-.176E-03 .813E-04 .339E-03 .597E-03 .855E-03 .983E-03 -.476E-04 .210E-03 .468E-03 .726E-03</p>
<p>Instante da ruptura da malha têxtil e do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.</p>	<p>④</p>  <p>-.824E-03 .003847 .008519 .01319 .017862 .020198 .001512 .006183 .010855 .015526</p>

(Fonte: elaborada pelo autor)

Quadro 5.43 – Evolução da distribuição de tensão na malha

Detalhes	Tensão em X na malha (kN/cm ²)
<p data-bbox="252 443 478 658">Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa</p>	<p data-bbox="507 360 555 405">①</p>  <p data-bbox="507 689 1385 741">-2.84623 -2.05766 -1.26909 -.480523 .308046 1.09662 1.88518 2.67375 3.46232 4.25089</p>
<p data-bbox="261 869 469 1016">Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa.</p>	<p data-bbox="507 748 555 792">②</p>  <p data-bbox="507 1077 1385 1128">-3.16079 -1.18235 .79609 2.77453 4.75297 6.73142 8.70986 10.6883 12.6667 14.6452</p>
<p data-bbox="261 1249 469 1420">Fim do processo de fissuração. Mudança do estágio IIa para IIb</p>	<p data-bbox="507 1144 555 1189">③</p>  <p data-bbox="507 1473 1385 1525">-4.661 -1.20631 2.24838 5.70308 9.15777 12.6125 16.0672 19.5219 22.9765 26.4312</p>
<p data-bbox="261 1630 469 1845">Instante da ruptura da malha têxtil e do elemento em TRC. Fim do estágio IIb.</p>	<p data-bbox="507 1541 555 1585">④</p>  <p data-bbox="507 1870 1385 1921">-21.3794 20.3278 62.035 103.742 145.449 187.157 228.864 270.571 312.278 353.985</p>

(Fonte: elaborada pelo autor)

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo exibe as conclusões e considerações finais obtidas com o desenvolvimento do presente estudo. Para tanto, dividiu-se este item em dois sub-tópicos: conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal desenvolver um modelo computacional, por meio do método dos elementos finitos, capaz de simular o comportamento experimental de peças em concreto têxtil (TRC) solicitadas à tração e flexão simples. A modelagem foi realizada através do programa comercial ANSYS, versão 17.2, no qual foram utilizados códigos em FORTRAN, criados por Lazzari (2016) e Schmitz (2017), para atribuição dos modelos constitutivos elastoplástico e viscoelástico do concreto. O modelo computacional foi desenvolvido tridimensionalmente através da representação da malha têxtil e do concreto pelos elementos finitos SHELL281 e SOLID186, respectivamente. A introdução dos modelos, no ANSYS, foi realizada através de *scripts* em formato texto (arquivos com extensão *.txt*), por onde se caracterizaram a geometria, condições de contorno e as propriedades mecânicas dos materiais constituintes das peças em concreto têxtil.

Para correta modelagem das peças em concreto têxtil, foi realizado um estudo aprofundado sobre as suas características, propriedades, vantagens, desvantagens, métodos de dimensionamento e possíveis modelos computacionais. A partir desta ampla pesquisa, concluiu-se que elementos em TRC apresentam inúmeras vantagens em relação a peças em concreto armado. Dentre elas, pode-se citar a sua maior durabilidade, melhor sustentabilidade e maior capacidade resistente à tração e flexão. Entretanto, por ser uma compósito recém-criado, inexistem normas regulamentadoras e estudos aprofundados sobre o seu comportamento, o que inibe a sua escolha como solução estrutural.

Diante desse contexto, o presente trabalho obteve resultados numéricos condizentes aos apresentados experimentalmente, de maneira que o modelo implementado, através do ANSYS, pode ser utilizado para representação do comportamento de peças em concreto têxtil submetidas à tração uniaxial e flexão simples. Destaca-se, a capacidade do modelo de representar corretamente os estádios I, IIa e IIb e o padrão de fissuração. A partir dos estudos numéricos, pôde-se concluir a necessidade de adaptação, do concreto armado para o têxtil, dos parâmetros

de entrada do *Tension Stiffening*. Assim, a simulação de peças em TRC por meio dos elementos SOLID186 e SHELL281, com adaptação do *Tension Stiffening*, apresentou-se como boa alternativa diante da não necessidade de utilização de elementos de interface. Além disso, foi requerida a utilização de uma malha de elementos finitos bem refinada, como também a divisão do deslocamento aplicado em 2000 a 6000 *substeps*.

Outro aspecto de interesse do trabalho refere-se a modelagem do concreto fino a partir das propriedades fornecidas, de acordo com *CEB-FIP Model Code 2010*, em função do f_{ck} do concreto. Corroborando com exposto por Brockmann (2006), este trabalho concluiu que os resultados numéricos podem ser melhorados ao utilizar parâmetros experimentais, em detrimento aos sugeridos pelo *CEB-FIP Model Code 2010*, para representação do comportamento do concreto fino. Desse modo, sugere-se a utilização de parâmetros obtidos experimentalmente por meio de ensaio de compressão e flexão em corpos de prova prismático 40 x 40 x 160mm em concreto fino.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguindo as linhas de pesquisa deste trabalho e do PPGEC/UFRGS, como também buscando facilitar a expansão do conhecimento sobre peças em concreto têxtil, sugere-se que sejam desenvolvidos alguns trabalhos futuros relacionados a esta dissertação, como:

- a) Estudo experimental de peças em TRC, com malha têxtil impregnada brasileira, solicitadas à tração uniaxial e flexão simples;
- b) Estudo experimental para caracterização do comportamento do concreto fino utilizado em peças de TRC, de maneira a se parametrizar as propriedades a partir do f_{ck} . Analisar, também, possível efeito de escala;
- c) Análise experimental e numérica de peças em TRC solicitadas a condições de incêndio;
- d) Análise numérica de peças em TRC, através da modelagem da malha têxtil como conjunto de elementos unidimensionais ligados a matriz por meio de elementos de mola. Dessa maneira, o concreto seria modelado, à tração, como elasto-frágil, não apresentando qualquer resistência após a sua fissuração.

REFERÊNCIAS

ALRSHOUDI, F.: **Textile Reinforced Concrete: Design Methodology and Novel Reinforcement**. 273 f. Tese (Doutorado). Leeds: The University of Leeds School of Civil Engineering, 2015.

ANSYS, Inc. **Theory reference** (Version 17.2), 2016.

AYALA, I. C. A. **Customização do software ANSYS para análise de lajes de concreto protendido pelo método dos elementos finitos**. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BANHOLZER, B.: **Bond behaviour of a multi-filament yarn embedded in a cementitious matrix**. Dissertação, Fakultät für Bauingenieurwesen, RWTH Aachen, 2004.

BÄHR, L.: **Mechanical behavior and numerical modeling of textile reinforced concrete**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2016.

BAZANT, Z.P.; PRASANNAN, S. **Solidification Theory for Aging Creep**. Cement and Concrete Research, v. 18, p. 923-932, 1988.

BROCKMANN, T.: **Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for Textile Reinforced Composites**. 227 f. Tese (Doutorado). Aachen: RWTH Aachen University, 2005

BRUCKERMANN, O.: **Zur Modellierung des Zugtragverhaltens von textilbewehrtem Beton**. 198 f. Tese (Doutorado). Aachen: RWTH Aachen University, 2007.

BÜTTNER, T.; KEIL, A.; RAUPACH, M.: **Improvement of load-bearing capacity and durability of textile-reinforced concrete due to the use of polymers**. 15th Congress of the Glassfibre Reinforced Concrete Association International, Prague, Czech Republic, p. 20-23, 2008.

BÜTTNER, T.: **Zur Dauerhaftigkeit polymergetränkter AR-Glas Bewehrungen in Textilbeton**. 190 f. Tese (Doutorado). Aachen: RWTH Aachen University, 2012.

BÜTTNER, T.; RAUPACH, M.: **Dauerhaftigkeit polymergetränkter AR-Glas-Bewehrungen in Beton - Materialauswahl und Lebensdauer-prognose**. Beton und Stahlbetonbau 108, p. 22-33, 2013.

CAMPOS FILHO, A.: **Fundamentos da análise de estruturas de concreto pelo método dos elementos finitos**. Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/topicos/elementos_finitos.pdf>. Acesso em: 07 ago.2018

CHEN, W. F.; HAN, D. J. **Plasticity for structural engineers**. New York: Springer-Verlag, 1988. 606 p.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. Lausanne, 1993.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 2010**. Bulletin n. 65. 2012.

CURBACH, M.; JESSE, F.: **High-performance textile-reinforced concrete**. Structural Engineering International 4/99. p. 289-291, 1999.

DENARDI, A.: **Concreto têxtil: uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil**. 108 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ELLIS, E.; **Architectural reinforced-concrete building technology: teaching through history, theory and practice**. 84th ACSA annual meeting, Building Technology Conference, 1996.

FIGLIORE, P.: **Um modelo tridimensional de elementos finitos para túneis com revestimento em concreto projetado e pré-moldado**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GRIES, T.; WULFHORST, B.; VEIT, D.: **Textile technology: an introduction**. 2^a Edition, 446 f. Hanser Publishers, Munich, 2006.

HARTIG, J.; HÄUßLER-COMBE, U.; SCHICKTANZ, K.: **Influence of bond properties on the tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete**. Cement and Concrete Composites, Vol. 30, p. 898-906, 2008.

HARTIG, J.: **Numerical Investigations on the Uniaxial Tensile Behavior of Textile Reinforced Concrete**. 218 f. Tese (Doutorado). Dresden: Technische Universität Dresden, 2011.

HEGGER, J.; WILL, N.; BRUCKERMANN, O.; VOSS, S.: **Load-bearing behavior and simulation of textile reinforced concrete**. Materials and Structures, RILEM p. 766–776, 2006.

HEGGER, J.; BRUCKERMANN, O.; CHUDOBA, R.: **A smeared bond-slip relation for multi filament yarns embedded in fine concrete**. 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes: RILEM Publications SARL, 2004.

HEGGER, J.; WILL, N.; SCHNEIDER, M.: **Textilbeton: Tragverhalten – Bemessung – Sicherheit**. (M. Curbach, R. Ortlepp, Eds.) Textilbeton in Theorie und Praxis: 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6). **Anais...**Berlin: Dresden: Technische Universität, 2011.

HEGGER, J.; WILL, N.; ZELL, M. **Tragverhalten von Textilbeton unter Biege- und Querkraftbeanspruchung**. 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4). January, 2009.

HOLLER, S.; BUTENWEG, C.; NOH, S. Y.; MESKOURIS, K.: **Computational model of textile-reinforced concrete structures**. *Computers & structures*, Vol. 82, p. 1971-1979, 2004.

JESSE, F.: **Tragverhalten von filamentgarnen in einer zementgebundenen matrix**. 366 f. Tese (Doutorado). Dresden: Technische Universität Dresden, 2004.

KOCH, A.; KERSCHL, C.; GRIES, T.; BRAMESUBER, W.: **Locally adapted biaxial warp knitted textiles as reinforcement of folded concrete elements**. 11th International Symposium on Ferrocement e 3rd ICTRC – International Conference on Textile Reinforced Concrete, RILEM Publications SARL, 2015.

KRÜGER, M.; OZBOLT, J.; REINHARDT, H.: **A discrete bondmodel for 3D analysis of textile reinforced and prestressed concrete elements**. *Otto-Graf-Journal* v. 13, p. 111–128, 2002.

KRÜGER, M.: **Vorgespannter textilbewehrter Beton**. **Dissertation**. Fakultät Bau-und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, 2004.

KULAS, C.: **Actual applications and potential of textile-reinforced concrete**. 12 f. GRC 2015 Dubai. Dubai, 2015.

KULAS, C.: **Textile-Reinforced Concrete (TRC): Material Behavior and Design**. Porto Alegre, 2015. 43 slides.

KULAS, C.: **Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile**. Aachen: RWTH Aachen University, 2013.

KUNZLER, P.: **Análise Paramétrica por Elementos Finitos de Vigas de Concreto Armado e Protendido Pré-Tracionadas com Aberturas nas Almas**. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

LAZZARI, B.: **Análise de elementos finitos por peças de concreto armado e protendido sob estados planos de tensão**. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

LAZZARI, P.: **Simulação numérica das etapas construtivas de pontes estaiadas através do método dos elementos finitos**. 301 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MARTINELLI, M.: **Modelagem de situações de punção em lajes de concreto armado através do Método dos Elementos Finitos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, CPGE, 168 p., 2003.

MOBASHER, B.: **Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites**. CRC Press, p. 465, 2012;

MOLTER, M. **Zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton**. Aachen. 221 f. Tese (Doutorado). Aachen: RWTH Aachen University, 2005.

MORASSUTTI, D.: **Passarela em concreto armado e concreto têxtil: comparativo entre metodologias de dimensionamento**. 87 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

NAAMAN, A.: **Textile reinforced cement composites: competitive status and research directions**. International RILEM Conference on Material Science, v. I, p. 3–22, 2010.

NGUYEN, V.: **Untersuchung von Sandwichbalken aus Textil und Styroporbeton Tragverhalten von filamentgarnen in einer zementgebundenen matrix**. 160 f. Tese (Doutorado). Dresden: Technischen Universität Dresden, 2014.

OTTOSEN, N. S. A failure criterion for concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 103, n. 4, p.527-535, ago. 1977.

OWEN, D. R. J.; HINTON, E. **Finite elements in plasticity: theory and practice**. Swansea: Pineridge Press Limited. 1980. 594 p.

PAAXAA. **Fabrics**. [S.l], 2016. Disponível em <<http://www.paxaa.com/c/248/Fabrics>> Acesso em: 07 de agosto de 2018.

PEDROSO, F.; **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Revista IBRACON nº 53, p.14-19, 2009.

PELED, A.; BENTUR, A.; YANKELEVSKY, D.: **Effects of Woven Fabric Geometry on the Bonding Performance of Cementitious Composites**. Mechanical Performance. Advanced Cement Based Materials, p.20-27, 1998.

PETRE, D.; ZAPALOWICZ, I.: **Analysis of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforcement**. 66 f. Dissertação (Mestrado). Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2012.

PETTERSSON, M.; THORSSON, P.: **FE-modelling of Textile Reinforced Concrete Façade Elements**. 88 f. Dissertação (Mestrado). Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2014.

PORTAL, N.: **Usability of Textile Reinforced Concrete**. 129 f. Tese (Doutorado). Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2015.

PORTAL, N.; LUNDGREN, K.; MALAGA, K.: **Evaluation of Pull-out Behaviour in Textile Reinforced Concrete**. 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. 2014.

QUEVEDO, F.: **Comportamento a longo prazo de Túneis revestidos com Concreto: Modelo em Elementos Finitos**. 204 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RAUPACH, M.; ORLOWSKY, J.; BÜTTNER, T.; DILTHEY, U.; SCHLESER, M.: **Epoxy-impregnated textiles in concrete - load bearing capacity and durability**. Textile Reinforced Concrete. RILEM Publications S.A.R.L, p.77-88, Bagneux, France, 2006.

RICHTER, M.: **Entwicklung mechanischer Modelle zur analytischen Beschreibung der Materialeigenschaften von textildbewehrtem Feinbeton**. Dissertação, Fakultät Bauingenieurwesen, Technischen Universität Dresden, 2005.

SCHEFFLER, C.; GAO, S. L.; PLONKA, R.; MÄDER, E.; HEMPEL, S.; BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V.: **Interphase modification of alkali-resistant glass fibres and carbon fibres for textile reinforced concrete I: Fibre properties and durability**. Composites Science and Technology, v. 69, p. 531-538, 2008.

SCHLESER, M.: **Einsatz polymerimprägnierter, alkaliresistenter glastex-tilien zur Bewehrung zementgebundener matrices**. Dissertação Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (RWTH Aachen), Aachen, 2008.

SCHLADITZ, F.; FRENZEL, M.; EHLIG, D.; CURBACH, M.: **Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete**. Engineering Structures 40, p. 317–326, 2012.

SCHMITZ, R. J.: **Estrutura mista aço-concreto: análise de ponte composta por vigas de alma cheia**. 212 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SIM, J.; PARK, C.; MOON, D. Y.: **Characteristic of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures**. Composites Part B: Engineering 36, p. 504-512, 2005.

SORIANO, H.; LIMA, S.: **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. 392 p. 1998.

STRAMANDINOLI, R. S. B.; ROVERE, H. L.: **An efficient tension-stiffening model for nonlinear analysis of reinforced concrete members**. Engineering Structures 30, p. 2069–2080. 2008.

SUN, E.: **Shear Locking and Hourglassing in MSC Nastran, ABAQUS and ANSYS**. MSC Software Users Meeting, 2006.

TRÜB, M.: **Numerical modeling of high performance fiber reinforced cementitious composites**. 233 f. Tese (Doutorado). Zürich: Swiss Federal Institute of Technology, 2011.

VOSS, S.: **Ingenieurmodelle zum tragverhalten von textildbewehrtem Beton**. 246 f. Tese (Doutorado). Aachen: RWTH Aachen University, 2008.

XU, S.; KRÜGER, M.; REINHARDT, H. W.; OZBOLT, J.: **Bond characteristics of carbon, alkali resistant glass, and aramid textiles in mortar.** Journal of Material in Civil Engineering, 2004. Vol. 16 (4), p. 356-264.

XU, S. L.; YIN, S. P.; WANG. F.: **Investigation on the flexural behavior of concrete members reinforced with epoxy resin-impregnated textiles.** Materials and Structures, 2015. p.153-166.

ZOLLO, R.: **Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development.** Cement and Concrete Composites. Grã-Bretanha, p. 107-122, 1997.

APÊNDICE A – Script tração uniaxial

```

!*****
! Programador: Marcelo Ferreira de Souza Bezerra Araújo
! Data: 22/02/2019
! Nome do arquivo: Tração uniaxial em Concreto Têxtil
! unidades: cm, kN
!*****
/NOPR ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO ! Echo following commands to log
FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
/NOPR

!-----
!                               1 - ENTRADA DE DADOS
!-----
! -----
! 1.1 - GEOMETRIA
! -----
!
!1.1.1 - Dimensão da laje
!
Ap           =2.5           !Tamanho apoio (cm)
Hf           =2.0           !Altura (cm)
B            =10.0          !Largura (cm)
ML           =45.0/2        !Metade da distância entre apoios (cm)
Telemx       =1.25          !Tamanho máximo elemento X
Telemy       =1.25          !Tamanho máximo elemento Y
Telemz       =0.5           !Tamanho máximo elemento Z
!
!1.1.2 - Malha têxtil
!
Dutil        =1.0           !Altura útil da seção (cm)
Afiowarp     =0.0184        !Área transversal do fio na direção warp(cm²)
Nfwarp       =4             !Número de fios em warp
HMT          =Afiowarp*Nfwarp/B !Espaçamento Entre os fios agrupados de
warps
!
! -----
! 1.2 - MATERIAIS
! -----
!
!1.2.1 - CONCRETO (user)
!
Ec           =4542.0        !Módulo de elasticidade do concreto (kN/cm²)
Vc           =0.2           !Coeficiente de poisson do concreto
Fck          =9.0           !Resistência à compressão (kN/cm²)
Cimento      =2            ! tipo de cimento(1-endurecimento lento,
2-endurecimento normal,3-endurecimento rápido)
Agregado     =1            ! tipo de agregado (1-basalto;2-granito;
3-calcário;4-arenito)
analise      =21.002        !numérdo a esquerda do ponto: 1- análise
diferida. 2- Analise instantânea. Número a direita do ponto: 2- São feitas 2
tipos de análise [número de análises feitas]
!Exemplo: 21.002, o número a direita do ponto representa a quantidade de
análises e a esquerda do ponto são os números das análise que devem ser
feitas, seguindo a ordem da direita para esquerda. No caso do exemplo, são
duas análises, primeiro é feita uma análise diferida (1) e em seguida é feita

```

análise instantânea (2).

```

gc                =2.5E-5      ! peso específico do concreto,kN/cm3

!!!!!!!!!!!!!!Propriedade para analise diferida
RH=89             !Umidade do ambiente
hfic=0           !Espessura fictícia, calculado ao longo do
script
ts=2             !Idade do concreto no inicio da retração (tempo
de cura), dias
tinicial=28      !Momento em que é aplicada a primeira carga
(dia)
temperatura=20   !Temperatura
Fluencia=2010   ! considerar fluência (0-não;90-CEB-FIP-
90;2010-FIB-2010)
Retracao=90     ! considerar retração (0-não;90-CEB-FIP-
90;2010-FIB-2010)
!
!1.2.2 - Malha têxtil
!
Efinwarp         =16936.3      !Módulo de elasticidade final do fio na direção
warp (kN/cm²)
Vs              =0.35         !Coeficiente de poisson do malha têxtil
TF              =354.4        !Tensão limite do fio na direção warp (kN/cm²)
!
!1.2.3 - Elem. Rígido
!
Er              =9999999999    !Módulo de elasticidade elemento rígido(kN/cm²)
Vr              =0.0          !Coeficiente de poisson elemento rígido
!
!! -----
! 1.3 - PARÂMETROS PARA ANÁLISE
! -----
! CARGAS
! Carga permanentes (0-não considerar a carga;1-considerar a carga)
carga0=1        !peso da estrutura
carga01=1       !Deslocamento imposto no experimento
!
!-----
!                               2 - DEFINICAO DO TIPO DE ANALISE
!-----
!
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1      !Análise estrutural
/PREP7
!
!-----
!                               3 - DEFINICAO DOS ELEMENTOS
!-----
!
! 3.1 - CONCRETO - SOLID186 - elemento tipo 1
!-----
!
ET,1,SOLID186      !Especifica o elemento solid186
!
KEYOPT,1,2,0       !Integracao reduzida
KEYOPT,1,3,0       !Elemento solido homogeneo (nao possui
"layers")
KEYOPT,1,6,0       !Fomulacao padrao para deslocamentos
KEYOPT,1,8,0       !Opcao para transporte de massa desativado
KEYOPT,1,10,0

```

```

!
! -----
! 3.2 - Malha Têxtil - SHELL281 - elemento tipo 2
! -----
ET,2,SHELL281          !seleciona o elemento shell 281
KEYOPT,2,1,1          !Somente efeito membrana (Apenas Ux, Uz e Uy)
KEYOPT,2,8,2          !Armazena os resultados para TOP, BOTTOM e MID
para todas as camadas
!
SECTYPE,1,SHELL       !Definição das camadas do elemento:numero da
seção,elemento de shell
SECDATA,HMT,2,,5      !Espessura,material,,número de pontos de
integração
SECOFFSET,MID         !Desloca a posição do nó na seção do elemento.
no caso, está a opção default: nós localizados no meio da seção.
SECCONTROL,,,,,      !Comando que permite variar as propriedades da
seção.
!
! -----
!                               4 - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS
! -----
! -----
! 4.1 - CONCRETO - USER - Material 1 - VER ENTRADA DE DADOS
! -----
!
Ac=Hf*B               ! área da seção transversal da laje,cm²
Patm=2.0*Hf+2.0*B     ! perímetro da laje em contato com a atmosfera,cm
hfic=2.0*Ac/Patm      ! espessura fictícia, dependente do tamanho da
peça,cm
!
!
TB,USER,1,1,12,
TBTEMP,0
TBDATA,,Ec,vc,fck,cimento,agregado,analise
TBDATA,,fluencia,retracao,rh,hfic,ts,tinicial
!
! PESO ESPECÍFICO
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,gc
!
! -----
! 4.2 - Malha Têxtil - Material 2
! -----
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,Efinwarp !Especifica o modulo de elasticidade do material 2
MPDATA,PRXY,2,,Vs     !Especifica o coef. de Poisson do material 2
!
TB,DMGI,2,1,4,1,      !TB, lab(DMGI - Damage INITIATION criteria),
mat(material 2),Ntemp (temp. associada), NPTS (numero de informacoes a serem
inseridas, neste caso sao 4 constantes - Qual modo de ruptura se ser
analizada),TBOPT (opção 1)

TBDATA,1,2,2,2,2      ! Tbddata,1 (iniciar a partir da primeira constante),
2(Modo de ruptura a partir:1- da deformação maxima; 2 - da tensao máxima
(usei sempre 2).

!
TB,DMGE,2,1,4,1,      !TB, lab(DMGE - Damage evolution law), mat(material

```

```

2),Ntemp (temp. associada), NPTS (numero de informacoes a serem inseridas,
neste caso sao 4 constantes - Um fator redutor de rigidez para cada tipo de
ruptura),TBOPT (opção 1)

TBDATA,,1,1,1,1          !Um fator redutor de rigidez (valor entre 0-1,
onde 1 reduz o máximo) para cada tipo de ruptura
!
TB,FCLI,2,1,1,1         !TB, lab(FCLI - strength limit), mat(material
2),Ntemp (temp. associada),NPTS (numero de informacoes a serem inseridas,
neste caso so 1 já que é apenas a tensao de ruptura em X),TBOPT (1- limite
definido para stress maximo)
TBDATA,1,TF            !Atribuição do valor da tensao de ruptura
!
! -----
! 4.3 - Elemento rígido - Material 3
! -----
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,Er        !Especifica o modulo de elasticidade do material 3
MPDATA,PRXY,3,,Vr      !Especifica o coef. de Poisson do material 3
!
! -----
!                               5 - GERAÇÃO DA GEOMETRIA DA PEÇA
! -----
!
/VIEW,1,,-1           !controle de visualização
/ANG,1                !controle de visualização
/ANG,1,30,XS,1        !controle de visualização
/ANG,1,30,YS,1        !controle de visualização
!
! -----
!                               5.1 - GERAÇÃO DA GEOMETRIA
! -----
!
BLOCK,0,Ap,0,B,0,Hf-Dutil
BLOCK,0,Ap,0,B,Hf-Dutil,Hf
BLOCK,Ap,ML+Ap,0,B,0,Hf-Dutil
BLOCK,Ap,ML+Ap,0,B,Hf-Dutil,Hf
BLOCK,ML+Ap,ML+Ap+Ap,0,B,0,Hf-Dutil
BLOCK,ML+Ap,ML+Ap+Ap,0,B,Hf-Dutil,Hf

!BLOCK,0,ML,0,B,Hf/2,Hf
!
VGLUE,all
NUMMRG,KP,,,,LOW
numcmp,volu
!
! -----
!                               6 - MESH
! -----
!
! 6.2 - Mesh da LAJE
! -----
!
TYPE, 1           !Elemento utilizado - 1 representa o SOLID186
MAT, 1           !Material utilizado - 1 representa o concreto
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,

LESIZE,5,Telemx       !Definição do tamanho do elemento finito X
LESIZE,79,Telemx      !Definição do tamanho do elemento finito

```



```

LESIZE,83,Telemx           !Definição do tamanho do elemento finito

LESIZE,1,Telemy           !Definição do tamanho do elemento finito Y
LESIZE,8,Telemy           !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,20,Telemy          !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,6,Telemy           !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,30,Telemy          !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,51,Telemy          !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,54,Telemy          !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,66,Telemy          !Definição do tamanho do elemento finito

LESIZE,74,Telemz          !Definição do tamanho do elemento finito Z
LESIZE,10,Telemz          !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,87,Telemz          !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,34,Telemz          !Definição do tamanho do elemento finito

SECNUM,1
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
VSEL,S,VOLU,,3,5,2
VMESH,ALL
!
! -----
! 6.2 - Mesh da Elem Rígido
! -----
TYPE, 1                    !Elemento utilizado - 1 representa o
SOLID186
MAT, 3                     !Material utilizado - 3 representa o
elemento rig
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,

SECNUM,2
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
VSEL,ALL
VSEL,U,VOLU,,3,5,2
VMESH,ALL

!
! -----
! 6.1 - Mesh da MALHA
! -----
ALLSEL,ALL
TYPE, 2                    !Elemento utilizado - 2 representa o
SHEL281
MAT, 2                     !Material utilizado - 2 representa a
malha têxtil
ESYS, 0
SECNUM,
!
MSHAPE,0,2D                !Define malha 2D e elemento quadrilátero
MSHKEY,1                    !Define malha mapeada
!
AMESH,42                    !Geracao da malha na area 3 (inferior)
!-----
!                               7 - Condições de contorno
!-----
!!                               !Restrição devido ao apoio

```

```

ALLSEL

NSEL,S,LOC,X,0
D,ALL,UZ
D,ALL,UY
D,ALL,UX
!
!                                     !Restrição devido a simetria
ALLSEL

NSEL,S,LOC,X,ML+Ap+Ap
D,all,UZ
D,all,UY
ALLSEL
!-----
!               8 - Opções de análise não linear
!-----
/SOLU
!
ANTYPE,0                                     !Análise estática
TUNIF,temperatura                           !Temperatura
! Método de solução
!
NROPT,FULL,,on                               !NR COMPLETO
EQSLV,SPAR,,0,                               !Solver SPARS

! Ferramentas de convergência

LNSRCH,AUTO                                  ! A principio desligado
porque Adaptive descent está ligado [Adaptive descent (Adptky on the NROPT
command) is a technique which switches to a "stiffer" matrix if convergence
difficulties are encountered, and switches back to the full tangent as the
solution convergences, resulting in the desired rapid convergence rate]
!
ARCLen,OFF                                   ! Se adaptive descent e/ou
line search ligado, arclen deve estar desligado
!
! Definição dos subseps
!
AUTOTS,1                                     !Passo de carga automático=método da bissecção
eresx,no                                     !Copia os resultados dos pontos de gauss para os nós
PSCONTROL,ALL,OFF                           !Desliga a paralelização
!
! Critério de parada
!
NEQIT, 25                                    ! N° máximo de equações de equilíbrio
CNVTOL,F,,0.10,2,1                          ! Critério de convergencia em força
CNVTOL,U,,0.10,2,                            ! Critério de convergencia em deslocamento
NCONV,2,,0,0,0                              ! Se não atingir a convergencia faz o indicado nesse
comando
!-----
!               9 - Cargas e solução
!-----
loadstep=0
tempo=0
!
! ANÁLISE DIFERIDA INICIAL (CURA)
!
*if,tinicial,gt,0,then
    tempo=tempo+tinicial
    TIME,tempo

```

```

AUTOTS,1
DELTIM,1,0.1,1
outres,all,all
loadstep=loadstep+1
LSWRITE,loadstep
SAVE
*endif

! ANÁLISE INSTANTÂNEA - PESO PRÓPRIO(carga0 e carga01)
!
*if,carga0,eq,1,then

    ! Peso próprio da estrutura

    ACEL,1,0,0,          !aceleração da gravidade
    ALLSELL,ALL

    ! Imposição do deslocamento

    *if,carga01,eq,1,then

        ! Calcula o valor da carga total
        ALLSEL

        NSEL,S,LOC,X,ML+Ap+Ap
        NSEL,R,LOC,Z,Hf-Dutil
        NSEL,R,LOC,Y,B/2
        D,all,ux,0.37
        allsel

    *endif

    ! Tempo e passos de carga
    tempo=tempo+1
    TIME,tempo          ! Time step prescrito
    AUTOTS,1           ! Passo de carga automático=método da
bissecção
    NSUBST,2500,25000,2500    ! Especifica o número de substeps do load
step

    ! Opção de salvar resultados
    OUTRES,ERASE
    OUTRES,ALL,1
    ! Opção de salvar caso de carga (load step)
    loadstep=loadstep+1
    LSWRITE,loadstep,
    SAVE
*endif
!
/SOLU
LSSOLVE,1,2,1

```

APÊNDICE B – Script flexão laje

```

!*****
! Programador: Marcelo Ferreira de Souza Bezerra Araújo
! Data: 22/02/2019
! Nome do arquivo: Laje em Concreto Têxtil
! unidades: cm, kN
!*****
/NOPR ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO ! Echo following commands to log
FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
/NOPR

!-----
!
!                               1 - ENTRADA DE DADOS
!-----
!
!-----
! 1.1 - GEOMETRIA
!-----
!
!1.1.1 - Dimensão da laje
!
Hf           =3.0           !Altura (cm)
B            =15.0          !Largura (cm)
Ap           =5.0           !Balanço apoio (cm)
DCarga       =20.0          !Distância entre o apoio e a carga (cm)
ML           =10.0          !Distância carga/simetria (cm)
Telemx       =1.25          !Tamanho elemento X
Telemy       =1.25          !Tamanho elemento Y
Telemz       =0.625         !Tamanho elemento Z
!1.1.2 - Malha têxtil
!
Dutil        =1.8           !Altura útil da seção (cm)
Afiowarp     =0.0184        !Área transversal do fio na dir.
warp(cm²)
Nfwarp       =6             !Número de fios em warp
HMT          =Afiowarp*Nfwarp/B !espessura equivalente
!
!-----
! 1.2 - MATERIAIS
!-----
!
!1.2.1 - CONCRETO (user)
!
Ec           =4542.0        !Módulo de elasticidade do concreto
(kN/cm²)
Vc           =0.2           !Coeficiente de poisson do concreto
Fck          =9.2           !Resistência à compressão (kN/cm²)
cimento      =2             ! tipo de cimento(1-
endurecimento lento,2-endurecimento normal,3-endurecimento rápido)
agregado     =1             !tipo de agregado(1-basalto;2-granito
;3-calcário;4-arenito)
analise      =21.002
gc           =2.5E-5        !peso específico do concreto,
kN/cm3

```

```

!
!!!!!!!!!!!!!!Propriedade para analise diferida
RH=89                                !Umidade do ambiente
hfic=0                                !Espessura ficticia, calculado ao
longo do script
ts=2                                  !Idade do concreto no inicio da
retração (tempo de cura), dias
tinicial=28                           !Tempo em que é aplicada a primeira
carga
temperatura=20                         !Temperatura
Fluencia=2010                          !considerar fluência (0-não;90-
CEB-FIP-90; 2010-FIB-2010)
Retracao=90                            !considerar retração (0-não;90-
CEB-FIP-90; 2010-FIB-2010)
!
!1.2.2 - Malha têxtil
!
Efinwarp =23854.9                      !Módulo de elasticidade final do
fio na direção warp (kN/cm²)
Vs =0.35                               !Coeficiente de poisson do malha
têxtil
TF =354.4                              !Tensão max do fio na direção warp
(kN/cm²)
!
!! -----
! 1.3 - PARÂMETROS PARA ANÁLISE
! -----
! CARGAS
! Carga permanentes (0-não considerar a carga;1-considerar a carga)
carga0=1                               !peso da estrutura
carga01=1                               !Deslocamento imposto no
experimento
!
!-----
!
! 2 - DEFINICAO DO TIPO DE ANALISE
!-----
!
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1                        !Análise estrutural
/PREP7
!
!-----
!
! 3 - DEFINICAO DOS ELEMENTOS
!-----
!
! 3.1 - CONCRETO - SOLID186 - elemento tipo 1
!-----
!
ET,1,SOLID186                          !Especifica o elemento solid186
!
KEYOPT,1,2,0                           !Integracao reduzida
KEYOPT,1,3,0                           !Elemento solido homogeneo (nao possui "layers")
KEYOPT,1,6,0                           !Fomulacao padrao para deslocamentos
KEYOPT,1,8,0                           !Opcao para transporte de massa desativado
KEYOPT,1,10,0
!
!-----
! 3.2 - Malha TÊxtil - SHELL281 - elemento tipo 2
!-----
!
ET,2,SHELL281                          !seleciona o elemento shell 281

```

```

KEYOPT,2,1,1           !Somente efeito membrana (Apenas Ux, Uz e Uy)
KEYOPT,2,8,2           !Armazena os resultados para TOP, BOTTOM e MID para
todas as camadas
!
SECTYPE,1,SHELL        !Definição das camadas do elemento :numero da
seção,elemento de shell
SECDATA,HMT,2,,5       !Espessura,material,,número de pontos de integração
SECOFFSET,MID
.
SECCONTROL,,,,,       !Comando que permite variar as propriedades da seção.
!
!-----
!                               4 - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS
!-----
!
! -----
!  4.1 - CONCRETO - USER - Material 1 - VER ENTRADA DE DADOS
! -----
!
Ac=Hf*B                 ! área da seção transversal da laje,cm²
Patm=2.0*Hf+2.0*B       ! perímetro da laje em contato com a atmosfera,cm
hfic=2.0*Ac/Patm        ! espessura fictícia, dependente do tamanho da
peça,cm
!
!
TB,USER,1,1,12,
TBTEMP,0
TBDATA,,Ec,vc,fck,cimento,agregado,analise
TBDATA,,fluencia,retracao,rh,hfic,ts,tinicial
!
! PESO ESPECÍFICO
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,gc
!
! -----
!  4.2 - Malha Têxtil - Material 2
! -----
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,Efinwarp   !Especifica o modulo de elasticidade do material 2
MPDATA,PRXY,2,,Vs      !Especifica o coef. de Poisson do material 2
!
TB,DMGI,2,1,4,1,        !TB, lab(DMGI - Damage INITIATION criteria),
mat(material 2),Ntemp (temp. associada), NPTS (numero de informacoes a serem
inseridas, neste caso sao 4 constantes - Qual modo de ruptura se ser
analizada),TBOPT (opção 1)

TBDATA,1,2,2,2,2        ! Tpdata,1 (iniciar a partir da primeira constante),
2(Modo de ruptura a partir:1- da deformação maxima; 2 - da tensao máxima
(usei sempre 2).

!
TB,DMGE,2,1,4,1,        !TB, lab(DMGE - Damage evolution law), mat(material
2),Ntemp (temp. associada), NPTS (numero de informacoes a serem inseridas,
neste caso sao 4 constantes - Um fator redutor de rigidez para cada tipo de
ruptura),TBOPT (opção 1)

TBDATA,,1,1,1,1         !Um fator redutor de rigidez (valor entre 0-1,
onde 1 reduz o máximo) para cada tipo de ruptura

```

```

!
TB,FCLI,2,1,1,1          !TB, lab(FCLI - strength limit), mat(material
2),Ntemp (temp. associada),NPTS (numero de informacoes a serem inseridas,
neste caso so 1 já que é apenas a tensao de ruptura em X),TBOPT (1- limite
definido para stress maximo)
TBDATA,1,TF             !Atribuição do valor da tensao de ruptura
!
!
!-----
!
!                       5 - GERAÇÃO DA GEOMETRIA DA PEÇA
!-----
!
!
/VIEW,1,,,-1           !controle de visualização
/ANG,1                 !controle de visualização
/ANG,1,30,XS,1        !controle de visualização
/ANG,1,30,YS,1        !controle de visualização
!
!-----
!
!                       5.1 - GERAÇÃO DA GEOMETRIA
!-----
BLOCK,0,Ap,0,B,0,Hf-Dutil          !controle de visualiz
BLOCK,0,Ap,0,B,Hf-Dutil,Hf
BLOCK,Ap,DCarga+Ap,0,B,0,Hf-Dutil
BLOCK,Ap,DCarga+Ap,0,B,Hf-Dutil,Hf
BLOCK,DCarga+Ap,ML+Ap+Dcarga,0,B,0,Hf-Dutil
BLOCK,DCarga+Ap,ML+Ap+Dcarga,0,B,Hf-Dutil,Hf

VGLUE,all
NUMMRG,KP,,,,,LOW
numcmp,volu
!
!
!-----
!
!                       6 - MESH
!-----
!
! 6.2 - Mesh da LAJE
!-----
TYPE, 1                 !Elemento utilizado - 1 representa o SOLID186
MAT, 1                 !Material utilizado - 1 representa o concreto
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,

LESIZE,5,Telemx       !Definição do tamanho do elemento finito X
LESIZE,79,Telemx      !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,83,Telemx      !Definição do tamanho do elemento finito

LESIZE,1,Telemy       !Definição do tamanho do elemento finito Y
LESIZE,8,Telemy       !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,20,Telemy      !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,27,Telemy      !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,30,Telemy      !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,42,Telemy      !Definição do tamanho do elemento finito

LESIZE,12,Telemz      !Definição do tamanho do elemento finito Z
LESIZE,76,Telemz      !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,35,Telemz      !Definição do tamanho do elemento finito
LESIZE,88,Telemz

```

```

SECNUM,1
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
VSEL,all
VMESH,ALL
!
! -----
! 6.1 - Mesh da MALHA - modificar
! -----
ALLSEL,ALL
TYPE, 2 !Elemento utilizado - 2 representa o SHELL281
MAT, 2 !Material utilizado - 2 representa a malha
têxtil
ESYS, 0
SECNUM,
!
MSHAPE,0,2D !Define malha 2D e elemento quadrilátero
MSHKEY,1 !Define malha mapeada
!
Asel,s,loc,z,Hf-Dutil
AMESH,all !Geracao da malha na area 3 (inferior)

! -----
! 7 - Condições de contorno
! -----
!
! !Restrição devido ao apoio esquerdo
ALLSEL

NSEL,S,LOC,X,Ap
NSEL,R,LOC,Z,0
D,ALL,UZ
!
! !Restrição devido a simetria
ALLSEL

NSEL,S,LOC,X,ML+DCarga+Ap
D,all,UX
!
!
ALLSEL
NSEL,S,LOC,X,0 !Restrição para impedir movimento de corpo
rígido lado esquerdo
NSEL,R,LOC,Y,B/2
D,ALL,UY
!
!
ALLSEL !Restrição para impedir movimento de corpo
rígido lado direito
NSEL,S,LOC,X,ML+DCarga+Ap
D,ALL,UY
ALLSEL
!
! -----
! 8 - Opções de análise não linear
! -----
!
/SOLU
!
ANTYPE,0 !Análise estática

```



```

TUNIF,temperatura           !Temperatura
!NLGEOM,ON                 !Considera a não linearidade geométrica
!
! Método de solução
!
NROPT,FULL,,on            !NR COMPLETO
EQSLV,SPAR,,0,           !Solver SPARS

! Ferramentas de convergência

LNSRCH,AUTO                ! A principio desligado porque Adaptive
descent está ligado
ARCLN,OFF                 ! Se adaptive descent e/ou line search
ligado, arclen deve estar desligado
!
! Definição dos subseps
!
AUTOTS,1                  !Passo de carga automático=método da
bissecção
eresx,no                  !Copia os resultados dos pontos de gauss
para os nós
PSCONTROL,ALL,OFF        !Desliga a paralelização
!
! Critério de parada
!
NEQIT, 25                 ! N° máximo de equações de equilíbrio
CNVTOL,F,,0.15,2,1      ! Critério de convergencia em força
CNVTOL,U,,0.15,2,      ! Critério de convergencia em
deslocamento
NCNV,2,,0,0,0
!
!-----
!                               9 - Cargas e solução
!-----
loadstep=0
tempo=0
!
! ANÁLISE DIFERIDA INICIAL (CURA)
!
*if,tinicial,gt,0,then
    tempo=tempo+tinicial
    TIME,tempo
    AUTOTS,1
    DELTIM,1,0.1,1
    outres,all,all
    loadstep=loadstep+1
    LSWRITE,loadstep
    SAVE
*endif

! ANÁLISE INSTANTÂNEA - PESO PRÓPRIO(carga0 e carga01)
!
*if,carga0,eq,1,then

    ! Peso próprio da estrutura

    ACEL,0,0,-1,          !aceleração da gravidade =-1
    ALLSELL,ALL

    ! Imposição do deslocamento

```

```

*if,carga01,eq,1,then

    ! Calcula o valor da carga total
    ALLSEL

    NSEL,S,LOC,X,Ap+DCarga
    NSEL,R,LOC,Z,Hf
    D,all,uz,-2.8125
    allsel

*endif
! Tempo e passos de carga
tempo=tempo+1
TIME,tempo           ! Time step prescrito
AUTOTS,1           ! Passo de carga automático=método
da bissecção
NSUBST,4500,45000,4500   ! Especifica o número de substeps
do load step
! Opção de salvar resultados
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
! Opção de salvar caso de carga (load step)
loadstep=loadstep+1
LSWRITE,loadstep,
SAVE
*endif
!
/SOLU
LSSOLVE,1,2,1
!

```

APÊNDICE C – Script flexão viga I

```

!*****!
Programador: Marcelo Ferreira de Souza Bezerra Araújo
! Data: 22/04/2019
! Nome do arquivo: Viga I em Concreto Têxtil
! unidades: cm, kN
!*****!
/NOPR ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO ! Echo following commands to log
FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
/NOPR

!-----
!
!                               1 - ENTRADA DE DADOS
!-----

! -----
!  1.1 - GEOMETRIA
! -----
!
!1.1.1 - Dimensão da laje
!
AM                =1.2                !Altura da mesa (cm)
AFlange           =0.56                !Altura Flange (cm)
AA                =8.48                !Altura Alma sem Flange (cm)
LM                =11.0                !Largura mesa (cm)
LA                =1.8                 !Largura alma (cm)
LFlange           =4.6                 !Largura Flange (cm)
Ap                =10.0                !Balanço apoio (cm)
DCarga            =50.0                !Distância entre o apoio e a carga (cm)
"a"
ML                =75-DCarga-Ap        !Distância carga/simetria (cm)
Telemx            =2.0                 !Tamanho elemento X
Telemy            =2.0                 !Tamanho elemento Y
Telemz            =2.0                 !Tamanho elemento Y
!
!1.1.2 - Malha têxtil
!
!Malha têxtil Mesa inferior
!
Atotal            =12                  !Altura total da viga I (cm)
DMI               =11.4                !Altura útil da malha mesa Inferior (cm)
DMS               =0.7                 !Altura útil da malha mesa Superior (cm)
AFio              =0.0184              !Área transversal do fio na direção
warp(cm²) [Numero de malhas * área de cada malha]
NFMI              =4                   !Número de fios malha mesa Inferior
NFMS              =4                   !Número de fios malha mesa Superior
NFA               =8                   !Número de fios malha alma
AACM              =DMI-DMS              !Altura da Alma com malha textil (cm)
HFMI              =AFio*NFMI/LM        !Altura equivalente malha mesa Inferior
(cm)
HFMS              =AFio*NFMS/LM        !Altura equivalente malha mesa Superior
(cm)
HFA               =AFio*NFA/AACM       !Altura equivalente malha alma (cm)

! -----
!  1.2 - MATERIAIS

```

```

! -----
!
!1.2.1 - CONCRETO (user)
!
Ec           =4542.0           !Módulo de elasticidade do concreto
(kN/cm²)
Vc           =0.2             !Coeficiente de poisson do concreto
Fck         =9.8             !Resistência à compressão (kN/cm²)
cimento     =2               !tipo de cimento(1-endurecimento lento,
2-endurecimento normal,3-endurecimento rápido)
agregado    =1               ! tipo de agregado(1-basalto;2-granito;
3-calcário;4-arenito)
analise     =21.002
gc          =2.5E-5          ! peso específico do concreto,kN/cm3

!!!!!!!!!!!!!!Propriedade para analise diferida
RH=89                !Umidade do ambiente
hfic=0              !Espessura fictícia, calculado ao longo
do script
ts=2                !Idade do concreto no inicio da retração
(tempo de cura), dias
tinicial=28         !Tempo em que é aplicada a primeira carga
temperatura=20
                    !Temperatura
Fluencia=2010       ! considerar fluência (0-não;90-CEB-FIP-
90; 2010-FIB-2010)
Retracao=90         ! considerar retração (0-não;90-CEB-FIP-
90; 2010-FIB-2010)
!
!1.2.2 - Malha têxtil
!
Efinwarp     =23854.9        !Módulo de elasticidade final do fio na
direção warp (kN/cm²)
Vs           =0.35          !Coeficiente de poisson do malha têxtil
TF           =354.4         !Tensão final do fio na direção warp
(kN/cm²)
!
!! -----
! 1.3 - PARÂMETROS PARA ANÁLISE
! -----
! CARGAS
! Carga permanentes (0-não considerar a carga;1-considerar a carga)
carga0=1          !peso da estrutura
carga01=1         !Deslocamento imposto no experimento
!
!-----
!
!                               2 - DEFINICAO DO TIPO DE ANALISE
!-----
!
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1           !Análise estrutural
/PREP7
!
!-----
!
!                               3 - DEFINICAO DOS ELEMENTOS
!-----
!
!-----
! 3.1 - CONCRETO - SOLID186 - elemento tipo 1
!-----
!

```

```

ET,1,SOLID186          !Especifica o elemento solid186
!
KEYOPT,1,2,0          !Integracao reduzida
KEYOPT,1,3,0          !Elemento solido homogeneo (nao possui "layers")
KEYOPT,1,6,0          !Formulacao padrao para deslocamentos
KEYOPT,1,8,0          !Opcao para transporte de massa desativado
KEYOPT,1,10,0
! -----
! 3.2 - Malha Têxtil - SHELL281 - elemento tipo 2
! -----
ET,2,SHELL281         !seleciona o elemento shell 281
KEYOPT,2,1,1         !Somente efeito membrana (Apenas Ux, Uz e Uy)
KEYOPT,2,8,2         !Armazena os resultados para TOP, BOTTOM e MID para
todas as camadas
!
!Malha Têxtil Mesa inferior
!
SECTYPE,2,SHELL       !Definição das camadas do elemento:numero da
seção,elemento de shell

SECDATA,HFMI,2,,5     !Espessura,material,,número de pontos de integração
SECOFFSET,MID         !Desloca a posição do nó na seção do elemento
SECCONTROL,,,,,      !Comando que permite variar as propriedades da seção.
!Malha Têxtil Mesa Superior

!
SECTYPE,3,SHELL       !Definição das camadas do elemento:numero da
seção,elemento de shell

SECDATA,HFMS,2,,5     !Espessura,material,,número de pontos de integração
SECOFFSET,MID         !Desloca a posição do nó na seção do elemento

SECCONTROL,,,,,      !Comando que permite variar as propriedades da seção.

!Malha Têxtil Alma
!
SECTYPE,4,SHELL       !Definição das camadas do elemento:numero da
seção,elemento de shell

SECDATA,HFA,2,,5     !Espessura,material,,número de pontos de integração
SECOFFSET,MID         !Desloca a posição do nó na seção do elemento

SECCONTROL,,,,,      !Comando que permite variar as propriedades da seção.
!
!-----
!                               4 - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS
!-----
! -----
! 4.1 - CONCRETO - USER - Material 1 - VER ENTRADA DE DADOS
! -----
!
Ac=Atotal*LA+(4*LFlange*AM)+2*LFlange*AFlange      !área da seção
transversal da laje,cm²

Patm=62.30                                           ! perímetro da laje em
contato com a atmosfera,cm

hfic=2.0*Ac/Patm                                     ! espessura fictícia,
dependente do tamanho da peça,cm

```

```

TB,USER,1,1,12,
TBTEMP,0
TBDATA,,Ec,vc,fck,cimento,agregado,analise
TBDATA,,fluencia,retracao,rh,hfic,ts,tinicial
!
! PESO ESPECÍFICO
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,gc
!
! -----
! 4.2 - Malha Têxtil - Material 2
! -----
!
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,Efinwarp !Especifica o modulo de elasticidade do material 2
MPDATA,PRXY,2,,Vs !Especifica o coef. de Poisson do material 2
TB,DMGI,2,1,4,1, !TB, lab(DMGI - Damage INITIATION criteria),
mat(material 2),Ntemp (temp. associada),NPTS (numero de informações a serem
inseridas, neste caso sao 4 constantes - Qual modo de ruptura se ser
analisada),TBOPT (opção)

TBDATA,1,2,2,2,2 !Tbdata,1 (iniciar a partir da primeira
constante),2(Modo de ruptura a partir:1- da deformação maxima; 2 - da tensao
máxima (usei sempre 2).)
!
TB,DMGE,2,1,4,1, !TB, lab(DMGE - Damage evolution law), mat(material
2),Ntemp (temp. associada),NPTS (numero de informações a serem inseridas,
neste caso sao 4 constantes - Um fator redutor de rigidez para cada tipo de
ruptura),TBOPT (opção 1)

TBDATA,,1,1,1,1 !Um fator redutor de rigidez (valor entre 0-1, onde
1 reduz o máximo) para cada tipo de ruptura
!
TB,FCLI,2,1,1,1 !TB, lab(FCLI - strength limit), mat(material
2),Ntemp (temp. associada),NPTS (numero de informações a serem inseridas,
neste caso so 1 já que é apenas a tensao de ruptura em X),TBOPT (1- limite
definido para stress maximo)

TBDATA,1,TF !Atribuição do valor da tensao de ruptura
!
! -----
! 5 - GERAÇÃO DA GEOMETRIA DA PEÇA
! -----
!
!
!
/VIEW,1,,-1 !controle de visualização
/ANG,1 !controle de visualização
/ANG,1,30,XS,1 !controle de visualização
/ANG,1,30,YS,1 !controle de visualização
!
!
! -----
! 5.1 - GERAÇÃO DA GEOMETRIA
! -----
!Parte 1- Retangulo Altura e Base da viga I
BLOCK,0,Ap,0,LM,0,Atotal
BLOCK,Ap,DCarga+Ap,0,LM,0,Atotal
BLOCK,DCarga+Ap,ML+Ap+Dcarga,0,LM,0,Atotal
!

```

```

!Parte 2- Volume (Direita)
!
K,1001,0,0,AM ! Coordenada x, y e z do KP
K,1002,0,LFlange,AM+AFlange ! Coordenada x, y e z do KP
K,1003,0,LFlange,Atotal-AM-AFlange ! Coordenada x, y e z do KP
K,1004,0,0,Atotal-AM

K,1005,ML+Ap+Dcarga,0,AM ! Coordenada x, y e z do KP
K,1006,ML+Ap+Dcarga,LFlange,AM+AFlange ! Coordenada x, y e z do KP
K,1007,ML+Ap+Dcarga,LFlange,Atotal-AM-AFlange ! Coordenada x, y e z do KP
K,1008,ML+Ap+Dcarga,0,Atotal-AM

V,1001,1002,1003,1004,1005,1006,1007,1008

VSBV,all,4,,,

!Parte 3- Volume (Esquerda)
!
K,2001,0,LM,AM ! Coordenada x, y e z do KP
K,2002,0,LM-LFlange,AM+AFlange ! Coordenada x, y e z do KP
K,2003,0,LM-LFlange,Atotal-AM-AFlange ! Coordenada x, y e z do KP
K,2004,0,LM,Atotal-AM

K,2005,ML+Ap+Dcarga,LM,AM ! Coordenada x, y e z do KP
K,2006,ML+Ap+Dcarga,LM-LFlange,AM+AFlange ! Coordenada x, y e z do KP
K,2007,ML+Ap+Dcarga,LM-LFlange,Atotal-AM-AFlange ! Coordenada x, y e z do KP
K,2008,ML+Ap+Dcarga,LM,Atotal-AM

V,2001,2002,2003,2004,2005,2006,2007,2008

VSBV,all,1,,,

!CORTES HORIZONTAIS
WPOFF,0,0,Atotal-DMI
VSBW,all

WPCSYS,-1,0 ! retorna WP ao global
WPOFF,0,0,AM+AFlange
VSBW,all

WPCSYS,-1,0 ! retorna WP ao global
WPOFF,0,0,AM+AFlange+AA
VSBW,all

WPCSYS,-1,0 ! retorna WP ao global
WPOFF,0,0,Atotal-DMS
VSBW,all

!CORTES VERTICAIS

WPCSYS,-1,0 ! retorna WP ao global
WPROT,0,-90,0 ! rotaciona WP
WPOFF,0,0,Lflange ! translada para final do perfil
VSBW,all

WPCSYS,-1,0 ! retorna WP ao global
WPROT,0,-90,0 ! rotaciona WP
WPOFF,0,0,Lflange+LA/2 ! translada para final do perfil
VSBW,all

WPCSYS,-1,0 ! retorna WP ao global

```

```

WPROT,0,-90,0           ! rotaciona WP
WPOFF,0,0,Lflange+LA    ! translada para final do perfil
VSBW,all
!
!
WPCSYS,-1,0
VGLUE,all
NUMMRG,KP,,,,LOW
numcmp,volu
!-----
!                               6 - MESH
!-----
! -----
! 6.2 - Mesh da LAJE - Modificar
! -----
TYPE, 1                !Elemento utilizado - 1 representa o SOLID186
MAT, 1                !Material utilizado - 1 representa o concreto
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,

DESIZE,1,1,,,,,30,,   !Modificando o número mínimo de divisoes por linha

Lsel,s,loc,y,0          !Seleção das linhas para divisória de elementos
finitos em X

Lsel,A,loc,y,LFlange
Lsel,A,loc,y,LFlange+LA/2
Lsel,A,loc,y,LFlange+LA
Lsel,A,loc,y,LM

Lsel,u,loc,x,0
Lsel,u,loc,x,Ap
Lsel,u,loc,x,Ap+Dcarga
Lsel,u,loc,x,ML+Ap+Dcarga

LESIZE,all,Telemx     !Definição do tamanho do elemento finito X

allsel
Lsel,s,loc,x,0          !Seleção das linhas para divisória de elementos
finitos em Y

Lsel,A,loc,x,Ap
Lsel,A,loc,x,Ap+Dcarga
Lsel,A,loc,x,ML+Ap+Dcarga

Lsel,u,loc,y,0
Lsel,u,loc,y,LFlange
Lsel,u,loc,y,LFlange+LA/2
Lsel,u,loc,y,LFlange+LA
Lsel,u,loc,y,LM

LESIZE,all,Telemy     !Definição do tamanho do elemento finito Y

ALLSEL
Lsel,s,loc,x,0          !Seleção das linhas para divisória de elementos
finitos em Z

Lsel,A,loc,x,Ap
Lsel,A,loc,x,Ap+Dcarga
Lsel,A,loc,x,ML+Ap+Dcarga

```



```

Lsel,u,loc,z,0
Lsel,u,loc,z,Atotal-DMI
Lsel,u,loc,z,AM
Lsel,u,loc,z,AM+AFlange
Lsel,u,loc,y,0

Lsel,u,loc,z,Atotal-AM
Lsel,u,loc,z,Atotal-DMS
Lsel,u,loc,z,Atotal
Lsel,u,loc,z,Atotal-AM-AFlange
Lsel,u,loc,y,LM

Lsel,u,loc,y,0.1,LFlange-0.1
Lsel,u,loc,y,LFlange+LA+0.1,LM-0.1

LESIZE,all,TelemZ      !Definição do tamanho do elemento finito Z

allsel
SECTNUM,1
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
VSEL,all
VSWEEP,ALL
!
NUMMRG,NODE,,,,LOW
!
! -----
!   6.1 - Mesh da MALHA
! -----
!
!MESH MALHA MESA INFERIOR
!
ALLSEL,ALL
TYPE, 2      !Elemento utilizado - 2 representa o SHELL281
MAT, 2      !Material utilizado - 2 representa a malha têxtil
ESYS, 0
SECTNUM,2      !Secção utilizada - 2 representa a malha têxtil da
mesa inferior; 3-mesa superior; 4-Alma;
!
MSHAPE,0,2D      !Define malha 2D e elemento quadrilátero
MSHKEY,1      !Define malha mapeada
!
ASEL,s,loc,z,Atotal-DMI
AMESH,all      !Geracao da malha na area 3 (inferior)

!
!MESH MALHA MESA SUPERIOR
!
ALLSEL,ALL
TYPE, 2      !Elemento utilizado - 2 representa o SHELL281
MAT, 2      !Material utilizado - 2 representa a malha têxtil
ESYS, 0
SECTNUM,3      !Secção utilizada - 2 representa a malha têxtil da
mesa inferior; 3-mesa superior; 4-Alma;
!
MSHAPE,0,2D      !Define malha 2D e elemento quadrilátero
MSHKEY,1      !Define malha mapeada
!
ASEL,s,loc,z,Atotal-DMS
AMESH,all      !Geracao da malha na area 3 (inferior)

```

```

!
!MESH MALHA ALMA
!
ALLSEL,ALL
TYPE, 2           !Elemento utilizado - 2 representa o SHELL281
MAT, 2            !Material utilizado - 2 representa a malha têxtil
ESYS, 0
SECNUM,4         Secção utilizada - 2 representa a malha têxtil da
                mesa inferior; 3-mesa superior; 4-Alma;
!
MSHAPE,0,2D      !Define malha 2D e elemento quadrilátero
MSHKEY,1         !Define malha mapeada
!
ASEL,s,loc,y,LFlange+LA/2
ASEL,u,loc,z,0,Atotal-DMI
ASEL,u,loc,z,Atotal-DMS,Atotal
AMESH,all

NUMMRG,NODE,,,,LOW      !Funde os nós da malha que se encontram no mesmo lugar
                        e mantém a numeração do mais baixo

NUMCMP,NODE
!-----
!                               7 - Condições de contorno           -      AUTOMATIZAR
!-----
!
!                               !Restrição devido ao apoio esquerdo
ALLSEL
NSEL,S,LOC,X,Ap
NSEL,R,LOC,Z,0
D,ALL,UZ
!
!                               !Restrição devido a simetria
ALLSEL
NSEL,S,LOC,X,ML+DCarga+Ap
D,all,UX
!
!                               !Restrição para impedir movimento de corpo rígido lado esquerdo
ALLSEL
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Y,LM/2
D,ALL,UY
!
!                               !Restrição para impedir movimento de corpo rígido lado direito
ALLSEL
NSEL,S,LOC,X,ML+DCarga+Ap
D,ALL,UY
ALLSEL
!!-----
!                               8 - Opções de análise não linear
!-----
/SOLU
!
ANTYPE,0          !Análise estática
TUNIF,temperatura !Temperatura
!
! Método de solução
!
NROPT,FULL,,on   !NR COMPLETO
EQSLV,SPAR,,0,  !Solver SPARS

```

```

! Ferramentas de convergência

LNSRCH,AUTO      ! A principio desligado porque Adaptive descent está ligado

ARCLLEN,OFF      ! Se adaptive descent e/ou line serarch ligado, arclen deve
estar desligado
!
! Definição dos subseps
!
AUTOTS,1         !Passo de carga automático=método da bissecção
eresx,no        !Copia os resultados dos pontos de gauss para os nós
PSCONTROL,ALL,OFF !Desliga a paralelização
!
! Critério de parada
!
NEQIT, 25        ! N° máximo de equações de equilíbrio
CNVTOL,F,,0.20,2,1 ! Critério de convergencia em força
CNVTOL,U,,0.20,2, ! Critério de convergencia em deslocamento
NCNV,2,,0,0,0
!-----
!                               9 - Cargas e solução
!-----
loadstep=0
tempo=0
!
! ANÁLISE DIFERIDA INICIAL (CURA)
!
*if,tinicial,gt,0,then
    tempo=tempo+tinicial
    TIME,tempo
    AUTOTS,1
    DELTIM,1,0.1,1
    outres,all,all
    loadstep=loadstep+1
    LSWRITE,loadstep
    SAVE
*endif

! ANÁLISE INSTANTÂNEA - PESO PRÓPRIO(carga0 e carga01)
!
*if,carga0,eq,1,then

    ! Peso próprio da estrutura
    ACEL,0,0,-1, !aceleração da gravidade =-1, porque foi dado
valor de peso específico

    ALLSELL,ALL

    ! Imposição do deslocamento

    *if,carga01,eq,1,then

        ! Calcula o valor da carga total
        ALLSEL

        NSEL,S,LOC,X,Ap+DCarga
        NSEL,R,LOC,Z,Atotal
        D,all,uz,-2.5
        allsel

```

```
*endif
! Tempo e passos de carga
tempo=tempo+1
TIME,tempo           ! Time step prescrito
AUTOTS,1            ! Passo de carga automático=método
da bissecção

NSUBST,5000,50000,5000      ! Especifica o número de substeps
do load step

! Opção de salvar resultados
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
! Opção de salvar caso de carga (load step)
loadstep=loadstep+1
LSWRITE,loadstep,
SAVE
*endif
/SOLU
LSSOLVE,1,2,1
```