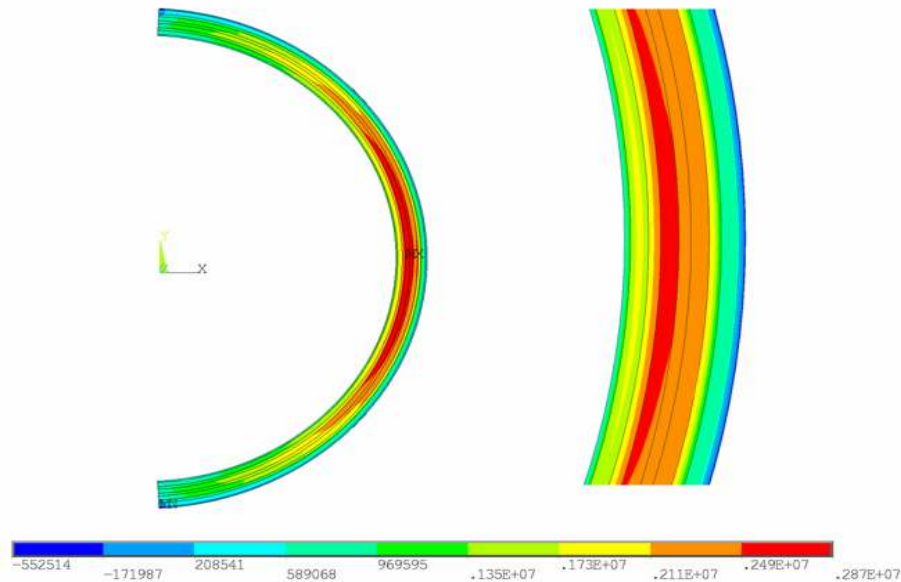




ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**



## **Estudo das Tensões Interlaminares e Rotura de Elementos Curvos em Materiais Compósitos**

**DAVID MIGUEL QUENDERA CANDEIAS**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor João Manuel Candeias Travassos  
Mestre Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Doutora Maria Amélia Ramos Loja  
Doutor João Carlos Quaresma Dias  
Doutor João Manuel Candeias Travassos  
Mestre Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite

**Novembro de 2009**



## Resumo

Este trabalho aborda o comportamento mecânico de elementos curvos em materiais compósitos aquando sujeitos a forças e momentos nas extremidades. Os modos de falha mais comuns são estudados em detalhe: falha transversal na matriz devido a tensões de flexão (tensões circunferenciais), ou falha por delaminação devido as tensões interlaminares de tracção verificadas ao longo da espessura na região curva (tensões radiais). Inicialmente, faz-se uma abordagem sobre a influência de *Z-Pins* na resistência interlaminar, uma abordagem sobre os efeitos de bordo, e sobre tensões interlaminares com base em teorias *Layerwise* de ordem superior. Salienta-se, ainda, a importância do estudo feito com o *World-Wide Failure Exercise* (WWFE) (Hinton et al. 2004) na comunidade científica relacionada com o tema dos materiais compósitos. O presente trabalho, é essencialmente dividido em duas partes: modelos analíticos e modelos numéricos. São estudados provetes curvos, em forma de C (semicircular), geometria analisada por Ko e Jackson (1989); e em forma de L (cantoneira de abas iguais), analisados por Sun e Kelly (1988). Começa-se por fazer uma análise teórica, através da Teoria Multicamada, ao trabalho Ko e Jackson, autores da mesma. Analisou-se também, através desta teoria, a parte em quarto de círculo da viga estudada por Sun e Kelly. Após ter a solução analítica bem compreendida, essa teoria é aplicada ao principal estudo deste trabalho, um provete semicircular, usando os empilhamentos de Sun e Kelly. É ainda estudado, e aplicado a este último, o critério de falha em três dimensões (3D) proposto por Hashin (1980). Na segunda parte, é feita uma validação numérica dos três casos anteriores, com recurso ao software comercial de elementos finitos (EF), ANSYS. Estes estudos de EF têm a diferença, relativamente aos originais, de serem em 3D, podendo assim ser retiradas todas as tensões necessárias para se aplicar o critério de falha. No final, é feita uma comparação geral entre os resultados analíticos e numéricos.

## Palavras-chave

Elementos Curvos em Materiais Compósitos, Delaminação, Falha na Matriz, Teoria Multicamada, WWFE, Critério de Hashin 3D, MEF 3D, ANSYS.

## **Abstract**

This work deals with the mechanical behavior of curved elements in composite materials when subjected to forces and moments at the ends. The common failure modes are studied in detail: transverse matrix cracking due to bending stress (circumferential stress), or delamination due to through-the-thickness normal stress in the curved region (radial stress). Initially, it is an approach to the influence of *Z-Pins* resistance interlaminar approach on the effects of board and interlaminar stresses on the basis of *Layerwise* higher order theories. It notes, also, the importance of study of the World-Wide Failure Exercise (WWFE) (Hinton et al. 2004) in the scientific community related to the topic of composite materials. This work, it is mainly divided into two parts: analytical models and numerical models. The author studied curved C-shaped (semicircular) coupons, based on the previous work of Ko and Jackson (1989), and L-shaped (equal arms L beam), analyzed by Sun and Kelly (1988). It begins from getting a sound comprehension of the *Multilayer Theory*, by programming the same geometry and stacking sequence of Ko and Jackson's work. The geometry and stacking sequences of Sun and Kelly's work is also analyzed by the *Multilayer Theory*. After the analytic solution well understood, this theory is applied to the main study of this work, a semicircular sample, using the stacking sequences of Sun and Kelly. It is also studied and applied to the latter, the failure criterion in three dimensions (3D) proposed by Hashin (1980). In the second part, there is a numerical validation of the three previous cases, using the commercial software of finite elements (FE), ANSYS. These studies of FE have the difference compared to the originals, in that they are 3D and therefore, the several tridimensional stress components can be read and introduced in the criterion formula. A general comparison between the analytical and numerical result is made. Finally, is made a reference to the importance of the study.

## **Key-words**

Curved Composite Beams, Delamination, Matrix Failure, Multilayer Theory, WWFE, Hashin Criteria 3D, MEF 3D, ANSYS.

## Nomenclatura

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
$a$	Raio interno da zona curva do elemento curvo
$A, B, D$	Constantes arbitrárias associadas com F para o caso de carga de forças nos extremos
$a_i$	Raio exterior da i-ésima camada da zona curva do elemento curvo
$b$	Raio externo do elemento curvo
$B', C', D'$	Constantes arbitrárias associadas com F para o caso de carga de momentos nos extremos
$e$	Braço do momento M, relativamente ao início da parte semicircular
$E$	Módulo de elasticidade
$E_L$	Módulo de elasticidade de uma camada, na direcção da fibra
$E_r$	Módulo de elasticidade de uma camada, na direcção radial
$E_T$	Módulo de elasticidade de uma camada, na direcção transversal à fibra
$E_Z$	Módulo de elasticidade de uma camada, na direcção normal à camada
$E_\theta$	Módulo de elasticidade de uma camada, na direcção circunferencial
FFC	Falha da Fibra à Compressão
FFT	Falha da Fibra à Tracção
FMC	Falha da Matriz à Compressão
FMT	Falha da Matriz à Tracção
FRP	Fibre Reinforced Polymer Composites – Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados por Fibras
$G_{LT}$	Módulo de elasticidade transversal (ou de corte) de cada camada
$G_{LZ}; G_{TZ};$ $G_{rZ}; G_{\theta Z}$	Módulo de elasticidade transversal (ou de corte)
$G_{r\theta}$	Módulo de elasticidade transversal (ou de corte) associado ao sistema cilíndrico de coordenadas $r-\theta$

$G_{\theta r}$	Módulo de elasticidade transversal (ou de corte) associado ao sistema cilíndrico de coordenadas $\theta$ - $r$
$i$	Índice associado à $i$ -ésima camada, $i = 1, 2, 3, \dots, N$
$k$	Parâmetro anisotrópico, $k = \sqrt{\frac{E_{\theta}}{E_r}}$
$L$	Braço do momento $M$ , relativamente a meio da espessura, na zona onde a tensão radial é máxima, $L = e + a + t/2$
$L, T, Z$	Sistema de coordenadas cartesianas materiais (sistema material ou local)
$M$	Momento aplicado nos extremos da parte semicircular
$m$	Valor máximo da expressão do critério de Hashin
MEF	Método dos Elementos Finitos
$N$	Número total de camadas
$P$	Carga aplicada nos extremos do elemento curvo ou na parte semicircular
$P_{crit}$	Carga crítica que provoca rotura segundo o critério de Hashin
$r, \theta, z$	Sistema de coordenadas cilíndricas
$S$	Resistência mecânica ao corte no plano $L$ - $T$ , ou valor admissível da tensão de corte $\sigma_{12}$
$S_T$	Resistência mecânica ao corte interlaminar, ou valor admissível da tensão de corte $\sigma_{23}$
$t$	Espessura do elemento curvo
UK BS	United Kingdom British Standard – Normas Britânicas, Reino Unido
US MIL	United States Military – Normas Militares, Estados Unidos
$w$	Largura do elemento curvo
WWFE	World-Wide Failure Exercise – Exercício Global de Falha
$X, Y, Z$	Sistema de coordenadas cartesianas rectangulares
$X_C$	Resistência mecânica das camadas do compósito na direcção das fibras, à compressão
$X_T$	Resistência mecânica das camadas do compósito na direcção das fibras, à tracção

$Y_C$	Resistência mecânica das camadas do compósito na direcção transversal às fibras, à compressão
$Y_T$	Resistência mecânica das camadas do compósito na direcção transversal às fibras, à tracção
$\beta$	Parâmetro anisotrópico, $\beta = \sqrt{1 + \frac{E_\theta}{E_r}(1 - 2\nu_{r\theta}) + \frac{E_\theta}{G_{r\theta}}}$
$\delta$	Espessura de cada lâmina
$\nu$ ; $\nu_{TL}$ ; $\nu_{LZ}$ ; $\nu_{TZ}$ ; $\nu_{r\theta}$ ; $\nu_{\theta r}$ ; $\nu_{rZ}$ ; $\nu_{\theta Z}$	Coefficientes de Poisson
$\nu_{LT}$	Coefficiente de Poisson de cada camada
$\tau_{LT}$	Tensão de corte no plano da lâmina, $L-T$
$r$	Distância radial
$r_D$	Localização radial de $\sigma_D$
$r_m$	Localização radial de $(\sigma_r)_{max}$
$r'_m$	Localização radial de $(\sigma'_r)_{max}$
$\sigma_D$	Tensão de delaminação no elemento curvo
$\sigma_{ij}$	Componentes de tensão de corte verificada na direcção $ij$ . Se índices iguais, tensões normais, se diferentes tensões de corte
$\sigma_r$	Tensão radial
$\sigma_\theta$	Tensão circunferencial
$(\sigma_r)_{max}$	Tensão de delaminação para o caso de carga $P$ , $\sigma_r(r_m, \pi/2)$
$(\sigma'_r)_{max}$	Tensão de delaminação para o caso de carga $M$ , $\sigma'_r(r'_m)$



## **Agradecimentos**

- Agradeço ao orientador científico, Professor Doutor João Manuel Candeias Travassos, por me ter dado a oportunidade de trabalhar na área dos materiais compósitos.
- Um especial agradecimento ao Professor Mestre Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite do DEM/ISEL, que tudo fez para me ensinar, e principalmente motivar, durante todo este trabalho.
- Agradeço à Professora Doutora Maria Amélia Ramos Loja do DEM/ISEL, pelas sugestões para fazer um trabalho mais abrangente e correcto.



À minha Família e à Maria Inês



# Índice

<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>PALAVRAS-CHAVE</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>KEY-WORDS</b> .....	iv
<b>NOMENCLATURA</b> .....	v
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	ix
<b>ÍNDICE</b> .....	xiii
<b>0. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO UM – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
<b>1 – ELEMENTOS CURVOS FEITOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS</b> .....	5
<b>2 – RESISTÊNCIA INTERLAMINAR COM BASE NA TÉCNICA DE Z-PINS</b> .....	16
<b>3 – EFEITOS DE BORDO LIVRE EM COMPÓSITOS LAMINADOS</b> .....	19
<b>4 – ESTUDO DAS TENSÕES INTERLAMINARES COM BASE EM TEORIAS <i>LAYERWISE</i> E EM TEORIAS DE ORDEM SUPERIOR</b> .....	21
<b>5 – WORLD-WIDE FAILURE EXERCISE: A SUA ORIGEM, CONCEITO E CONTEÚDO</b> .....	23
<b>5.1 – A ORIGEM E RACIONALIDADE DO WWFE</b> .....	23
<b>5.2 – OBJECTIVOS DO WWFE</b> .....	24
<b>5.3 – CONSTRUÇÃO DE UM TESTE DEFINITIVO DE UMA TEORIA DE FALHA: PRINCÍPIOS CHAVE</b> .....	24
<b>5.4 – PROCESSO DE SELECÇÃO DAS TEORIAS DE FALHA E ARGUMENTOS PARA PARTICIPAREM NO WWFE</b> .....	25
<b>5.5 – RESULTADOS DO WWFE</b> .....	27
<b>CAPÍTULO DOIS – GEOMETRIA E MATERIAL</b> .....	29
<b>6 – INTRODUÇÃO</b> .....	29
<b>7 – GEOMETRIA E MATERIAL DOS ELEMENTOS CURVOS</b> .....	29
<b>7.1 – PROVETE DE SUN E KELLY (1988)</b> .....	29
<b>7.2 – PROVETE DE KO E JACKSON (1989)</b> .....	32
<b>7.3 – ESTUDO DO NOVO PROVETE</b> .....	35

CAPÍTULO TRÊS – MODELOS ANALÍTICOS.....	39
<b>8 – INTRODUÇÃO</b> .....	39
<b>9 – TEORIA MULTICAMADA</b> .....	39
<b>9.1 – MULTILAYER THEORY APLICADA AO PROVETE DE KO E JACKSON (1989)</b> .....	46
<b>9.2 – MULTILAYER THEORY APLICADA AO PROVETE DE SUN E KELLY (1988)</b> .....	47
<b>9.2.1 – ESTUDO DA LAYUP H</b> .....	47
<b>9.2.2 – ESTUDO DA LAYUP I</b> .....	48
<b>9.2.3 – ESTUDO DA LAYUP J</b> .....	49
<b>9.3 – MULTILAYER THEORY APLICADA AO NOVO PROVETE EM ESTUDO</b> .....	50
<b>9.3.1 – ESTUDO DA LAYUP H</b> .....	50
<b>9.3.2 – ESTUDO DA LAYUP I</b> .....	51
<b>9.3.3 – ESTUDO DA LAYUP J</b> .....	52
<b>10 – CRITÉRIO DE ROTURA DE HASHIN</b> .....	53
CAPÍTULO QUATRO – MODELOS NUMÉRICOS .....	59
<b>11 – INTRODUÇÃO</b> .....	59
<b>12 – MODELO MEF 3D DE SUN E KELLY (1988) EM ANSYS</b> .....	59
<b>13 – MODELO MEF 3D DE KO E JACKSON (1989) EM ANSYS</b> .....	62
<b>14 – MODELO MEF 3D DO PRESENTE ESTUDO EM ANSYS</b> .....	63
CAPÍTULO CINCO – RESULTADOS E ANÁLISE.....	59
<b>15 – ANÁLISE DO ARTIGO DE SUN E KELLY (1988)</b> .....	69
<b>15.1 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA MULTILAYER THEORY COM OS</b> <b>RESULTADOS DO ANSYS MEF 3D, PARA <math>\theta = 65^\circ</math> E A MEIO DA LARGURA</b> .....	69
<b>15.1.1 – ESTUDO DA LAYUP H</b> .....	69
<b>15.1.2 – ESTUDO DA LAYUP I</b> .....	70
<b>15.1.3 – ESTUDO DA LAYUP J</b> .....	71
<b>15.2 – COMPARAÇÃO DO ESTUDO NUMÉRICO MEF 2D COM O ESTUDO NUMÉRICO</b> <b>EM ANSYS MEF 3D, PARA <math>\theta = 65^\circ</math> E A MEIO DA LARGURA</b> .....	73
<b>15.2.1 – ESTUDO DA LAYUP H</b> .....	73
<b>15.2.2 – ESTUDO DA LAYUP I</b> .....	74
<b>15.2.3 – ESTUDO DA LAYUP J</b> .....	75

<b>16 – ANÁLISE DO ARTIGO DE KO E JACKSON (1989)</b> .....	76
<b>17 – RESULTADOS DO PRESENTE ESTUDO</b> .....	79
<b>17.1 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA MULTILAYER THEORY COM OS</b> <b>RESULTADOS DO ANSYS MEF 3D E A MEIO DA LARGURA</b> .....	79
<b>17.1.1 – ESTUDO DA LAYUP H</b> .....	79
<b>17.1.2 – ESTUDO DA LAYUP I</b> .....	80
<b>17.1.3 – ESTUDO DA LAYUP J</b> .....	81
<b>17.2 – PREVISÃO DOS MODOS E CARGAS DE ROTURA</b> .....	82
<b>17.3 – APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE HASHIN 3D A TODA A ZONA CURVA DO PROVETE</b> ....	82
<b>CAPÍTULO SEIS – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA POSTERIOR INVESTIGAÇÃO</b> .....	73
<b>18 – CONCLUSÕES</b> .....	83
<b>19 – SUGESTÕES PARA POSTERIOR INVESTIGAÇÃO</b> .....	86
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	87
<b>ANEXO A – IMPLEMENTAÇÃO DA MULTILAYER THEORY PARA O PROVETE DE</b> <b>SUN E KELLY (1988): LAYUP H</b> .....	91
<b>ANEXO B – TENSÕES A <math>\theta = 65^\circ</math> E A MEIO DA ESPESSURA, RETIRADAS DO CÁLCULO</b> <b>NUMÉRICO EM ANSYS 3D, PARA O PROVETE DE SUN E KELLY (1988): LAYUP H</b> .	104
<b>ANEXO C – IMPLEMENTAÇÃO DA MULTILAYER THEORY PARA O PROVETE DE</b> <b>SUN E KELLY (1988): LAYUP I</b> .....	108
<b>ANEXO D – TENSÕES A <math>\theta = 65^\circ</math> E A MEIO DA ESPESSURA, RETIRADAS DO</b> <b>CÁLCULO NUMÉRICO EM ANSYS 3D, PARA O PROVETE DE</b> <b>SUN E KELLY (1988): LAYUP I</b> .....	123
<b>ANEXO E – IMPLEMENTAÇÃO DA MULTILAYER THEORY PARA O PROVETE DE</b> <b>SUN E KELLY (1988): LAYUP J</b> .....	126
<b>ANEXO F – TENSÕES A <math>\theta = 65^\circ</math> E A MEIO DA ESPESSURA, RETIRADAS DO</b> <b>CÁLCULO NUMÉRICO EM ANSYS 3D, PARA O PROVETE DE</b> <b>SUN E KELLY (1988): LAYUP J</b> .....	139
<b>ANEXO G – IMPLEMENTAÇÃO DA MULTILAYER THEORY PARA O PROVETE DE</b> <b>KO E JACKSON (1989)</b> .....	142

ANEXO H – TENSÕES A $\theta = 90^\circ$ E A MEIO DA ESPESSURA, RETIRADAS DO CÁLCULO NUMÉRICO EM ANSYS 3D, PARA O PROVETE DE KO E JACKSON (1989).....	154
ANEXO I – IMPLEMENTAÇÃO DA MULTILAYER THEORY PARA O NOVO PROVETE ESTUDADO: LAYUP H.....	156
ANEXO J – TENSÕES A $\theta = 90^\circ$ E A MEIO DA ESPESSURA, RETIRADAS DO CÁLCULO NUMÉRICO EM ANSYS 3D, PARA O NOVO PROVETE ESTUDADO: LAYUP H.....	169
ANEXO K – IMPLEMENTAÇÃO DO CRITÉRIO DE ROTURA DE HASHIN 3D A TODA A ZONA CURVA DO NOVO PROVETE. VALORES MÁXIMOS DE CADA CAMADA: LAYUP H.....	172
ANEXO L – IMPLEMENTAÇÃO DA MULTILAYER THEORY PARA O NOVO PROVETE ESTUDADO: LAYUP I.....	174
ANEXO M – TENSÕES A $\theta = 90^\circ$ E A MEIO DA ESPESSURA, RETIRADAS DO CÁLCULO NUMÉRICO EM ANSYS 3D, PARA O NOVO PROVETE ESTUDADO: LAYUP I.....	189
ANEXO N – IMPLEMENTAÇÃO DO CRITÉRIO DE ROTURA DE HASHIN 3D A TODA A ZONA CURVA DO NOVO PROVETE. VALORES MÁXIMOS DE CADA CAMADA: LAYUP I.....	192
ANEXO O – IMPLEMENTAÇÃO DA MULTILAYER THEORY PARA O NOVO PROVETE ESTUDADO: LAYUP J.....	194
ANEXO P – TENSÕES A $\theta = 90^\circ$ E A MEIO DA ESPESSURA, RETIRADAS DO CÁLCULO NUMÉRICO EM ANSYS 3D, PARA O NOVO PROVETE ESTUDADO: LAYUP J.....	207
ANEXO Q – IMPLEMENTAÇÃO DO CRITÉRIO DE ROTURA DE HASHIN 3D A TODA A ZONA CURVA DO NOVO PROVETE. VALORES MÁXIMOS DE CADA CAMADA: LAYUP J.....	210
ANEXO R – FICHEIRO DE COMANDOS DO MODELO EM ANSYS MEF 3D, PARA O PROVETE DE SUN E KELLY (1988): LAYUP H.....	212
ANEXO S – FICHEIRO DE COMANDOS DO MODELO EM ANSYS MEF 3D, PARA O PROVETE DE SUN E KELLY (1988): LAYUP I.....	217
ANEXO T – FICHEIRO DE COMANDOS DO MODELO EM ANSYS MEF 3D, PARA O PROVETE DE SUN E KELLY (1988): LAYUP J.....	222

ANEXO U – FICHEIRO DE COMANDOS DO MODELO EM ANSYS MEF 3D, PARA O PROVETE DE KO E JACKSON (1989).....	227
ANEXO V – FICHEIRO DE COMANDOS DO MODELO EM ANSYS MEF 3D, PARA O NOVO PROVETE: LAYUP H .....	231
ANEXO W – FICHEIRO DE COMANDOS DO MODELO EM ANSYS MEF 3D, PARA O NOVO PROVETE: LAYUP I.....	238
ANEXO X – FICHEIRO DE COMANDOS DO MODELO EM ANSYS MEF 3D, PARA O NOVO PROVETE: LAYUP J.....	245



## 0. Introdução

A incerteza na previsão da iniciação e propagação do dano em materiais compósitos sugere a necessidade de uma revisão dos actuais critérios de falha, avaliação das suas capacidades e, se necessário, o desenvolvimento de novas teorias. Os mecanismos que levam à falha das estruturas em materiais compósitos ainda não estão completamente compreendidos, especialmente na compressão da fibra ou da matriz. A grande dificuldade no desenvolvimento de rigorosos procedimentos numéricos e computacionais na previsão do dano em materiais compósitos tem origem nas alterações micro-estruturais dos modelos materiais (Pinho et al. 2005).

Numa aplicação estrutural em materiais compósitos, por precaução, tem de haver uma boa compreensão do modo como cada falha ocorre. O ideal é ter um modelo físico para cada modo de falha. Estes modelos físicos deverão definir quando a falha ocorre e, para além disso, descrever o comportamento pós-falha.

Hinton et al. (2004) referem que a percepção inadequada desses mecanismos e a dificuldade no desenvolvimento de modelos para verificar os modos de falha mostram, em geral, fracas previsões por parte da maioria dos participantes no *World-Wide Failure Exercise*. Os resultados do WWFE indicam que as previsões da maior parte das teorias diferem significativamente das observações experimentais, mesmo tratando-se de analisar laminados simples, apesar de estes terem sido estudados extensivamente, nos últimos 40 anos. Este estudo foi feito para um empilhamento unidireccional simples com uma carga aplicada, onde os habituais modelos e critérios de falha ficam aquém de uma descrição e previsão satisfatória das falhas. Na verdade, os mecanismos que levam à falha em materiais compósitos ainda não estão bem compreendidos.

Pinho et al. (2005) define os principais modos de falha em materiais compósitos reforçados por fibras como:

**Delaminagem:** Os materiais compósitos fabricados com diferentes camadas empilhadas entre si tendem a delaminar (separação física entre lâminas). O tipo de delaminagem verificada depende de tipo de tensão (tração ou corte) que se evidencia primeiro. Este tipo de defeito pode estar presente mesmo quando não é visível em superfícies ou em bordos livres. Assim, a delaminagem entre camadas é o resultado da resistência “fora do

plano”, isto é, ao longo da espessura, sendo uma das principais causas da degradação das estruturas em materiais compósitos.

**Falha da matriz à compressão (FMC):** O que é normalmente chamada de falha matricial à compressão é na verdade uma falha na matriz devido ao corte. A falha ocorre na mesma direcção de aplicação da carga, o que mostra que a origem do defeito é realmente a tensão tangencial.

**Falha da fibra à compressão (FFC):** Este modo de falha é largamente afectado pelo comportamento que a resina sofre ao corte e às imperfeições, tais como o desalinhamento inicial das fibras e os vazios. Tipicamente podem ser observadas *kinking bands* (quando a delaminação “salta” de lâmina para lâmina) numa escala menor, que são o resultado de micro-encurvaduras das fibras, falha da matriz devido a tensões de corte ou a própria falha da fibra.

**Falha da matriz à tracção (FMT):** A superfície de fractura deste modo de falha é tipicamente normal à direcção da carga aplicada. Algumas das fibras que falham podem ser observadas numa superfície de fractura.

**Falha da fibra à tracção (FFT):** Este modo de falha é “explosivo” e, libertando uma grande quantidade de energia, a estrutura não consegue redistribuir a carga, provocando uma falha irrecuperável.

**Este trabalho está disposto da seguinte forma:**

No Capítulo Um é feita uma revisão bibliográfica sobre os artigos mais relevantes de elementos curvos em materiais compósitos. Este relevo tem em conta os tipos de provetes curvos, em forma de C e em forma de L, e tem em conta as análises efectuadas – estudo das tensões interlaminares e rotura, quer analítica quer numericamente. Entra-se ainda, de forma mais global, na análise da resistência interlaminar de materiais compósitos com o estudo de *Z-Pins* e teorias *Layerwise*, e por último, na análise de efeitos de bordo. Neste capítulo faz-se ainda referência aos objectivos, importância e resultados do *World-Wide Failure Exercise*.

O Capítulo Dois tem a finalidade de mostrar as geometrias, os materiais e empilhamentos dos vários elementos curvos, que são objecto de estudo neste trabalho.

No Capítulo Três ir-se-á estudar a *Multilayer Theory* ou Teoria Multicamada, desenvolvida por Ko e Jackson (1989) usada para simular o comportamento mecânico de elementos curvos. Por fim, abordam-se os critérios de rotura de Hashin, focando essencialmente o estudo a 3D (Hashin 1980).

No Capítulo Quatro fazem-se os estudos numéricos 3D dos vários elementos curvos, com recurso ao software comercial de elementos finitos ANSYS V11.0:

- Análise do provete de Ko e Jackson (1989);
- Análise dos três provetes de Sun e Kelly (1988);
- Estudo do comportamento mecânico de um novo provete semicircular, aplicando os empilhamentos de Sun e Kelly (1988).

No Capítulo Cinco são feitas as análises dos resultados analíticos e numéricos.

- Ao estudo de Sun e Kelly (1988): Comparação dos resultados das tensões radiais e circunferenciais relativos à *Multilayer Theory* e ao ANSYS 3D, a meio da espessura do provete e a um ângulo  $\theta = 65^\circ$ ;
- Ao estudo de Ko e Jackson (1989): Mesma comparação indicada no ponto anterior e ainda comparação das intensidades e localização das tensões de delaminação obtidas com a Teoria Multicamada e o modelo de ANSYS 3D;
- Ao presente estudo deste trabalho: O mesmo do ponto anteriormente referido e aplicação do critério de rotura de Hashin 3D a toda a zona curva do provete.

No Capítulo Seis retiram-se as principais conclusões deste trabalho e enunciam-se sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo Um – Revisão Bibliográfica

## 1 – Elementos curvos feitos em materiais compósitos

Na dissertação apresentada por Leite (2008), foi levada a cabo uma revisão bibliográfica sobre elementos curvos mais alargada, sendo que aqui se pretende focar apenas os provetes directamente estudados no presente trabalho.

Chang e Springer (1986) estudaram o comportamento mecânico de uma viga curva em forma de L em material compósito. Para fazer esse estudo fixaram uma extremidade e aplicaram uma carga na outra, induzindo um momento flector (figura 1-a). Analiticamente, desenvolveram o cálculo de tensões e extensões para qualquer ponto da viga, cuja solução foi obtida através de um modelo de elementos finitos 2D. Conseguiram ainda inovar na análise de elementos curvos em materiais compósitos quando consideraram as tensões de corte ao longo da espessura (critério de Chang-Springer).

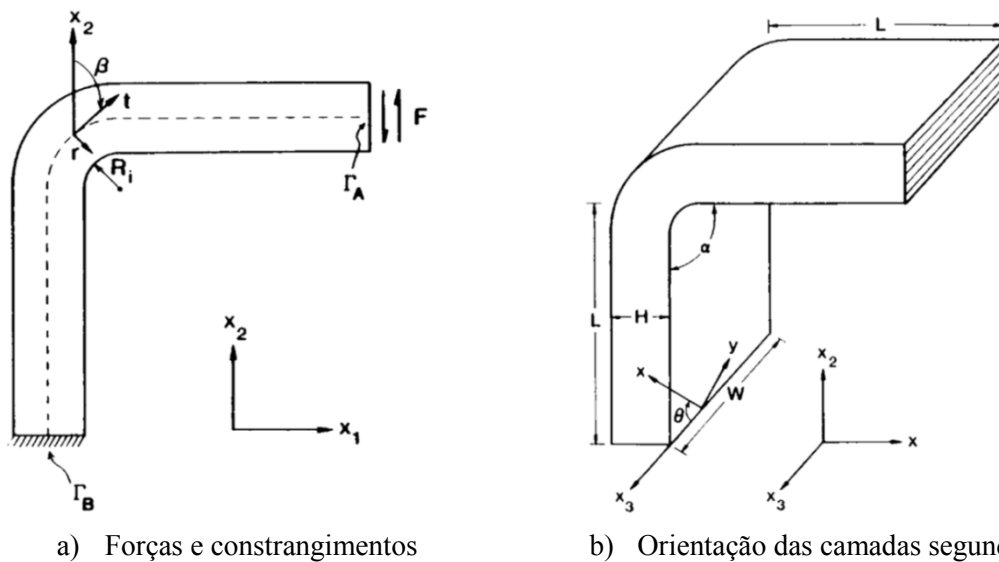


Figura 1 – Viga curva em forma de L estudada por Chang e Springer (1986).

Posteriormente desenvolveram vários estudos paramétricos, aplicando os seus métodos de cálculo a fim de estudar os efeitos da geometria na resistência do elemento curvo. Esses estudos, que no total foram cinco, diferenciavam-se entre si pelos empilhamentos e orientações das camadas (definidas pelo ângulo  $\theta$  – figura 1-b), onde a única

semelhança era a configuração simétrica. Para cada um dos cinco estudos aplicaram diferentes ângulos de dobragem  $\alpha$  (60°, 90° e 120°) e tiveram sempre em conta, consoante o empilhamento escolhido, uma relação  $L/H = 4$ . Quanto ao comportamento mecânico do material, utilizaram o critério de Tsai-Hill para prever a resistência no plano e o critério de Chang-Springer para prever a delaminação (resistência ao longo da espessura).

Concluíram que o modo de falha, por rotura de fibras ou delaminação, dependia da variação do raio interno da zona curva,  $R_i$ . Os resultados foram distintos consoante o momento flector aplicado. Se o momento flector fosse ascendente, isto é, se induzisse tensões de compressão nas fibras exteriores, relativas ao maior raio na zona curva, com a tendência de “planificar” o elemento, a falha dominante seria por delaminação; se o momento flector fosse descendente, isto é, se provocasse tensões de tracção na fibras exteriores relativas ao maior raio da zona curva, com tendência a “dobrar mais” o elemento, a falha podia ser por delaminação, isto para pequenos rácios  $R_i/H$  (0,3 a 0,5), e se a relação fosse maior, a falha seria no plano da fibra. Com isto finalizaram, afirmando que os elementos curvos são mais resistentes a momentos que tendem a “dobrar mais” o elemento, e menos resistentes quando o momento tende a “planificar o elemento”. Assim sendo, este tipo de análise deve ser feito em separado.

Por fim, concluíram também que a sequência de empilhamento tem um papel fundamental na resistência mecânica dos elementos curvos. Por exemplo, uma viga curva com o empilhamento [0/90/0] é muito mais resistente que uma viga curva com o empilhamento [90/0/90].

Sun e Kelly (1988) desenvolveram um trabalho bastante interessante e ao mesmo tempo muito pedagógico. Estudaram a mesma configuração geométrica analisada por Chang e Springer em 1986 (figura 2). Incidiram o seu estudo sobre três sequências de empilhamento distintas e convenientemente dispostas de forma a isolar um dos modos de falha: empilhamentos H e J, falha transversal na matriz devido a tensões de flexão (tensões de circunferenciais); ou empilhamento I, falha por delaminação devido às tensões de tracção verificadas ao longo da espessura na região curva (tensões radiais). Foram fabricados dois tipos de vigas que se diferenciavam pelo material, grafite/matriz epoxídica e fibra de vidro/matriz epoxídica, orientadas a 0° e 90°. Os provetes utilizados foram fabricados pelo processo de empilhamento manual sobre um molde de aço, sendo

o conjunto colocado em saco de vácuo e a cura feita em autoclave. Ensaíram os provetes fabricados numa máquina de ensaios com aplicação manual da carga para facilitar a identificação do modo de falha, podendo assim parar a carga a qualquer instante. Esta identificação era feita por um microscópio posicionado lateralmente à máquina.

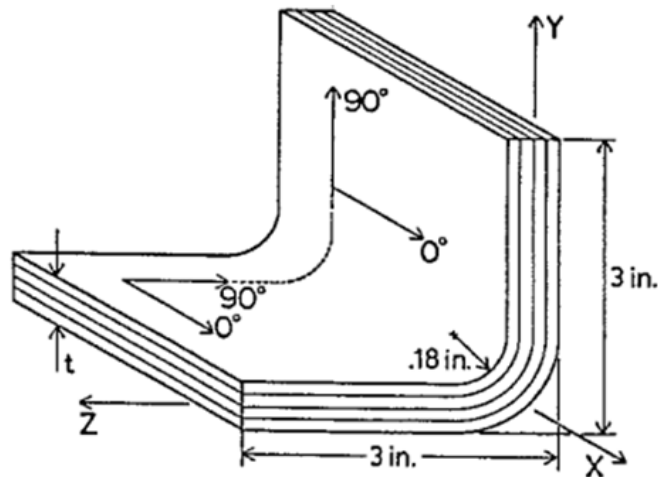


Figura 2 - Viga curva em forma de L estudada por Sun e Kelly (1988).

Experimentalmente observaram que os dois laminados que estavam projectados para falharem por tensões de flexão, falharam como previsto, verificando-se que a falha inicial era matricial e dava-se sempre nas camadas a 0° (ver figura 2). Contudo, a falha grosseira, ou falha última, era sempre por delaminação. O outro laminado dos três construídos falhou, como esperado, logo por delaminação, sendo esta logo a falha última.

Para validar os resultados experimentais, Sun e Kelly (1988) criaram um modelo numérico MEF 2D, com elementos isoparamétricos de quatro nós para cada um dos modelos experimentais. Os autores assumiram extensão plana ao longo da largura, e modelaram cada camada com três elementos ao longo da espessura.

Por fim, foram feitas duas análises de falha que vieram a confirmar a previsão dos modos de rotura. A primeira análise foi feita utilizando o critério Anisotrópico de Hill 3D, comprovando os resultados experimentais, embora tenha sido um pouco menos conservativo. Quanto à segunda análise feita, foi utilizada uma combinação do critério de Tsai-Hill com o critério Chang-Springer. Os resultados não foram tão bons como os de Hill 3D, pois revelaram uma previsão demasiado conservativa aquando comparados

com os resultados experimentais. Segundo os autores, isto deve-se ao facto de o critério de Tsai-Hill ser para um estado plano de tensões e o de Chang-Springer ser um critério de tensão simples na direcção radial (2D), quando na realidade, o estado de tensão é triaxial.

Tanto o elemento curvo de Sun e Kelly (1988) como os seus laminados (sequências de empilhamento – empilhamentos H, I e J) são objecto de estudo deste trabalho e serão estudados mais à frente.

Ko (1988), criou um novo tipo de elemento curvo, semicircular e em forma de C com abas planas nas extremidades (figura 3). As cargas são aplicadas a fim de “abrir” o elemento, isto é, torná-lo plano. Assim, a semicircunferência está submetida a forças e momentos. Observa-se que o esforço aplicado ao provete está decomposto em duas formas: uma força  $P$  aplicada na extremidade do semicírculo e, um momento  $M = P \times e$  no fim do semicírculo.

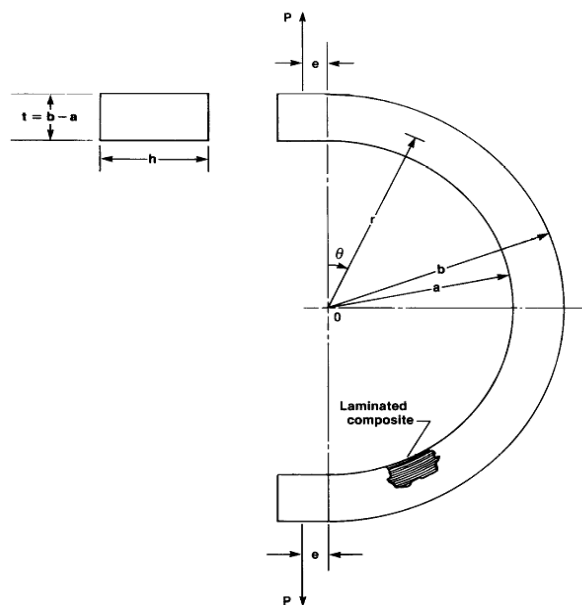


Figura 3 - Viga curva em forma de C estudada por Ko (1988).

Para fazer o estudo numérico do elemento, Ko (1988) utilizou a Teoria da Elasticidade Anisotrópica, desenvolvida por Lekhnitskii et al. em 1968. Uma teoria algo complexa mas de extrema importância para o cálculo do meio contínuo anisotrópico, que tinha por objectivo calcular as tensões de delaminação e suas localizações radiais, para os dois tipos de carga aplicada. Observou que a delaminação total devido a tensões radiais ocorre a meio da viga curva ( $\theta = \pi/2$ ) e aproximadamente a meio da espessura, e que a

delaminação também pode ocorrer devido a tensões de corte, mas desfasada de  $\theta = \pi/2$  e  $\theta = 0$  (figura 4). No final, apresentou curvas de variação das intensidades de tensão e respectivas localizações ao longo da espessura, para diferentes geometrias (de raio interno “a” e raio externo “b”) e diferentes parâmetros anisotrópicos “k” do elemento curvo. As informações fornecidas pelas curvas podem ser utilizadas para seleccionar uma geometria e optimizar a sequência e empilhamento de modo a que a delaminação se possa iniciar apenas no local de picos de tensão.

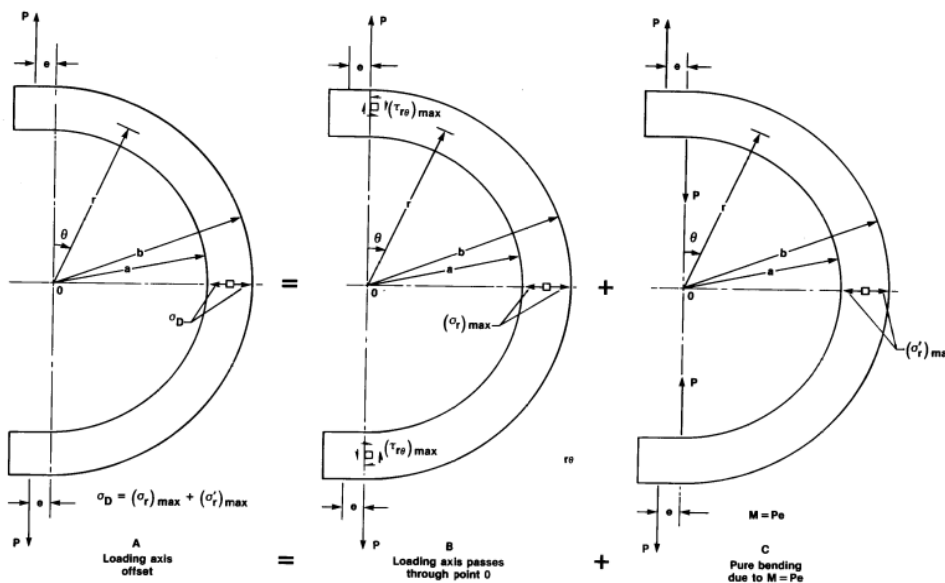


Figura 4 – Elemento curvo em forma de C com a carga aplicada decomposta em forças e momentos, retirada de Ko e Jackson (1989).

Ko e Jackson (1989) incidiram o seu trabalho no provete desenvolvido por Ko (1988) e apresentaram a *Multilayer Theory* (Teoria Multicamada) com a finalidade de calcular as tensões e deformações na viga curva em forma de C e com abas planas nas extremidades. A Teoria da Elasticidade Anisotrópica de Lekhnitskii et al. (1968) foi utilizada novamente. Estes estudos analíticos foram comparados com um estudo em MEF 2D, para uma sequência de empilhamento  $[0^\circ_{25}/\pm 15^\circ_4/0^\circ_{25}]$ .

Os autores concluíram que a diferença entre as localizações radiais da tensão de delaminação (tensão radial máxima) prevista pela *Multilayer Theory* e pela Teoria da Elasticidade Anisotrópica era de, aproximadamente, 1,4 vezes a espessura de camada para o caso das forças; e 1/10 de espessura de camada para o caso de momentos (como se pode constatar na figura 4, a carga aplicada ao elemento é decomposta em forças e

momentos). Na análise MEF 2D feita ao elemento curvo, a localização radial das tensões de delaminação foi muito próxima da prevista pelas duas teorias anteriores, *Multilayer Theory* e Teoria da Elasticidade Anisotrópica.

Tanto a geometria proposta por Ko (1988) para o elemento curvo, como a análise MEF feita por Ko e Jackson (1989) e a *Multilayer Theory* são objecto de estudo deste trabalho e serão estudadas mais à frente.

Martin (1990) estudou o mesmo tipo de provete que Chang e Springer (1986) e Sun e Kelly (1988) – elemento curvo em forma de L, com um extremo encastrado e uma carga aplicada no outro extremo. Os provetes foram fabricados em fibra de carbono de matriz epoxídica. O laminado era unidireccional na direcção circunferencial, isto é, tinha apenas lâminas orientadas a  $0^\circ$ , de modo a evitar o início de delaminação devido às tensões nos bordos livres (efeitos de bordo) ou devidas à fractura da matriz. O laminado foi testado com a aplicação de uma carga quasi-estática, observando-se o início da fractura com maior precisão através de uma tinta branca e brilhante aplicada na zona curva. Partiu-se do pressuposto que a delaminação se iniciou no local de maior tensão radial na zona curva. Assim, em primeiro lugar estudou a localização da falha inicial por delaminação em elementos que não tinham presentes tensões singulares (fendas). Para isso, usou as equações de Lekhnitskii et al. de 1968, e complementou com uma análise numérica MEF 2D.

Posteriormente, Martin (1990), fez uma análise baseada na mecânica da fractura para determinar a propagação da falha após ter ocorrido a primeira fenda por delaminação. Foi mais uma vez utilizado um modelo MEF 2D para a determinação taxa de libertação de energia,  $G$ , em que provocava um crescimento da fenda por delaminação em duas direcções. A taxa de libertação de energia,  $G$ , predominante foi para um modo A de fractura, aumentando inicialmente com o crescimento da delaminação, decrescendo depois quando a fenda atingia as abas do provete. Foi verificado ainda experimentalmente que, enquanto a delaminação inicial crescia à volta da região curva devido a um aumento da carga aplicada, a tensão radial máxima verificada no raio interno da zona curva aumentava para um nível suficiente, de modo a causar uma nova delaminação que, para ser iniciada nesse sítio, não necessitaria de um aumento da carga aplicada.

Martin e Jackson (1993) fizeram um trabalho analítico e experimental necessário para prever a delaminação inicial num compósito curvo laminado, sujeito a cargas estáticas e de fadiga. O provete usado tinha a mesma configuração do usado por Martin (1990) e o material de fabrico foi o AS4/3501-6, grafite em matriz epoxídica mas com camadas orientadas a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Foram feitos modelos numéricos MEF 2D e 3D para determinar a distribuição de tensões na região curva (ainda não danificada), e também para determinar o valor da taxa de libertação de energia provocada pela delaminação, que teve origem na falha da matriz. Foi escolhida uma sequência de empilhamento que originasse a falha matricial nas lâminas dispostas a  $90^\circ$ , originando assim a delaminação numa camada adjacente. Defenderam que, se as tensões que causam a delaminação não são singulares, então os danos iniciais podem ser previstos usando um critério de rotura. No entanto, se as tensões forem singulares, isto é, estão presentes em bordos livres ou em descontinuidades, teria de ser usada uma técnica de previsão de danos iniciais e de crescimentos, baseada na mecânica da fractura. Concluindo assim, que é importante determinar onde os danos se iniciam antes de seleccionar um critério para o prever pois, por exemplo, uma análise MEF 2D não tem em conta as singularidades de um bordo livre e alguns critérios de rotura podem ter análises imprecisas. Contudo, por exemplo, as análises MEF 2D são úteis para o projecto inicial porque o começo do dano depende do empilhamento utilizado. Através desta ideia, observaram que uma falha matricial pode ser evitada se o empilhamento é escolhido de modo a que as tensões tangenciais nas lâminas a  $90^\circ$  não sejam muito elevadas. Também, a delaminação de um bordo livre pode ser minimizada se o empilhamento é escolhido de maneira a que as tensões radiais sejam baixas entre as interfaces  $0^\circ/90^\circ$ . Durante os ensaios, apuraram que a primeira falha verificada no provete era a perda de rigidez da região curva à flexão. Macroscopicamente, verificaram que a falha matricial dava-se realmente nas camadas a  $90^\circ$  mais afastadas da fibra neutra devido a tensões circunferenciais, e posteriormente delaminação.

Usaram a *Multilayer Theory* de Ko e Jackson (1989) para obter uma solução analítica, comparando-a com uma solução numérica MEF 2D e 3D, modelando apenas metade da largura devido à simetria. Posteriormente, para um provete semelhante, mas com uma fenda radial induzida na zona das camadas a  $90^\circ$  mais afastadas da linha neutra, fizeram novos estudos MEF utilizando os modelos antes feitos. Comprovaram através do modelo MEF 3D, o maior valor das tensões radiais no bordo livre, obtendo uma boa

correlação de resultados com os valores analíticos. Para as tensões circunferenciais, os resultados dos modelos numéricos e analíticos também tiveram uma boa correlação de resultados, contudo não foi detectado aumento da tensão de bordo livre no provete como acontecia com tensões radiais. As comparações analíticas e numéricas, relativo às tensões radiais e circunferenciais, estão ilustradas na figura 5.

A comparação de resultados para as tensões de corte não se relacionaram tão bem, não havendo uma boa correlação de resultados para os modelos MEF 3D a meio da largura (figura 6). Os autores defendem que este facto pode dever-se à grande forma que os elementos tomam na zona intermédia do modelo.

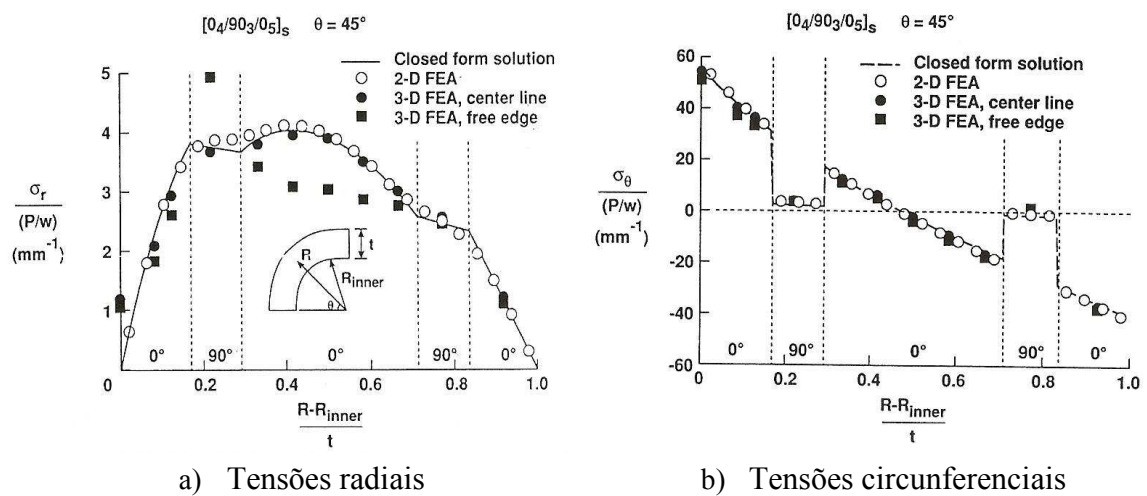


Figura 5 – Tensões ao longo da espessura obtidas por soluções analíticas e numéricas por Martin e Jackson (1993).

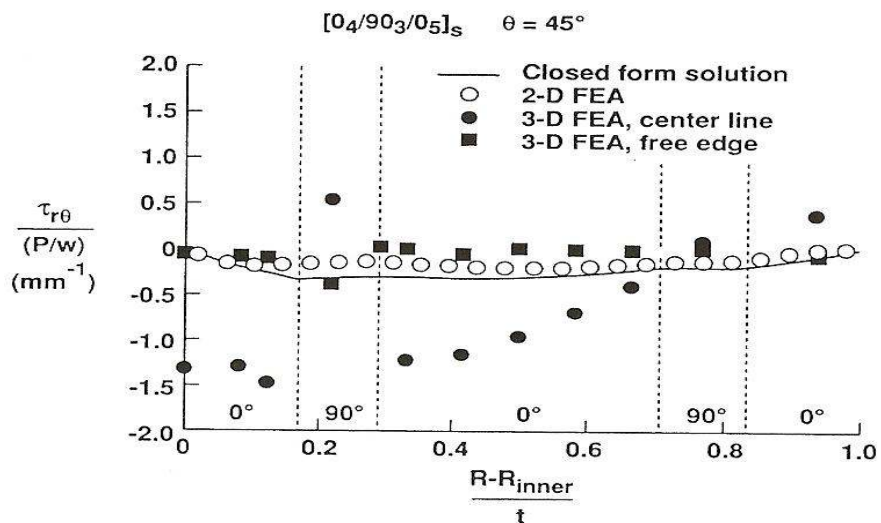


Figura 6 – Tensões de corte ao longo da espessura obtidas por soluções analíticas e numéricas por Martin e Jackson (1993).

A *American Society of Testing Materials*, em 1999, apresentou uma norma de ensaio (ASTM D6415 – 99) cujo método de teste determina a resistência de uma viga curva, em forma L (cantoneira de abas iguais, com um ângulo de 90°), feita em materiais compósitos (figura 7). Quando se é aplicada a carga de ensaio, se o empilhamento for feito com camadas de tecido com fibras contínuas de material compósito, pode obter-se a resistência da viga curva. Contudo, para a mesma carga, se no empilhamento forem apenas utilizadas fibras contínuas, orientadas circunferencialmente, é possível obter a resistência interlaminar de tracção.

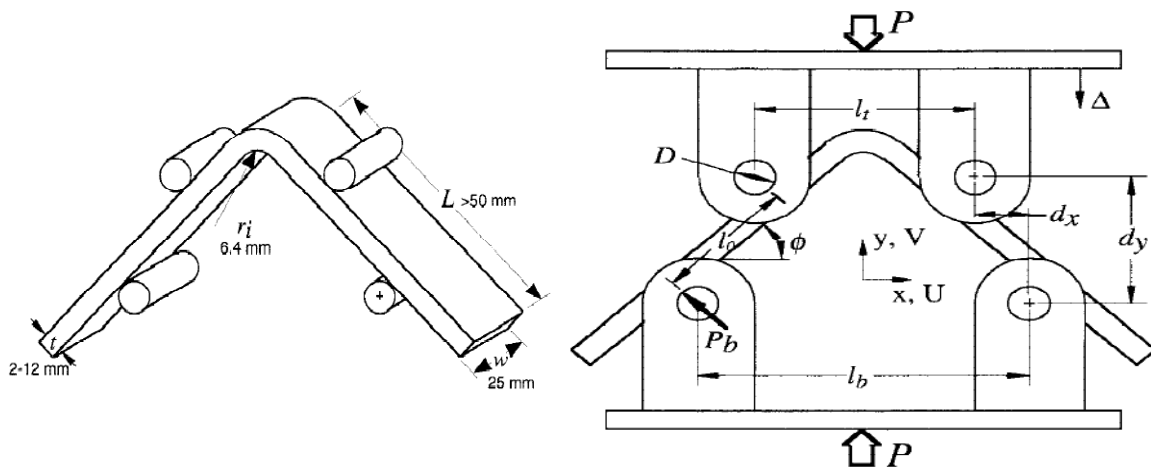


Figura 7 – Dispositivo de ensaio da viga curva em forma de L, segundo ASTM D6415.

Leite (2008) recorreu ao modelo de provete desenvolvido por Ko (1988) e fez alguns arredondamentos geométricos para facilitar a sua construção (figura 8), realizando, além de modelações analíticas e numéricas, também validação experimental. O provete foi fabricado em fibra de vidro do tipo E, unidireccional da marca SEAL (referencia UE400 REM Glass UD Prepreg), pré-impregnada em resina epoxídica. As propriedades mecânicas nominais do pré-impregnado foram obtidas através de testes de tracção a provetes normalizados, com empilhamentos adequados, com instalação de extensómetros, de acordo com as Normas ASTM D3039/ D3039 M, para determinação de  $E_L$ ,  $E_T$  e  $\nu_{LT}$  e ASTM D3518/ D3518 M para a determinação de  $G_{LT}$ . A sequência de empilhamento do provete estudado foi  $[45/0/45/0_2/45/0]_s$ , em que a direcção das lâminas a 0° é coincidente com a direcção circunferencial do elemento curvo, tratando-se de um empilhamento simétrico mas não balanceado.

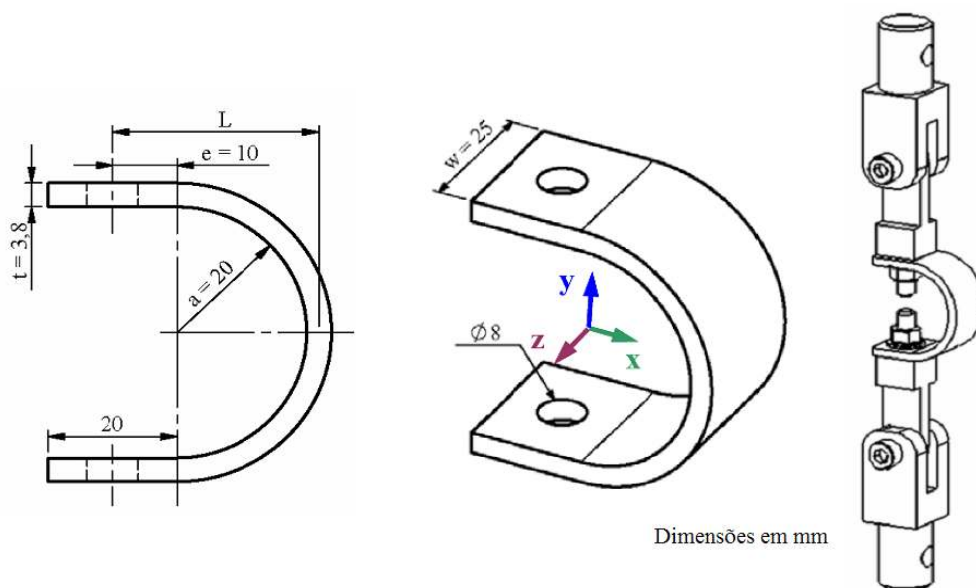


Figura 8 – Geometria do elemento curvo estudado por Leite (2008).

Para simular o comportamento mecânico do provete utilizou inicialmente a *Multilayer Theory* de Ko e Jackson (1989), recorrendo às folhas de cálculo do trabalho elaborado inicialmente por Travassos (1994). Posteriormente, seguiu os passos de Sun e Kelly (1988) fazendo uma previsão de falha com base nos critérios de rotura Hill 3D e na combinação do critério de Tsai-Hill e de Tensão Radial Máxima (Chang-Springer, 1986). Após este cálculo analítico, o autor recorreu ao cálculo numérico, fazendo 3 modelos MEF, um a 2D e dois a 3D, onde num dos modelos 3D usou elementos multicamada e nos restantes, elementos sólidos comuns, com propriedades ortotrópicas. Conseguiu uma previsão semelhante e de acordo com as suas referências bibliográficas, quer para tensões circunferenciais quer para tensões radiais. Verificou uma boa correlação entre os resultados analíticos, numéricos e experimentais, relativamente à previsão de tensões radiais, circunferenciais e extensões circunferenciais para a zona a meio da largura e para  $\theta = 90^\circ$ , para um carregamento de 100N. Não conseguiu obter uma boa correlação com os resultados analíticos relativos a tensões no plano. A carga de falha no plano prevista usando o critério de Hill 3D e o de Tsai-Hill foi deveras baixa, Previu-se falha da matriz na primeira camada, orientada a  $45^\circ$ , o que nunca se verificou nos ensaios. Quando se verificou falha da matriz, foi para as maiores cargas, na ordem de nove ou mais vezes superiores às previstas por esses critérios.

Observou ainda uma enorme dispersão nos resultados relativos às cargas de rotura para os ensaios experimentais, tal como Martin e Jackson (1993). Esta grande variabilidade

deveu-se, em grande parte, à elevada sensibilidade dos elementos curvos compósitos em geral, relativamente às variações dos parâmetros de processamento e fabricação, como sejam pressão de cura local e presença de defeitos como as porosidades.

Por fim observou que a delaminação ocorria sempre entre camadas orientadas a  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , sugerindo que se iniciariam nos bordos livres do elemento curvo, devido ao efeito de concentração de tensões aí verificado, por causa da diferença de orientações das fibras de camadas adjacentes. E, com a delaminação, quase sempre ocorria rotura da camada e/ou vice-versa, ocorrendo, por vezes, várias delaminações num mesmo provete, acompanhadas de falhas matriciais.

Wimmer et al. (2009) elaboraram um estudo que distinguia claramente o início da delaminação e o seu crescimento. A estrutura analisada foi em forma de L, tal como Martin e Jackson (1993), feita a partir de um compósito laminado unidireccional, usando apenas lâminas a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . O material utilizado foi o carbono T300/976, empregando em matriz epoxídica, e o empilhamento tinha apenas orientações a  $90^\circ$ . Para prever o início da delaminação, recorreram ao critério de rotura de Puck, e para estudar a propagação da falha, empregaram um critério de energia, baseado na mecânica da fractura. As duas abordagens, tensão e energia, foram implementadas num *software* MEF, permitindo, no caso do critério de rotura, descobrir se a delaminação é ou não um modo de falha crítica e, no caso do critério de energia, calcular as variações de energia e simular o crescimento da delaminação progressiva numa análise não linear. Construíram uma curva de propagação de delaminação, que se baseava na relação entre o tamanho de delaminação inicial e a carga necessária para a propagar, fornecendo a informação sobre a estabilidade do crescimento da falha. Concluíram que, se a capacidade da estrutura aguentar carga for maior que a carga de delaminação, então o crescimento do dano é estável. Pelo contrário, se a capacidade da estrutura aguentar carga for igual à carga de delaminação, então o crescimento do dano é instável. A figura 9 mostra o resultado de uma análise numérica feita pelos autores, em que à esquerda se mostra as distribuições espaciais previstas pelo factor de carga, e à direita o modo de falha.

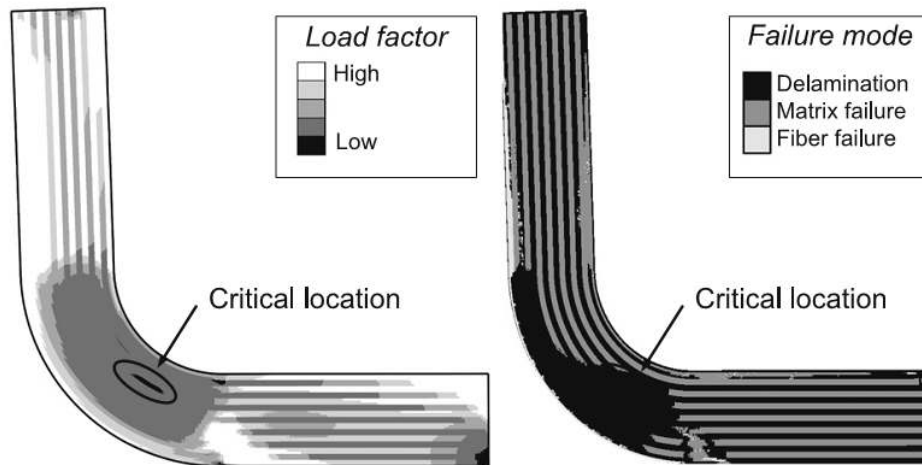
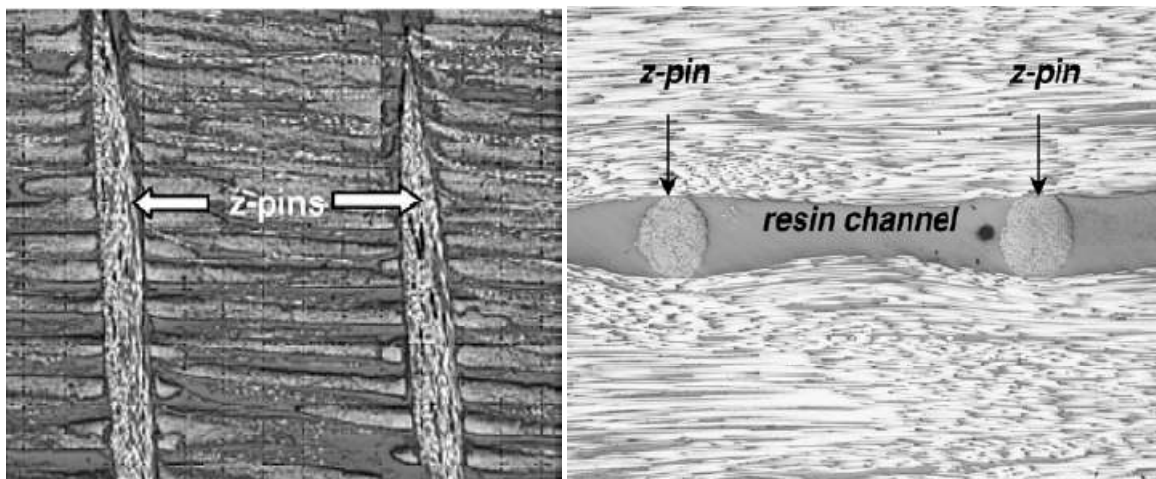


Figura 9 – Estudo MEF feito por Wimmer et al. (2009).

## 2 – Resistência interlaminar com base na técnica de *Z-Pins*

Os *Z-Pins*, também chamados de *Z-Fiber*<sup>TM</sup>, são uma nova técnica que foi desenvolvida para aumentar a resistência de compósitos laminados ao longo da espessura, isto é, na direcção *Z*. Foi já comprovada, quer em laboratório quer em ambiente industrial, a sua capacidade de proporcionar um aumento significativo da resistência à delaminação em materiais compósitos. A figura 10 mostra imagens microscópicas de *Z-Pins* aplicados a materiais compósitos



a) *Z-Pins* dentro do *prepreg*

b) *Z-Pins* ao longo de um canal de resina

Figura 10 – Imagens microscópicas de *Z-Pins* aplicados em materiais compósitos – retirado de Mouritz (2007).

Grassi e Zhang (2003) fizeram um estudo numérico com base em elementos finitos (figura 11), com a finalidade de estudar a fractura interlaminar num laminado carbono/epoxy reforçado com *Z-Pins*. O estudo foi incidido numa viga dupla encastrada numa ponta. O modelo de elementos finitos desenvolvido foi feito com elementos de casca lineares para a zona do laminado, e elementos não-lineares para zona reforçada com *Z-Pins*. O estudo numérico mostrou que os *Z-Pins* são eficazes a evitar a propagação da delaminação quando a falha já se evidenciou. Portanto, esta técnica melhora significativamente a resistência ao crescimento de fendas, impondo atrasos na extensão da delaminação. Posteriormente foi feita uma comparação entre os resultados numéricos e dados experimentais.

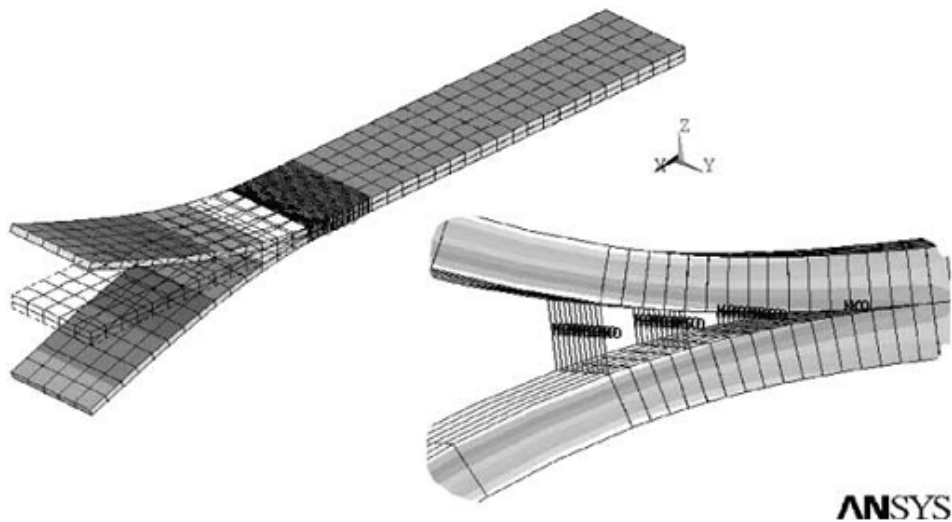
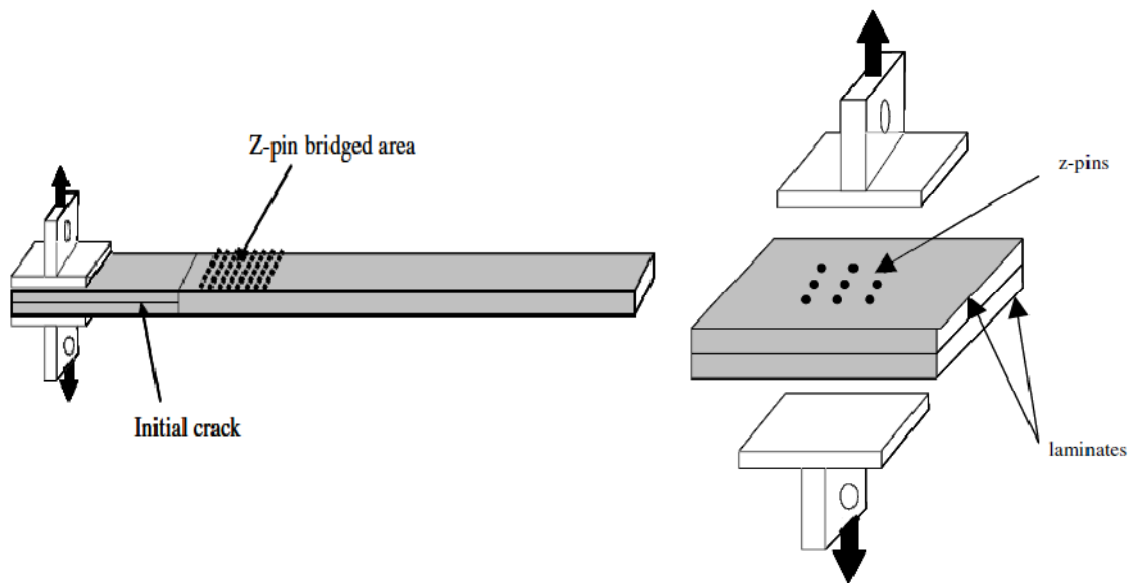


Figura 11 – Estudo MEF feito por Grassi e Zhang (2003) para estudar o comportamento de *Z-Pins* na resistência interlaminar.

Os resultados experimentais mostram que esta técnica não teve nenhum efeito notável sobre o aparecimento (ou iniciação) do crescimento de uma fenda inicial. Reforçando que a técnica de *Z-Pins* é apenas eficaz no aumento da tenacidade à fractura e na resistência ao aumento da delaminação ou à progressão da delaminação. Concluíram ainda que, esta técnica é muito útil para a concepção de uma tolerância ao dano.

Liu et al. (2007), tal como os autores anteriores, apresentam um estudo experimental sobre a delaminação de uma viga compósita encastrada, em que lhe são inseridos *Z-Pins* numa determinada zona (figura 12-a). Foram feitos três tipos de estudos: um para *Z-Pins* grandes e dois para *Z-Pins* menores. Ao testarem várias cargas de fractura, compararam o efeito desta técnica nos casos de iniciação de delaminação e delaminação grosseira. Posteriormente foram feitos testes de arranque dos *Z-Pins* (figura 12-b) para verificar, microscópicamente, o comportamento mecânicos dos *Z-Pins* durante os ensaios.



a) Viga encastrada com zona com *Z-Pins*

b) Teste de arranca de *Z-Pins*

Figura 12 – Ensaio feitos por Liu et al. (2007) para verificar o efeito da delaminação na presença de *Z-Pins*.

Os autores observaram que o reforço com base em *Z-Pins* aumentava significativamente a resistência à fractura interlaminar. E, ainda, com base nas observações experimentais, concluíram que: para uma dada carga, a zona reforçada com *Z-Pins* de maior dimensão, mostra uma maior resistência à delaminação do que a zona de *Z-Pins* de menor dimensão, devido às tensões e momentos verificados. Contudo, para uma carga mais elevada, já é possível verificar a distribuição do dano pelos *Z-Pins*; Os *Z-Pins* mais pequenos não foram possíveis de observar no teste de arrancamento porque todos eles romperam quando se deu a delaminação, isto para uma carga mais elevada.

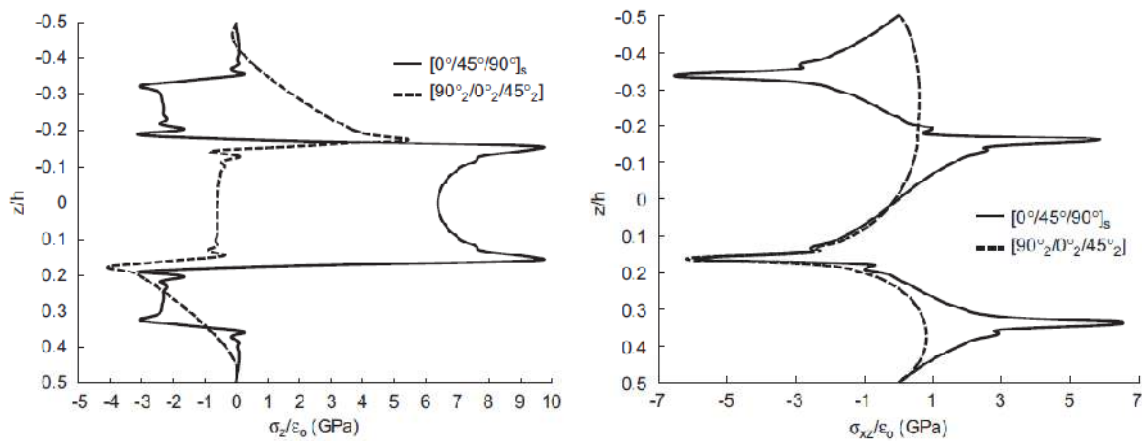
### **3 – Efeitos de bordo livre em compósitos laminados**

Uma das grandes preocupações na concepção e análise de materiais compósitos está relacionada com os bordos livres. Está provado que, devido a incompatibilidades nas propriedades elásticas das camadas adjacentes, podem ocorrer tensões interlaminares nas proximidades dos bordos de uma estrutura, podendo originar a delaminação e a falha matricial. Estes modos de falha ocorrem muitas vezes devido a cargas baixas aquando comparadas com as previstas pela Teoria Clássica dos Laminados. Na verdade, o estado de tensões próximo de bordos livres é inerentemente tridimensional, o que não é previsível por essa teoria.

Devido à complexidade do limite de elasticidade, nenhum método de solução exacto é conhecido no que toca ao estudo dos efeitos de bordo (Nosier e Bahrami, 2007). Assim, durante as últimas décadas, uma variedade de técnicas analíticas e numéricas aproximadas, têm sido desenvolvidas para caracterizar a resistências interlaminar próximas dos bordos livres dos compósitos laminados.

Nosier e Maleki (2008), partindo de uma forma reduzida do campo elástico de deslocamentos, para um longo plano laminado, desenvolveram um método analítico a fim de calcular, com precisão, a resistência interlaminar junto a bordos livres de placas em compósitos laminados. Aplicaram uma teoria de deformação de primeira ordem ao corte, para descrever a deformação global de rotação do laminado. A precisão e a eficácia da teoria de primeira ordem proposta, foi verificada por meio de comparação com os resultados da Teoria *Layerwise* de Reddy num referencial tridimensional. A Teoria *Layerwise* de Reddy (2003) foi então utilizada para o estudo analítico e numérico da camada-limite. Posteriormente, vários exemplos numéricos foram apresentados para as tensões interlaminares normais e de corte, ao longo da espessura dos laminados, nas proximidades dos bordos livres.

Os autores, fizeram um estudo, nos bordos livres, das variações das tensões interlaminares normais e de corte para dois tipos de empilhamentos (figura 13): um simétrico,  $[0/45/90]_S$ ; e um anti-simétrico,  $[90_2/0_2/45_2]$ . Observaram que, ao mudar as sequências de empilhamento do laminado (de simétrico para anti-simétrico), os valores das duas componentes de tensão eram consideravelmente diminuídos em quase toda a espessura do laminado. Assim, prevê-se que, alterando tanto as orientações da fibra e as sequências de empilhamento das camadas individuais, o estado de tensões interlaminar pode ser significativamente alterado e controlado perto dos bordos livres de compósitos laminados.



a) Distribuição da tensão interlaminar normal, ao longo da espessura

b) Distribuição da tensão interlaminar de corte, ao longo da espessura

Figura 13 – Estudo feito por Nosier e Maleki (2008) para comparar a distribuição de tensões interlaminares, em bordos livres, ao longo da espessura.

## **4 – Estudo das tensões interlaminares com base em Teorias *Layerwise* e em teorias de ordem superior**

Contrariamente a Teorias de Camada Única Equivalente (*Equivalent-Single-Layer Laminare Theories* – ESL), algumas Teorias *Layerwise* foram desenvolvidas supondo que os deslocamentos possuem continuidade  $C^0$  ao longo da espessura do laminado (Reddy, 2003). Noutros casos é considerada a continuidade das tensões interlaminares. Assim, os deslocamentos são contínuos ao longo da espessura do laminado mas, as resultantes dos deslocamentos podem ser descontínuas em vários pontos da espessura, permitindo a possibilidade de tensões nas interfaces das lâminas de materiais diferentes. Os deslocamentos obtidos pelas Teorias *Layerwise* fornecem uma representação mais correcta dos campos de deslocamentos desde deformações transversais moderadas até deformações transversais mais severas.

Kim (2003) estudou a caracterização do efeito de delaminação num compósito, usando uma nova aproximação generalizada de *Layerwise*. Desenvolveu um método de análise dinâmica para investigar e caracterizar a delaminação que ocorria num laminado balanceado, não-balanceado e aleatório. Construiu um novo modelo de elementos finitos generalizados *Layerwise* para modelar a presença de delaminação, em que nova teoria prevê exactamente o efeito de corte interlaminar.

Os autores desenvolveram um método de investigação sobre a resposta dinâmica de uma placa em material compósito com empilhamentos arbitrários e múltiplas delaminações. O modelo matemático é baseado numa recém desenvolvida teoria multicamada *Layerwise*, eficiente e precisa. Os foram utilizados procedimentos para caracterizar o efeito de delaminação em laminados espessos e finos, sendo balanceados e não balanceados. Os autores estudaram ainda o efeito e tamanho da delaminação sobre uma resposta dinâmica.

Após isto, Kim et al. (2003), chegaram às seguintes conclusões: As frequências naturais obtidas usando o modelo desenvolvido correlacionam-se bem com ambos os resultados experimentais, e os resultados obtidos correlacionam-se bem com a teoria de ordem superior; Para a mesma geometria, as frequências naturais de flexão são mais baixas no laminado balanceado, e as frequências naturais dos modos de torção são menores no caso do laminado não-balanceado. A presença da delaminação em qualquer parte da

estrutura não alterou essa tendência nas frequências naturais; As tendências de deslocamento da frequência natural, até a placa delaminar, são semelhantes para ambas as construções, placas finas e placas espessas; e a localização da delaminação pode ser detectada através da forma geométrica das placas, mais facilmente quando várias separações das lâminas estão presentes.

Desenvolveram ainda, uma teoria *Layerwise* de ordem superior para prever a resposta ao longo da espessura numa placa e numa viga *sandwich* em material compósito. Assumiram distribuições lineares, parabólicas e cúbicas, no plano dos deslocamentos, de modo a modelarem um laminado utilizando um pequeno número de camadas discretas, em comparação com uma Teoria *Layerwise* linear. Os autores impuseram condições de compatibilidade interlaminar de corte numa matriz de rigidez usando um algoritmo de propagação, permitindo a previsão do corte interlaminar nas interfaces entre camadas adjacentes. Posteriormente, fizeram uma validação da dita teoria com uma solução exacta 3D e Teoria *Layerwise* linear para os vários tipos de laminados.

Plagianakos e Savaranos (2009) concluíram que a teoria de ordem superior multicamada provou ser robusta, uma vez que previu acertadamente as distribuições parabólicas das deformações e tensões, ao longo da espessura, em bordos livres e interfaces laminares. Ainda, mostrou ser uma teoria eficiente, uma vez que utilizou um pequeno número de camadas discretas para modelar o laminado. Os desvios observados reflectiram o efeito do deslocamento transversal constante ao longo da espessura, que foi assumida na formulação. Globalmente, as validações realizadas ilustraram as elevadas capacidades da actual teoria de ordem superior *Layerwise* num laminado, bem como, a sua gama de aplicabilidade.

## **5 – World-Wide Failure Exercise: a sua origem, conceito e conteúdo**

### **5.1 – A origem e racionalidade do WWFE**

O *World-Wide Failure Exercise* (Hinton et al. 2004) – em português, Exercício Global de Falha – teve a sua origem num encontro de especialistas, em St. Albans, Reino Unido, em 1991, tendo como tema “Falha das Estruturas e Compósitos de Matriz Polimérica: mecanismos e critérios para a previsão de desempenho”. Vários especialistas de vários países marcaram presença, transformando-se o encontro numa série de apresentações formais, intercaladas com grupos de discussão informal. Destas, surgiram duas descobertas chave:

- Havia falta de credibilidade nos critérios de falha utilizados até à data;
- Não existia uma definição universal sobre o que constitui a dita falha de um material compósito.

É obvio que para alguns foram duas descobertas inesperadas, visto existir há quase cinco décadas um grande corpo de pesquisa em materiais compósitos, para não falar dos numerosos exemplos onde os materiais compósitos são usados largamente e com sucesso (indústria aeronáutica e indústria naval).

De uma perspectiva global, tem havido pouca pressão no passado recente para investigar ou promover a necessidade para melhores teorias de falha, sendo a razão dada que estas são mais uma curiosidade académica do que uma ferramenta necessária a um bom projecto. Esta visão da questão está a começar a mudar, à luz da necessidade de reduzir o tempo e custos necessários para trazer novos componentes para o mercado, e o desejo de explorar o desempenho dos FRP – *Fibre Reinforced Polymer Composites* – em português, Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados por Fibras. Tem havido uma percepção lenta de que “fazer e testar” é simplesmente demasiado moroso e caro. Melhores métodos de projecto são agora requeridos, os quais dependam de técnicas baseadas em modelos analíticos. Na origem da questão, está a necessidade de estabelecer o nível de confiança que é aplicável às actuais teorias de falha.

Assim, os organizadores do exercício, Hinton, Soden e Kaddour (Hinton et al. 2004), não previram a escala e volume do desafio que estava à sua frente e que iria ocupar uma parte significativa dos seus esforços nos 12 anos que se seguiram.

## **5.2 – Objectivos do WWFE**

Um primeiro passo crítico foi definir os objectivos do estudo. Depois de alguma discussão, os organizadores chegaram a três objectivos gerais:

- Estabelecer o nível actual de maturidade das teorias para a previsão da resposta à falha das lâminas FRP;
- Eliminar o fosso de conhecimento entre os teóricos e os práticos neste campo;
- Estimular a comunidade de compósitos a providenciar engenheiros de projecto com métodos mais eficientes e precisos na previsão das falhas, e com confiança para os usar.

O propósito dos organizadores era, por isso, explorar o WWFE como um catalisador para o debate saudável entre teóricos e práticos (projectistas), com a expectativa de que isto iria conduzir a um progresso neste campo.

## **5.3 – Construção de um teste definitivo de uma teoria de falha: princípios chave**

Numa etapa inicial do processo de planeamento, os organizadores decidiram capturar os requerimentos chave, para os quais iriam ser a base para a constituição de um teste definitivo de uma teoria de falha de compósitos poliméricos e uma comparação rigorosa entre as melhores teorias de falha disponíveis. Como era de esperar, a maioria dos princípios derivam de práticas científicas padrão para testar quaisquer teorias novas. São elas:

- Os organizadores do exercício devem manter a independência dos participantes que realizam as previsões;
- Quando forem necessárias previsões baseadas numa dada teoria, é o próprio autor dessa teoria que efectua os cálculos;

- Uma verdadeira comparação de teorias deverá usar um conjunto de casos de teste comuns, definidos claramente;
- De modo a determinar os limites da validade de uma dada teoria, é importante testá-la sob uma larga margem de condições e escolher problemas de teste que salientem as diferenças e semelhanças entre elas;
- Os casos de teste deverão ser escolhidos pelos organizadores e não pelos participantes, de modo a não favorecer nenhuma teoria em detrimento de outra;
- As previsões teóricas deverão ser todas feitas sem o conhecimento dos seus resultados experimentais e só depois de todas entregues aos organizadores, se poderão conhecer os resultados experimentais. Isto evita o refinamento do critério através da introdução, no mesmo, dos valores obtidos experimentalmente.

#### **5.4 – Processo de selecção das teorias de falha e argumentos para participarem no WWFE**

Uma grande razão para realizar o WWFE era atrair uma enorme quantidade de participantes com reputações mundiais, bem estabelecidas no desenvolvimento de teorias de falha de materiais FRP. Isto foi concretizado através de visitas pessoais feitas pelos organizadores e foi crucial para dar credibilidade ao WWFE aos olhos da comunidade, sendo suplementado com a questão de enviar avisos e convites às pessoas que não puderam ser visitadas pessoalmente. O principal objectivo era atrair notas de entrada na revisão de falhas de materiais FRP. Estes incluíam:

**Teorias de falha interactivas:** Estas são, essencialmente, derivações de teorias desenvolvidas nos anos 50 para descrever o comportamento dos metais (teorias de Hill), actualizados para levar em conta a anisotropia dos materiais e as características de força dependentes do sinal – tracção ou compressão – observadas nos FRP. São largamente usadas em programas computacionais, já que as teorias podem ser reduzidas a simples equações, fáceis de inserir em eficientes algoritmos;

**Critério de falha baseados na física do material:** A característica comum neste tipo de critério é que são definidos modos específicos de falha, sendo cada modo descrito por uma única equação dentro da teoria. Tipicamente, o critério irá delinear entre falha

da fibra e falha da matriz, e alguns critérios providenciam delineações ainda mais profundas, por exemplo entre modos de falha da matriz existem os dúcteis e os frágeis. Assim, para além de previsões de força, tensão de falha, etc., estes critérios também providenciam previsões de modos de falha;

**Mecânica do Dano:** Uma característica fundamental em estruturas compósitas é que, na maioria dos casos, a “falha” não é uma ocorrência única, mas uma sequência gradual de fendas microscópicas e delaminagem, que levam a um colapso estrutural. Em muitas aplicações, as estruturas são operadas numa base regular e em perfeita segurança, embora contendo alguns danos. A comunidade de “mecânica do dano” está a desenvolver ferramentas analíticas para descrever a iniciação e a evolução dos danos, para que todo o processo de falha possa ser representado;

**Abordagens Industrial e através do uso de Códigos Normalizados de Projecto:** várias orientações e padrões, tanto locais como nacionais e internacionais, já existem para o projecto de certas classes de estruturas compósitas. Para além destas existem os procedimentos “interiores à empresa” desenvolvidos pelas companhias de aéreas comerciais, indústria naval (tal como a Norma UK BS 4994), e guias de projecto (tal como as US MIL *Handbook* 17). Tipicamente, estes contêm procedimentos e regras de projecto claros, para desenvolver uma solução estrutural viável.

**Programadores/Vendedores de software comercial:** têm existido programas informáticos de ajuda ao projecto para estruturas de fibras compósitas no mercado há mais de 15 anos e existe uma grande variedade de pacotes disponível. Estes vão de pequenos programas que contêm a Teoria de Placas Laminadas a grandes códigos de elementos finitos (MEF), que têm a capacidade de simular a resposta estrutural de uma aeronave inteira sob condições de carga altamente transientes.

Muitas individualidades académicas, reconhecidas na área, e muitas empresas de programação de software aceitaram o convite, outros declinaram. Dentro deste último grupo estava o Professor Zvi Hashin da Universidade de Tel Aviv, cujo trabalho (Hashin et al. 1973, Hashin 1980) é bem conhecido na comunidade dos compósitos. Hashin escreveu uma carta aos organizadores a declinar o convite, dizendo:

*“O meu único trabalho acerca deste tema relaciona-se com critérios de falha de compósitos de fibra unidireccionais e não laminados. Não acredito que mesmo a*

*informação mais completa acerca da falha em camadas singulares seja suficiente para prever a falha de uma lâmina que constitui essas camadas. Uma lâmina é uma estrutura que passa por um processo complexo de danos (sobretudo de fendas – “cracking”), até que finalmente falha. A análise de tal processo é um requisito para a análise de falha. Enquanto foram feitos avanços significativos nesta direcção, ainda não atingimos o objectivo prático de uma previsão de falha. Devo dizer-vos que, pessoalmente, não sei como prever a falha de uma lâmina, e para além disso, não acredito que alguém saiba.”*

O ponto de vista forte de Hashin serviu para salientar uma posição extrema acerca da validade e laços de aplicabilidade (ou não) das teorias de falha para materiais compósitos e providenciou mais um ímpeto para completar o WWFE.

No presente trabalho estuda-se o critério de Hashin (Hashin et al. 1973, Hashin 1980) pois seria interessante ver a aplicação desta teoria aos elementos curvos, visto não haver até à data nenhum estudo deste tipo realizado.

### 5.5 – Resultados do WWFE

Os critérios de Zinoviev e Puck foram os dois critérios que obtiveram melhores resultados no WWFE, como se pode ver na figura 14. Na dita figura, representa-se as percentagens de cada categoria (graus A, B e C, e “não existe previsão”) alcançados por cada critério. Os graus mencionados representam: A, o erro entre as previsões e as medidas experimentais é menor que 10%; B, o erro entre as previsões e as medidas experimentais está situado entre os 10% e 50%; C, o erro entre as previsões e as medidas experimentais é superior a 50%.

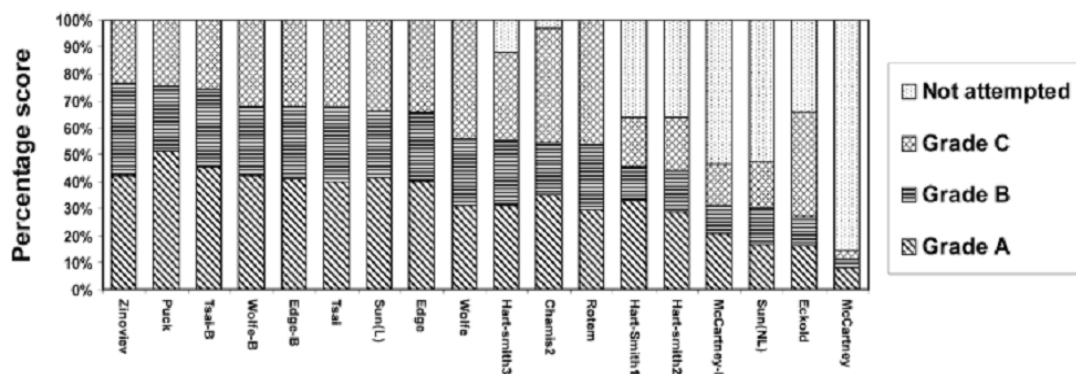


Figura 14 – Representação dos resultados obtidos pelos diversos critérios de falha no WWFE, retirado de Hinton (2004).

Puck e os seus colegas alemães têm trabalhado, durante aproximadamente os últimos 30 anos, para desenvolver uma teoria mecanicista que distinga os vários modos de falha. A teoria emprega dois critérios de fractura independentes (fractura de fibra à compressão, FFC, e à tracção, FFT e, fractura de inter-fibra à compressão, FMC, e à tracção, FMT) e permite uma perda gradual e contínua de rigidez após a iniciação da fenda. Puck reconheceu generosamente a contribuição de Hashin para este tipo de abordagem.

Moura et al. (2005) afirmam que apesar do esforço que tem sido feito no sentido de desenvolver e validar critérios, ainda se está longe de poder apontar qual o mais rigoroso. As dificuldades são muitas, não só ao nível de formulações, mas também ao nível experimental, de entre as quais, estes autores, salientam:

- Modos de rotura indesejados, como é o caso da encurvadura em ensaios de compressão;
- Difícil definição do ponto de rotura devido a deformações plásticas e não-linearidades geométricas consideráveis, em solicitações de compressão transversal e ao corte;
- Dispersões muito consideráveis nos resultados experimentais, que resultam essencialmente da natureza heterogénea dos materiais compósitos;
- Problemas na detecção de fissuras transversais em laminados multidireccionais, uma vez que estes continuam geralmente a poder suportar cargas crescentes;
- Incertezas quanto ao estado de tensão real devido a efeito de tensões residuais de fabrico;
- Dependência das resistências à tracção transversal e ao corte na orientação das camadas vizinhas.

Tendo como base os mesmos resultados experimentais, são estes tipos de problemas que justificam o facto que se tenha concluído acerca do bom desempenho de critérios tão diferentes como o de Zinoviev (1998, 2002), Puck (1998, 2002) e Tsai-Wu (1998, 2002). Naturalmente, o desempenho destes variou conforme a situação, embora não se tenham verificado tendências sistemáticas. É também importante notar que alguns critérios recorrem a vários parâmetros empíricos, facto que pode disfarçar deficiências fundamentais.

# Capítulo Dois – Geometria e Material

## 6 – Introdução

Este capítulo tem a finalidade de mostrar as geometrias, os materiais e empilhamentos dos vários elementos curvos que são objecto de estudo deste trabalho. É importante compreender as orientações das camadas no referencial cartesiano, cilíndrico e material que os autores, Sun e Kelly (1988) e Ko e Jackson (1989), consideraram nos seus trabalhos e, também o que se irá considerar neste novo estudo de elementos curvos em materiais compósitos.

## 7 – Elementos curvos estudados

### 7.1 – Provete de Sun e Kelly (1988)

Sun e Kelly (1988) utilizaram o provete já estudado por Chang e Springer (1986) para analisar o comportamento mecânico de um elemento curvo em forma de L. A geometria do provete estudado é mostrada na figura 15 (é a mesma geometria mostrada na figura 2). As duas abas do provete têm 76,2 mm (3 in) de comprimento, o raio interno da zona curva é de 4,572 mm (0,18 in) e tem uma largura de 25,4 mm (1 in). A espessura do provete depende do empilhamento utilizado, isto é, do número de camadas e do material que terá diferentes espessuras.

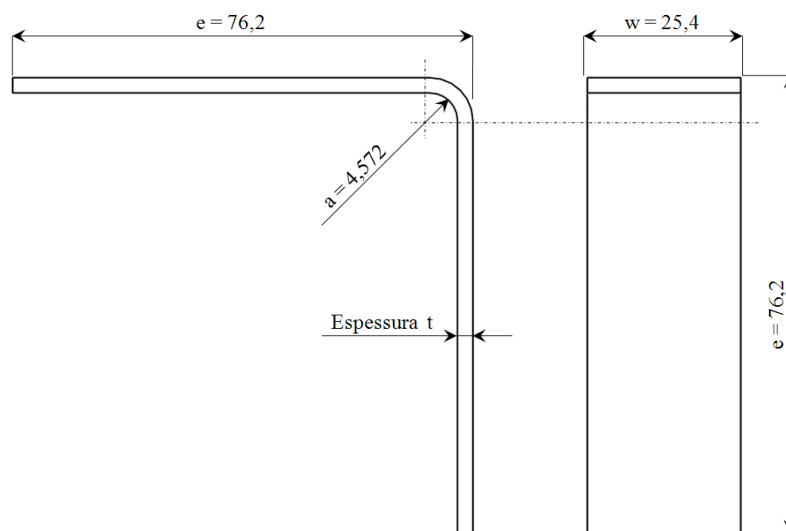


Figura 15 – Geometria do provete estudado por Sun e Kelly (1988) – dimensões em mm.

Os autores propuseram três tipos de empilhamentos, apenas com camadas a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , convenientemente dispostas de modo a que a falha principal de cada viga ficasse isolada: falha no plano das lâminas devido a tensões de flexão ou falha por delaminação devido a tensões radiais. Na figura 16 observa-se a orientação dos empilhamentos definidos no estudo,  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , ao longo do sistema de coordenadas cartesianas e cilíndricas.

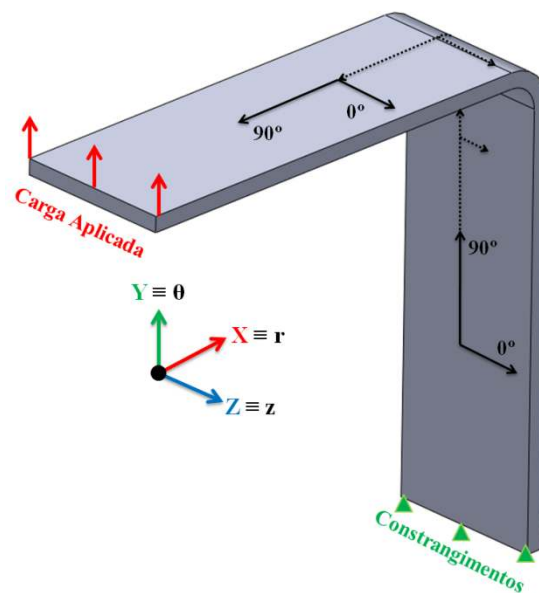


Figura 16 – Orientações de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  definidas por Sun e Kelly (1988) no referencial cartesiano e cilíndrico.

Os módulos de elasticidade equivalentes nos três sistemas de coordenadas, cartesianas, cilíndricas e materiais, mostram-se na tabela 1. É importante fazer esta equivalência porque utilizar-se-ão os três sistemas em ocasiões diferentes. Por exemplo: o sistema de coordenadas cartesianas  $XYZ$  é o utilizado no cálculo numérico pelo software comercial ANSYS; o sistema de coordenadas cilíndricas  $r\theta z$  é o utilizado na *Multilayer Theory*; e o sistema de coordenadas materiais  $LTZ$  é o sistema em que são dadas as propriedades mecânicas dos materiais. De notar que os sistemas de coordenadas adoptados por Sun e Kelly (1988) são distintos do sistema de coordenadas adoptado por Ko e Jackson (1989) – como se verá no próximo ponto – contudo é o mesmo sistema que se utilizará no principal estudo deste trabalho. Esta temática vai sendo abordada ao longo da descrição de cada estudo.

Tabela 1 – Módulos de elasticidade equivalentes em três sistemas de coordenadas no estudo de Sun e Kelly (1989).

Sistema de coordenadas cartesianas	Sistema de coordenadas cilíndricas	Sistema de coordenadas materiais
<b>Orientação das camadas a 90°</b>		
$E_X$	$E_r$	$E_Z$
$E_Y$	$E_\theta$	$E_L$
$E_Z$	$E_z$	$E_T$
<b>Orientação das camadas a 0°</b>		
$E_X$	$E_r$	$E_Z$
$E_Y$	$E_\theta$	$E_T$
$E_Z$	$E_z$	$E_L$

Tabela 2 – Materiais e suas propriedades mecânicas utilizados por Sun e Kelly (1989) no seu estudo.

Material	$E_L$ [Gpa]	$E_T$ [Gpa]	$G_{LT}$ [Gpa]	$\nu_{LT}$	$\delta$ [mm]
Hercules AS4/35001-6 graphite/epoxy prepreg	137,9	10	5,24	0,3	0,127
Ferro S-2/CE9000-9 fiberglass/epoxy prepreg	55,78	15,72	7,31	0,29	0,1905

Na tabela anterior (tabela 2), é possível ver os materiais e as respectivas propriedades mecânicas utilizados no estudo de Sun e Kelly (1988). É importante referir que os autores fizeram algumas aproximações quanto às propriedades mecânicas: os coeficientes de Poisson são iguais nos três planos axiais ( $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{13}$ ) e o mesmo acontece com os módulos de corte ( $G_{12} = G_{23} = G_{13}$ ); ainda de referir que consideraram o módulo de elasticidade normal (interlaminar) igual ao módulo de elasticidade transversal ( $E_Z = E_T$ ) considerando a isotropia transversa no plano  $T-Z$ .

Na tabela 3 nomeiam-se os três empilhamentos com a respectiva sequência e material. Estes empilhamentos são os que se utilizarão mais à frente no principal estudo do presente trabalho.

Tabela 3 – Empilhamentos utilizados por Sun e Kelly (1989).

Nome do Empilhamento	Sequência de Empilhamento	Número de Camadas	Material	Espessura do Laminado
H	[90/0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90] <sub>s</sub>	20	Graphite	2,54 mm
I	[90 <sub>3</sub> /0/90 <sub>3</sub> /0/90/0] <sub>s</sub>	20	Graphite	2,54mm
J	[90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90] <sub>s</sub>	24	Glass	4,572 mm

## 7.2 – Provete de Ko e Jackson (1989)

O estudo feito por Ko e Jackson (1989) teve como base o provete desenvolvido por Ko (1988) – provete semicircular. A geometria do provete semicircular estudado é mostrada na figura 17 (é a mesma geometria mostrada na figura 3). Este provete é ideal para estudar a delaminação no comportamento à fadiga, neste caso, flexão cíclica. Como para a aplicação das cargas são necessárias áreas finitas (pontos de aplicação), foram acrescentadas regiões planas à zona curva, para aplicação de cargas. Assim, o provete semicircular consiste numa região curva semicircular com abas planas nos extremos. O eixo de aplicação da carga está distanciado  $e$  do diâmetro vertical da semicircunferência (visto na figura 3). Pode-se então dizer que o esforço aplicado ao provete está decomposto em duas formas: uma força  $P$  aplicada na extremidade do semicírculo e, um momento  $M = P \times e$  no fim do semicírculo (figura 21 – estudada mais à frente). O braço  $L$  do momento flector é dado por  $e+a+t/2$ .

As duas abas do provete têm 9,525 mm de comprimento, o raio interno da zona curva é de 21,59 mm e tem uma largura de 25,4 mm (1 in). A espessura do provete é de 8,1324mm, sendo inalterada visto só haver um tipo de empilhamento em todo o estudo.

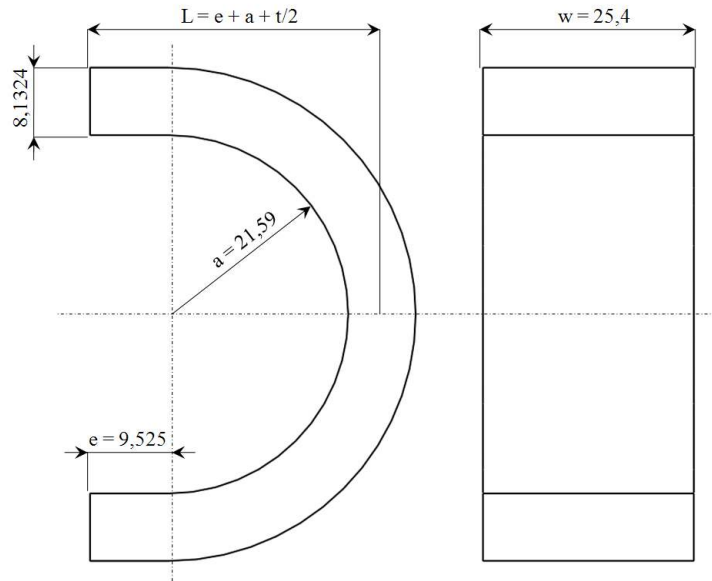


Figura 17 - Geometria do provete semicircular estudado por Ko e Jackson (1989) – dimensões em mm.

Os autores não definem a origem do material, apenas indicam as suas propriedades (tabela 4).

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do material usado no estudo de Ko e Jackson (1989).

$E_L$ [GPa]	$E_T$ [GPa]	$G_{LT}$ [GPa]	$\nu_{LT}$	$\nu_{TL}$	$\delta$ [mm]
172,369	8,274	4,137	0,33	0,01584	0,1506

Na figura 18 é possível entender as orientações das camadas ao longo do referencial cartesiano. De notar o que foi dito anteriormente relativamente às orientações definidas por Ko e Jackson (1989), onde estas são diferentes das definidas por Sun e Kelly (1988). A tabela 5 ajuda a realizar essa distinção, e mostra a equivalência entre os diferentes referenciais de modo a se poder fazer os vários tipos de estudos, tal como foi explicado anteriormente.

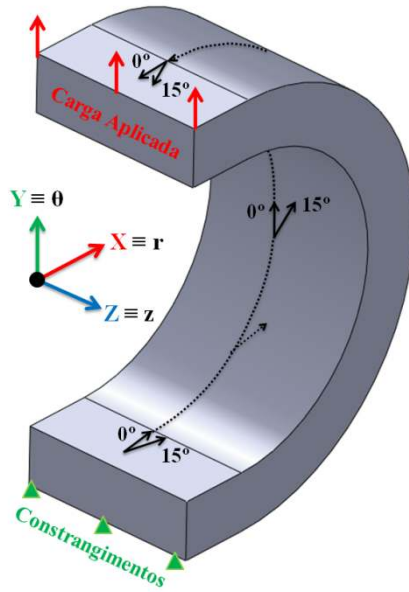


Figura 18 - Orientações das camadas definidas por Ko e Jackson (1989) no referencial cartesiano e cilíndrico.

Na tabela 5 mostra-se a equivalência dos módulos de elasticidade nos três sistemas de coordenadas – cartesiano, cilíndrico e material. De notar que apenas se mostra a orientação a 0°, visto que a  $\pm 15^\circ$  a equivalência não ser tão directa.

Tabela 5 – Módulos de Elasticidade equivalentes em três sistemas de coordenadas no estudo de Ko e Jackson (1989).

Sistema de coordenadas cartesianas	Sistema de coordenadas cilíndrico	Sistema de coordenadas material
<b>Orientação das camadas a 0°</b>		
$E_X$	$E_r$	$E_Z$
$E_Y$	$E_\theta$	$E_L$
$E_Z$	$E_z$	$E_T$

O provete semicircular tem uma sequência de empilhamento  $[0_{25}/+15/-15]_S$  com 54 camadas. Empregando a teoria Multicamada, os autores agruparam as camadas com orientações semelhantes numa única camada (claro, mais espessa), resultando um empilhamento de três camadas:  $[0_{25}/\pm 15_4/0_{25}]$ . Estas propriedades ao longo das ditas orientações são mostradas na tabela seguinte.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do material utilizado por Ko e Jackson (1989), em coordenadas cilíndricas.

Propriedades em coordenadas materiais	Camadas orientadas a 0°	Camadas orientadas a ±15°
$E_r$ [GPa]	172,369	48,873
$E_\theta$ [GPa]	8,274	8,274
$G_{r\theta}$ [GPa]	4,137	4,137
$\nu_{r\theta}$	0,01584	0,0559
$\nu_{\theta r}$	0,33	0,33

### 7.3 – Estudo do novo provete

Este provete é o principal modelo de estudo deste trabalho, uma combinação da geometria aplicada no estudo de Ko e Jackson (1989) com os empilhamentos de Sun e Kelly (1988). A geometria deste provete foi proposta por Leite (2008). De notar que a geometria não é exactamente a mesma do provete de Ko e Jackson (1989). Foi escolhida a geometria alterada por Leite (2008) pois possui valores das cotas em Sistema de Unidades Internacional. Acresce a esta razão, ainda o facto de já existirem os moldes para fabricação destes provetes, os quais serão vantajosos aquando duma futura validação experimental. As duas abas do provete têm 10 mm de comprimento, o raio interno da zona curva é de 20 mm e tem uma largura de 25,4 mm (1 in). A espessura do provete depende do empilhamento utilizado – figura 19.

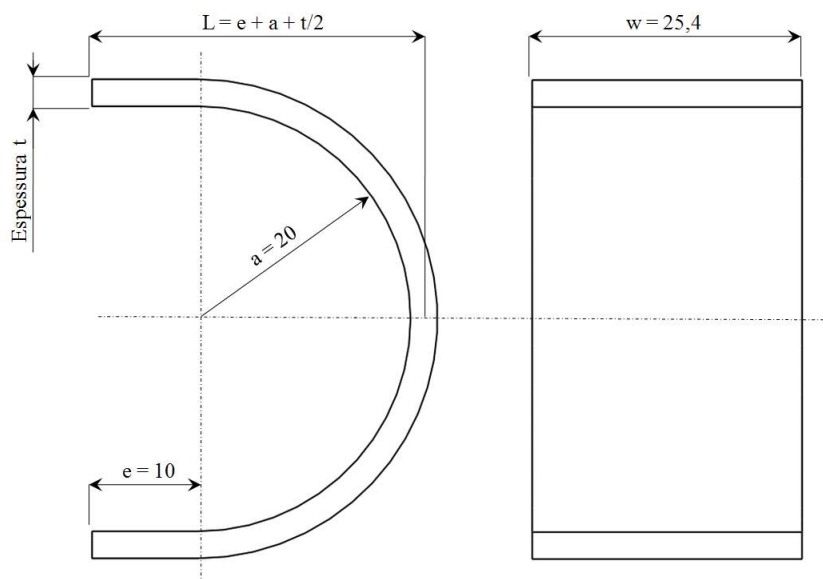


Figura 19 - Geometria do novo provete em estudo – dimensões em mm.

A figura 20 mostra a orientação das camadas ao longo do provete no sistema de coordenadas cartesianas e cilíndricas. Como foi dito anteriormente, esta orientação é a mesma adoptada por Sun e Kelly (ver figura 16). Assim sendo, a tabela 1 é aqui também considerada como válida.

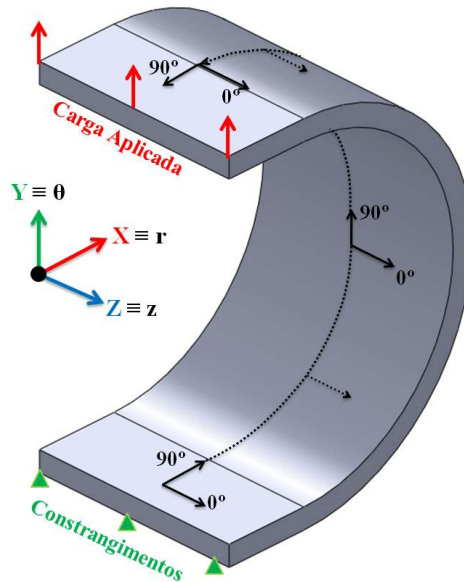


Figura 20 - Orientações das camadas definidas no referencial cartesiano e cilíndrico.

A tabela 7 mostra os mesmos empilhamentos de Sun e Kelly (1988) (ver tabela 3). Contudo o material aqui empregue será um só – Hercules AS4/3501-6 epoxy prepreg – (tabela 8). De notar que este é o mesmo material utilizado por Sun e Kelly (1989) – carbono AS4 – mas as propriedades mecânicas são distintas. Este foi um dos materiais utilizados no WWFE (Soden et al. 1998).

Tabela 7 – Empilhamentos utilizados no novo estudo.

Nome do Empilhamento	Sequência de Empilhamento	Número de Camadas
H	$[90/0_3/90_2/0_3/90]_s$	20
I	$[90_3/0/90_3/0/90/0]_s$	20
J	$[90_3/0_3/90_2/0_3/90]_s$	24

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do material Hercules AS4/3501-6 epoxy prepreg, retirado de Soden et al. (1998)

$E_L$ [GPa]	$E_T$ [GPa]	$G_{LT}$ [GPa]	$\nu_{LT} = \nu_{LZ}$	$\nu_{TL}$	$\nu_{TZ}$	$\delta$ [mm]
126	11	6,6	0,28	0,024	0,40	0,127
$X_T$ [MPa]	$X_C$ [MPa]	$Y_T$ [MPa]	$Y_C$ [MPa]	$S_{12}$ [MPa]		
1950	1480	48	200	79		

A figura 21 mostra duas orientações de duas camadas distintas,  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , no elemento curvo a meio da zona curva, para o plano  $y = 0$ . Esta figura mostra a relação que existe entre os vários sistemas de coordenadas considerados e ainda as orientações de corte nos planos. Perceber estas orientações é fundamental para se conseguir aplicar convenientemente o critério de rotura estudado mais à frente.

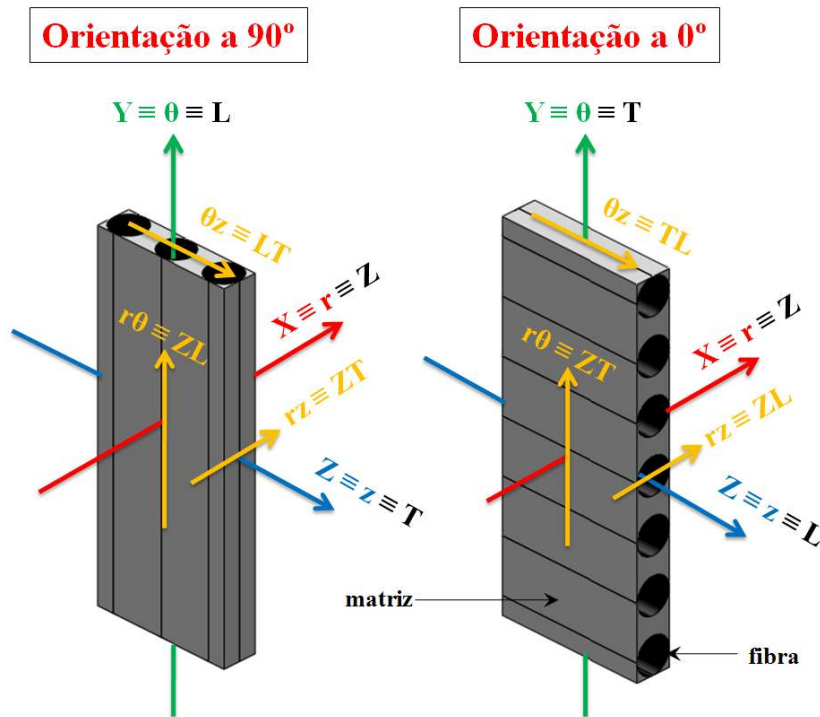


Figura 21 - Lâminas (muito aumentadas) de material compósito orientadas a  $0^\circ$  e  $90^\circ$  e as orientações, incluindo corte, nos três tipos de referência.



# Capítulo Três – Modelos Analíticos

## 8 – Introdução

Neste capítulo ir-se-á estudar a *Multilayer Theory* ou Teoria Multicamada, desenvolvida por Ko e Jackson (1989), usada para simular o comportamento mecânico de elementos curvos. A validação da programação feita através dos resultados do trabalho dos mesmos autores é o passo prévio à aplicação desta teoria ao estudo do provete deste trabalho.

Por último, entra-se no estudo dos critérios de rotura de Hashin (1973, 1980). Inicialmente aborda-se como foi criado o critério, na sua vertente 2D e, aborda-se a vertente 3D do mesmo, que tem mais interesse neste trabalho, dado terem sido criados modelos numéricos 3D.

## 9 – Teoria Multicamada

A Teoria Multicamada ou *Multilayer Theory*, foi desenvolvida por Ko e Jackson (1989) e é uma solução analítica usada para simular o comportamento mecânico de elementos curvos. De notar que esta teoria foi desenvolvida para a parte semicircular dos elementos curvos em forma de C com abas planas nas suas extremidades – elemento desenvolvido por Ko (1988). Aplicou-se também esta teoria ao provete em forma de L de Sun e Kelly (1988), que tem uma parte não semicircular mas em quarto de círculo – já investigado por Martin e Jackson (1993).

A solicitação mecânica a que vai ser sujeito o elemento curvo pode ser substituída por uma sobreposição de dois casos: aplicação de uma força concentrada (figura 22-b); e aplicação de momento de flexão puro (figura 22-c), em que  $M = P \times e$ .

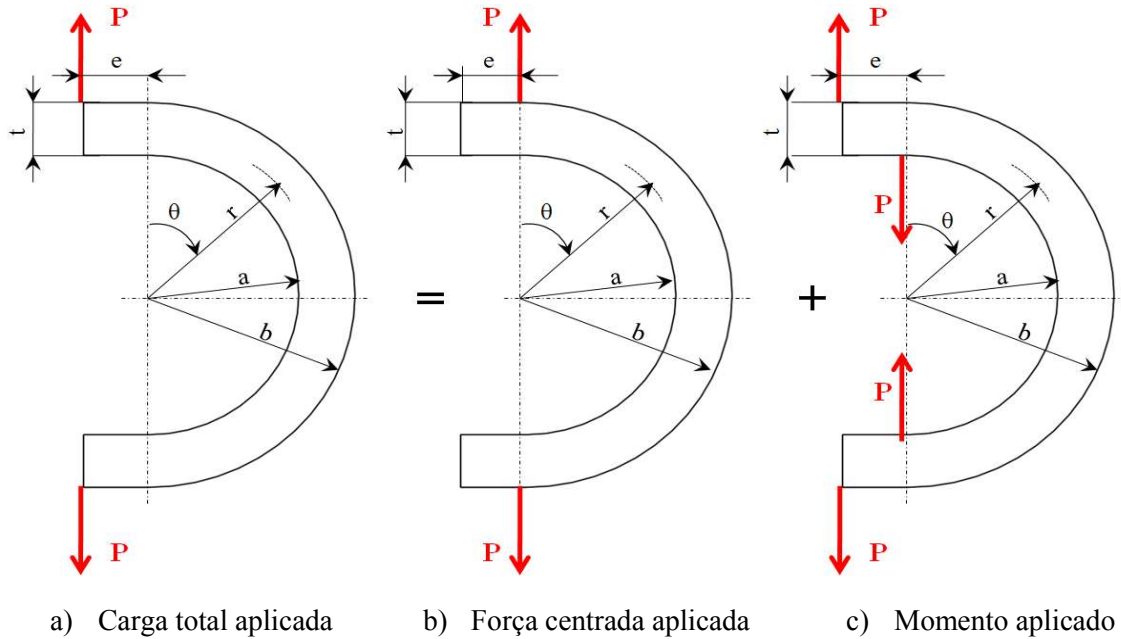


Figura 22 – Elemento curvo em forma de C com a carga aplicada decomposta em forças e momentos.

A *Multilayer Theory* é baseada na Teoria Clássica da Elasticidade Anisotrópica formulada por Lekhnitskii et al. (1968), no seu trabalho *Anisotropic Plates*. É uma teoria discreta e, em oposição à Teoria Anisotrópica dos Meios Contínuos, que envolve uma única camada, pode ser aplicada a  $N$  camadas, com propriedades mecânicas distintas, de uma viga ou elemento curvo feito em materiais compósitos. Contudo, os resultados da *Multilayer Theory* são obtidos através da teoria de Lekhnitskii et al. (1968). O objectivo deste estudo não é transcrever o artigo desenvolvido por Ko e Jackson (1989) assim, para não se tornar muito extenso, indicar-se-ão as equações resultantes e utilizadas no presente trabalho.

Começemos por definir os parâmetros anisotrópicos  $\beta$  e  $\kappa$  que são importantes pois, serão aplicados em praticamente todas as equações resultantes que se seguem, e ainda mostrar uma relação entre propriedades muito útil para o cálculo em materiais compósitos (equação 3).

$$\beta \equiv \sqrt{1 + \frac{E_{\theta}}{E_r}(1 - 2\nu_{r\theta}) + \frac{E_{\theta}}{G_{r\theta}}} \quad 1)$$

$$\kappa \equiv \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \quad 2)$$

$$\frac{E_r}{\nu_{r\theta}} = \frac{E_\theta}{\nu_{\theta r}} \quad 3)$$

Por fim, a Teoria Anisotrópica dos Meios Contínuos define as equações das tensões para os dois tipos de carga aplicadas, forças e momentos. Onde  $\{A, B, D\}$  e  $\{B', C', D'\}$  são constantes calculadas através das equações de condições de fronteira.

Para o caso de carga com a força  $P$ :

$$\sigma_r(r, \theta) = \left[ A\beta r^{\beta-1} - B\beta r^{-\beta-1} + \frac{D}{r} \right] \cdot \sin \theta \quad 4)$$

$$\sigma_\theta(r, \theta) = \left[ A\beta(1+\beta)r^{\beta-1} - B\beta(1-\beta)r^{-\beta-1} + \frac{D}{r} \right] \cdot \sin \theta \quad 5)$$

$$\tau_{r\theta}(r, \theta) = - \left[ A\beta r^{\beta-1} - B\beta r^{-\beta-1} + \frac{D}{r} \right] \cdot \cos \theta \quad 6)$$

Para o caso de carga com o momento  $M$ :

$$\sigma_r(r) = 2B' + C'(1+\kappa)r^{\kappa-1} + D'(1-\kappa)r^{-\kappa-1} \quad 7)$$

$$\sigma_\theta(r) = 2B' + C'\kappa(1+\kappa)r^{\kappa-1} + D'\kappa(1-\kappa)r^{-\kappa-1} \quad 8)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad 9)$$

De notar que estas tensões são umas “falsas tensões”, visto terem unidades  $N/m$  (estado bidimensional) – a *Multilayer Theory* não entra em conta com a largura. Como não é considerada, tem-se de se dividir as ditas tensões pela largura  $w$  e, assim obter unidades  $N/m^2$ . Só considerando esta relação, é possível comparar os resultados com os do ANSYS, que apresenta as tensões em  $N/m^2$ .

Na *Multilayer Theory* as abas planas do elemento são desprezadas e apenas é considerada a região circular, sujeita aos casos de forças e momentos aplicados. Na tabela seguinte mostra-se o número de camadas consideradas em cada estudo.

Tabela 9 – Número de multicamadas consideradas em cada estudo.

Estudos	Empilhamentos	Número de multicamadas
<b>Sun e Kelly (1988)</b> e novo Estudo	<i>Layup</i> H - [90/0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90] <sub>S</sub>	$N = 9$
	<i>Layup</i> I - [90 <sub>3</sub> /0/90 <sub>3</sub> /0/90/0] <sub>S</sub>	$N = 11$
	<i>Layup</i> J - [90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90] <sub>S</sub>	$N = 9$
<b>Ko e Jackson (1989)</b>	[0 <sub>25</sub> /+15/-15] <sub>S</sub>	$N = 3$

Por exemplo, no estudo de Ko e Jackson (1989) temos 3 multicamadas porque o empilhamento é aproximado por [0<sub>25</sub>/±15<sub>4</sub>/0<sub>25</sub>], isto é, duas a camadas 0° com 25 lâminas cada, e uma camada central a ±15° com 4 lâminas.

Seguidamente numeram-se as equações referentes às condições de fronteira da teoria na sua forma final. Para cada caso de carga, forças e momentos, cada conjunto de equações de fronteira irá ter  $3N - 1$  equações, que permitiram determinar as  $3N$  incógnitas  $A_i, B_i, D_i, (i = 1, 2, \dots, N)$  para as forças, e  $3N$  incógnitas  $B'_i, C'_i, D'_i, (i = 1, 2, \dots, N)$  para os momentos.

Para o caso de carga com a força  $P$ :

$$A_1 \beta_1 a^{\beta_1} - B_1 \beta_1 a^{-\beta_1} + D_1 = 0 \quad 10)$$

$$A_i \beta_i a_i^{\beta_i} - B_i \beta_i a_i^{-\beta_i} + D_i - A_{i+1} \beta_{i+1} a_i^{\beta_{i+1}} + B_{i+1} \beta_{i+1} a_i^{-\beta_{i+1}} - D_{i+1} = 0 \quad 11)$$

$$A_N \beta_N a_N^{\beta_N} - B_N \beta_N a_N^{-\beta_N} + D_N = 0 \quad 12)$$

$$\begin{aligned}
 & A_i a_i^{\beta_i} \left\{ \frac{1}{E_r^{(i)}} - (1 + \beta_i) \frac{\nu_{\theta r}^{(i)}}{E_{\theta}^{(i)}} \right\} + B_i a_i^{-\beta_i} \left\{ \frac{1}{E_r^{(i)}} - (1 - \beta_i) \frac{\nu_{\theta r}^{(i)}}{E_{\theta}^{(i)}} \right\} \\
 & \quad + D_i (\ln a_i) \left\{ \frac{1}{E_r^{(i)}} - \frac{\nu_{\theta r}^{(i)}}{E_{\theta}^{(i)}} \right\} \\
 & - A_{i+1} a_i^{\beta_{i+1}} \left\{ \frac{1}{E_r^{(i+1)}} - (1 + \beta_{i+1}) \frac{\nu_{\theta r}^{(i+1)}}{E_{\theta}^{(i+1)}} \right\} - B_{i+1} a_i^{-\beta_{i+1}} \left\{ \frac{1}{E_r^{(i+1)}} - (1 - \beta_{i+1}) \frac{\nu_{\theta r}^{(i+1)}}{E_{\theta}^{(i+1)}} \right\} \\
 & \quad - D_{i+1} (\ln a_i) \left\{ \frac{1}{E_r^{(i+1)}} - \frac{\nu_{\theta r}^{(i+1)}}{E_{\theta}^{(i+1)}} \right\} = 0
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 & A_i a_i^{\beta_i} \frac{\beta_i}{E_{\theta}^{(i)}} \left\{ (1 + \beta_i) - \nu_{\theta r}^{(i)} \right\} - B_i a_i^{-\beta_i} \frac{\beta_i}{E_{\theta}^{(i)}} \left\{ (1 - \beta_i) - \nu_{\theta r}^{(i)} \right\} \\
 & \quad + D_i \frac{1}{E_{\theta}^{(i)}} (1 - \nu_{\theta r}^{(i)}) \\
 & - A_{i+1} a_i^{\beta_{i+1}} \frac{\beta_{i+1}}{E_{\theta}^{(i+1)}} \left\{ (1 + \beta_{i+1}) - \nu_{\theta r}^{(i+1)} \right\} + B_{i+1} a_i^{-\beta_{i+1}} \frac{\beta_{i+1}}{E_{\theta}^{(i+1)}} \left\{ (1 - \beta_{i+1}) - \nu_{\theta r}^{(i+1)} \right\} \\
 & \quad + D_{i+1} \frac{1}{E_{\theta}^{(i+1)}} (1 - \nu_{\theta r}^{(i+1)}) = 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\sum_{i=1}^N \left[ A_i (a_i^{\beta_i} - a_{i-1}^{\beta_i}) + B_i (a_i^{-\beta_i} - a_{i-1}^{-\beta_i}) + D_i (\ln a_i - \ln a_{i-1}) \right] = P \tag{15}$$

Para o caso de carga com o momento  $M$ :

$$2B'_1 + C'_1 (1 + \kappa_1) a^{\kappa_1 - 1} + D'_1 (1 - \kappa_1) a^{-\kappa_1 - 1} = 0 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 & 2B'_i + C'_i (1 + \kappa_i) a_i^{\kappa_i - 1} + D'_i (1 - \kappa_i) a_i^{-\kappa_i - 1} \\
 & - 2B'_{i+1} - C'_{i+1} (1 + \kappa_{i+1}) a_i^{\kappa_{i+1} - 1} - D'_{i+1} (1 - \kappa_{i+1}) a_i^{-\kappa_{i+1} - 1} = 0
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$2B'_N + C'_N (1 + \kappa_N) b^{\kappa_N - 1} + D'_N (1 - \kappa_N) b^{-\kappa_N - 1} = 0 \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 & B'_i \left\{ 2a_i \left( \frac{1}{E_r^{(i)}} - \frac{v_{\theta r}^{(i)}}{E_\theta^{(i)}} \right) \right\} + C'_i \left\{ (1 + \kappa_i) a_i^{\kappa_i} \left( \frac{1}{\kappa_i} \frac{1}{E_r^{(i)}} - \frac{v_{\theta r}^{(i)}}{E_\theta^{(i)}} \right) \right\} \\
 & \quad - D'_i \left\{ (1 - \kappa_i) a_i^{-\kappa_i} \left( \frac{1}{\kappa_i} \frac{1}{E_r^{(i)}} + \frac{v_{\theta r}^{(i)}}{E_\theta^{(i)}} \right) \right\} \\
 & - B'_{i+1} \left\{ 2a_i \left( \frac{1}{E_r^{(i+1)}} - \frac{v_{\theta r}^{(i+1)}}{E_\theta^{(i+1)}} \right) \right\} - C'_{i+1} \left\{ (1 + \kappa_{i+1}) a_i^{\kappa_{i+1}} \left( \frac{1}{\kappa_{i+1}} \frac{1}{E_r^{(i+1)}} - \frac{v_{\theta r}^{(i+1)}}{E_\theta^{(i+1)}} \right) \right\} \\
 & \quad + D'_{i+1} \left\{ (1 - \kappa_{i+1}) a_i^{-\kappa_{i+1}} \left( \frac{1}{\kappa_{i+1}} \frac{1}{E_r^{(i+1)}} + \frac{v_{\theta r}^{(i+1)}}{E_\theta^{(i+1)}} \right) \right\} = 0
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$B'_i \left\{ 2a_i \left( \frac{1}{E_\theta^{(i)}} - \frac{1}{E_r^{(i)}} \right) \right\} - B'_{i+1} \left\{ 2a_i \left( \frac{1}{E_\theta^{(i+1)}} - \frac{1}{E_r^{(i+1)}} \right) \right\} = 0 \tag{20}$$

$$\sum_{i=1}^N \left[ B'_i (a_i^2 - a_{i-1}^2) + C'_i \kappa_i (a_i^{\kappa_i+1} - a_{i-1}^{\kappa_i+1}) - D'_i \kappa_i (a_i^{-\kappa_i+1} - a_{i-1}^{-\kappa_i+1}) \right] = -M \tag{21}$$

Para determinar as incógnitas  $\{A, B, D\}$  e  $\{B', C', D'\}$ , foi criado uma folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*, baseada em trabalhos anteriores (Travassos 1994, Leite 2008), onde cada sistema foi formulado em forma matricial  $A \times x = b$ , onde  $A$  é a matriz dos coeficientes das incógnitas, sendo uma matriz quadrada de dimensão  $(3N \times 3N)$ ,  $x$  é o vector coluna das incógnitas  $\{A, B, D\}$  e  $\{B', C', D'\}$ , e  $b$  é o vector coluna dos valores do segundo membro de cada equação, só zeros, com excepção da última linha que é o valor de  $P$  ou de  $M$  conforme o tipo de carga. Através da capacidade de inversão de matrizes do *Microsoft Office Excel* foi possível determinar as incógnitas  $\{A, B, D\}$  e  $\{B', C', D'\}$  através da relação  $x = A^{-1} \times b$ . As folhas de cálculos e cada estudo efectuado encontram-se em vários Anexos dispostos no fim deste trabalho. Depois de resolvidos estes sistemas, e encontradas as constantes de fronteira  $\{A, B, D\}$  e  $\{B', C', D'\}$ , usaram-se as equações 4 e 5, 7 e 8, da Teoria Anisotrópica dos Meios Contínuos para determinar as tensões radiais e circunferenciais, para os casos de carga com força e carga com momento (secções 5.1, 5.2 e 5.3).

Ko e Jackson (1989) apresentam ainda equações que permitem determinar as tensões de delaminação e a sua localização.

Cálculo dos raios onde ocorrem as tensões máximas para o caso de carga com a força  $P$ :

$$r_m = \left[ \frac{D_i - \sqrt{D_i^2 - 4A_i B_i \beta_i^2 (\beta_i^2 - 1)}}{2A_i B_i \beta_i (\beta_i - 1)} \right]^{\frac{1}{\beta_i}} \quad 22)$$

E para o caso de carga com o momento  $M$ :

$$r'_m = \left[ -\frac{D'_i}{C'_i} \right]^{\frac{1}{2\kappa_i}} \quad 23)$$

Cálculo das tensões máximas nas localizações anteriormente definidas (equações 22 e 23) para o caso de carga com a força  $P$ :

$$(\sigma_r)_{\max} \equiv \sigma_r \left( r_m, \frac{\pi}{2} \right) = \left[ A_i \beta_i r_m^{\beta_i - 1} - B_i \beta_i r_m^{-\beta_i - 1} + \frac{D_i}{r_m} \right] \quad 24)$$

E para o caso de carga com o momento  $M$ :

$$(\sigma'_r)_{\max} \equiv \sigma_r (r'_m) = 2B'_i + C'_i (1 + \kappa_i) (r'_m)^{\kappa_i - 1} + D'_i (1 - \kappa_i) (r'_m)^{-\kappa_i - 1} \quad 25)$$

Assim, pode-se definir a tensão de delaminação no provete semicircular, como:

$$\sigma_D = \overbrace{\sigma_r \left( r_D, \frac{\pi}{2} \right)}^{\text{tensões devido a forças}} + \overbrace{\sigma_r (r_D)}^{\text{tensões devido a momentos}} \quad 26)$$

E retirar o raio onde essa tensão ocorre, raio  $r$  de delaminação:

$$A_i \beta_i (\beta_i - 1) r_D^{\beta_i} + B_i \beta_i (\beta_i + 1) r_D^{-\beta_i} - D_i + (\kappa_i^2 - 1) (C'_i r_D^{\kappa_i} + D'_i r_D^{-\kappa_i}) = 0 \quad 27)$$

9.1 – Multilayer Theory aplicada ao provete de Ko e Jackson (1989)

Nas figuras 23 e 24 apresentam-se os resultados das tensões radiais e circunferenciais, respectivamente para os casos de forças e momentos nos extremos.

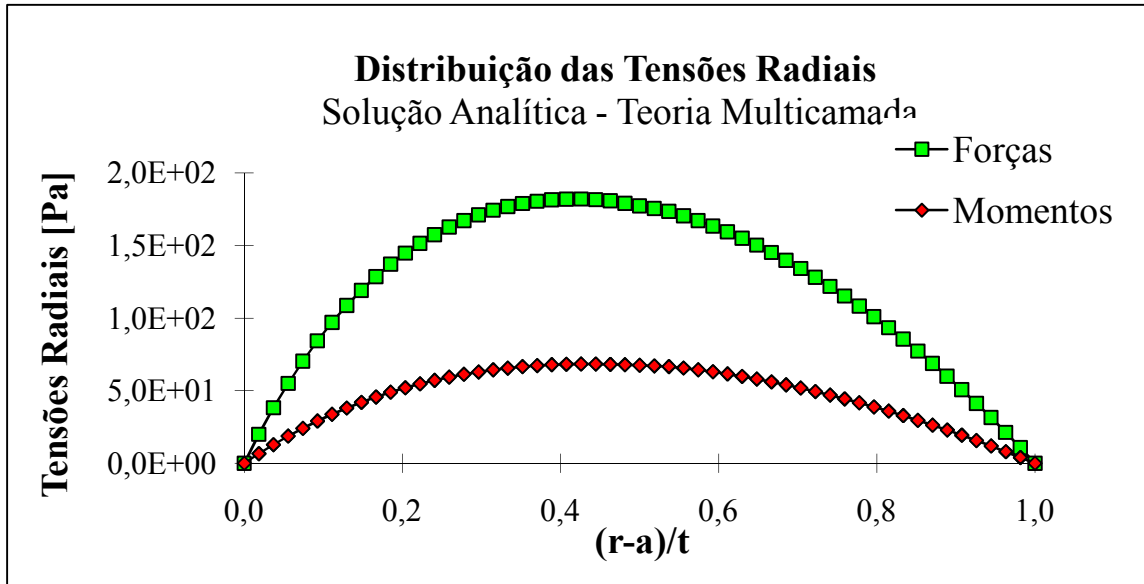


Figura 23 – Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no estudo de Ko e Jackson (1989): Distribuição da tensão radial.

Verifica-se que as tensões radiais têm um máximo perto da metade da espessura e, as tensões circunferenciais têm uma fibra neutra próximo do meio da espessura.

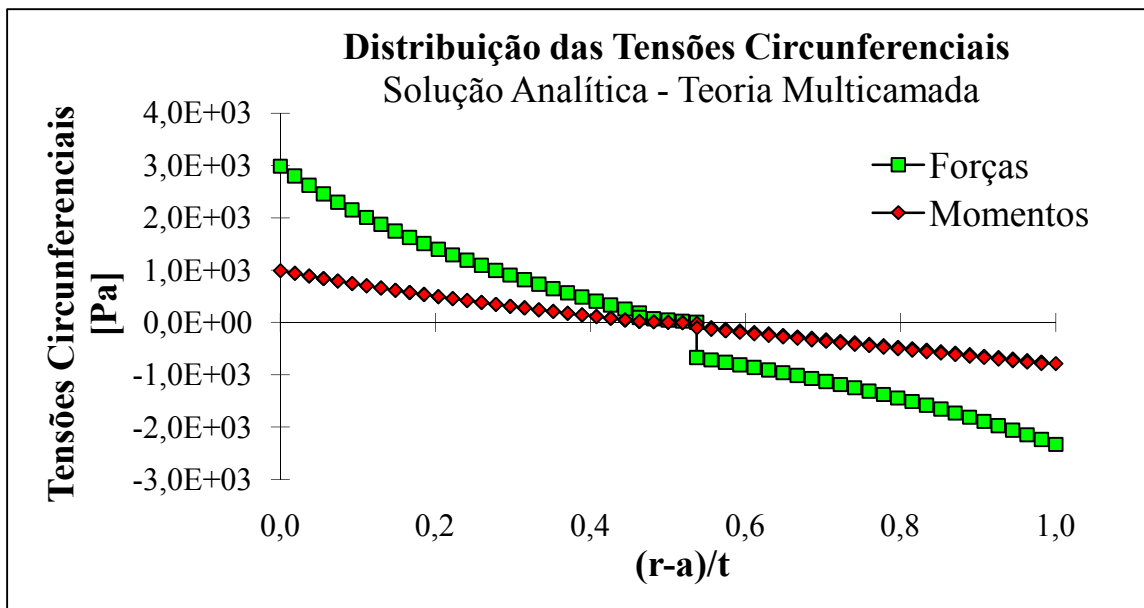


Figura 24 – Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no estudo de Ko e Jackson (1989): Distribuição da tensão circunferencial.

## 9.2 – Multilayer Theory aplicada ao provete de Sun e Kelly (1988)

De seguida apresentam-se os resultados das tensões radiais e circunferenciais, respectivamente para os casos de forças e momentos nos extremos, para os três tipos de empilhamentos estudados, H, I e J, para o provete de Sun e Kelly (1988).

### 9.2.1 – Estudo da *Layup* H

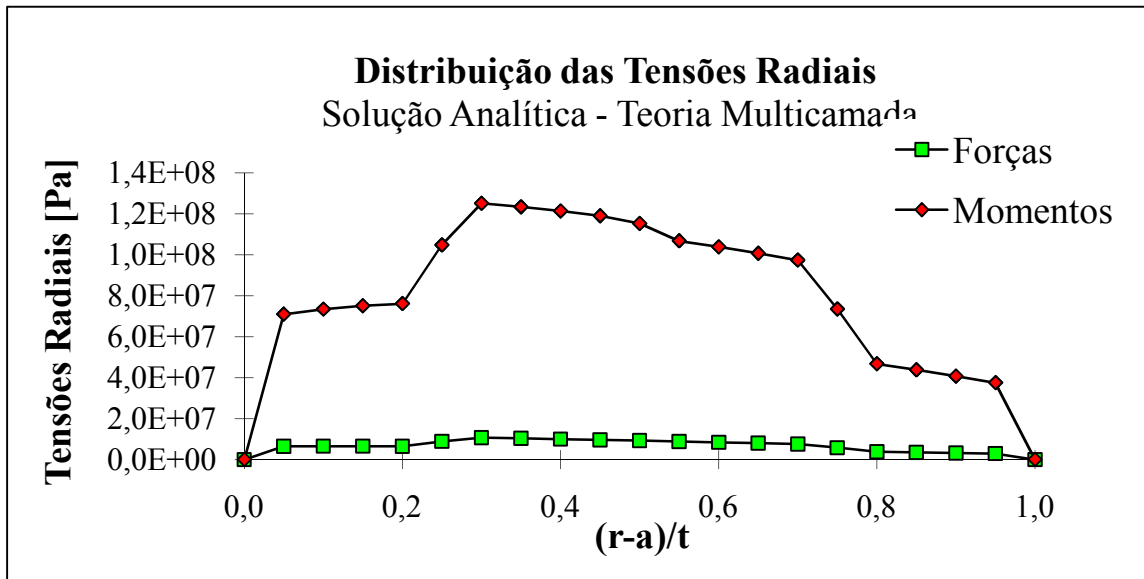


Figura 25 – Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no estudo *Layup* H de Sun e Kelly (1988): Distribuição da tensão radial.

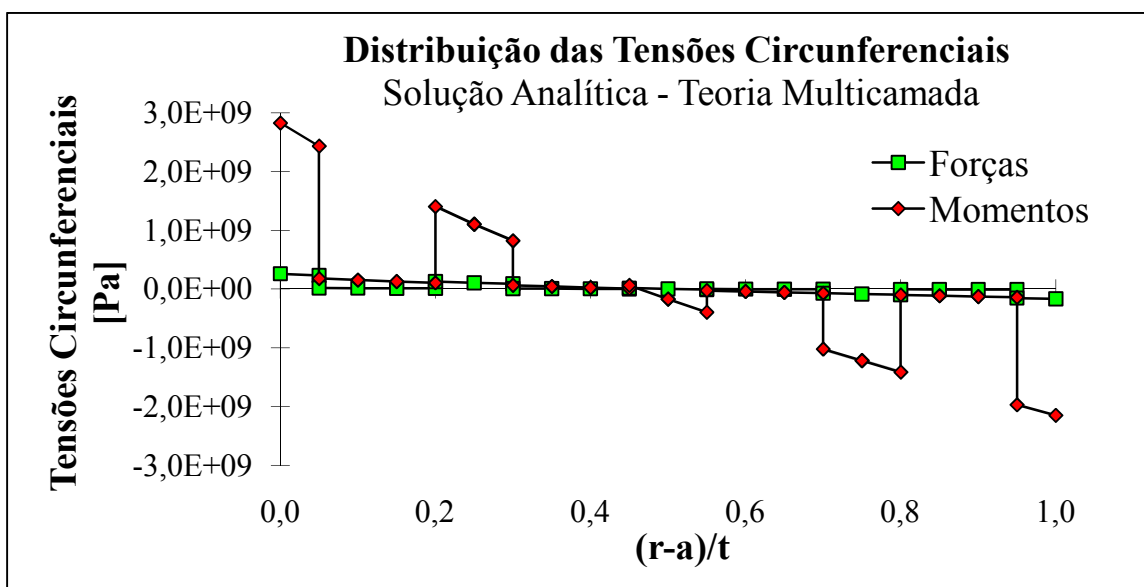


Figura 26 - Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no estudo *Layup* H de Sun e Kelly (1988): Distribuição da tensão circunferencial.

9.2.2 – Estudo da *Layup* I

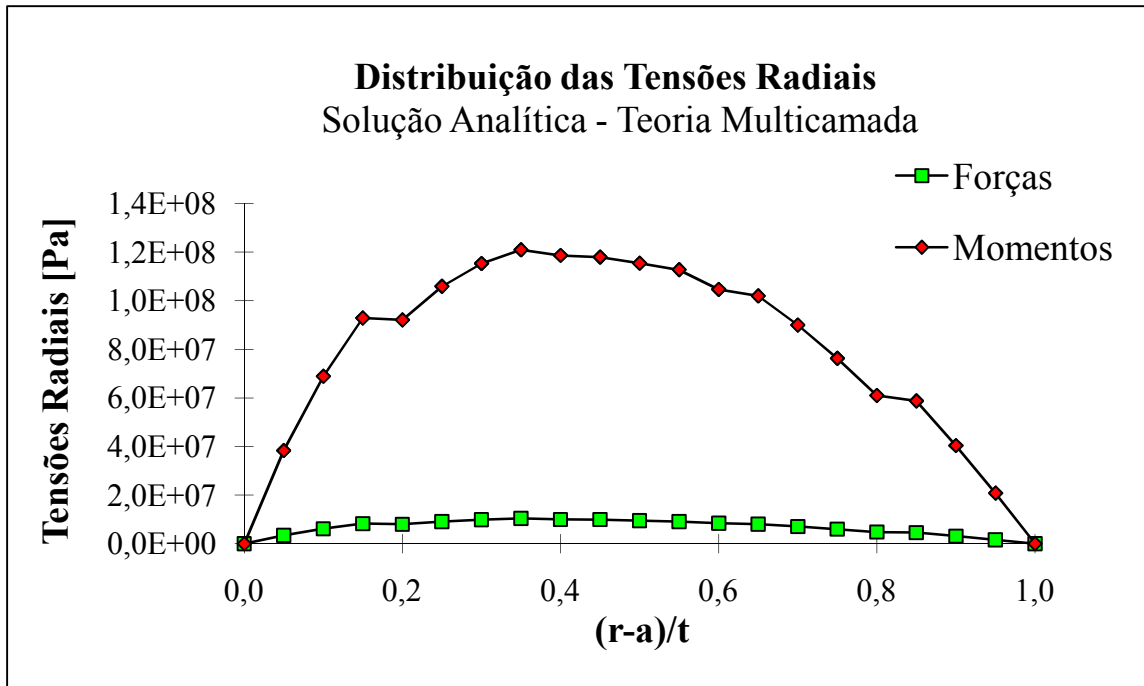


Figura 27 – Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no estudo *Layup* I de Sun e Kelly (1988): Distribuição da tensão radial.

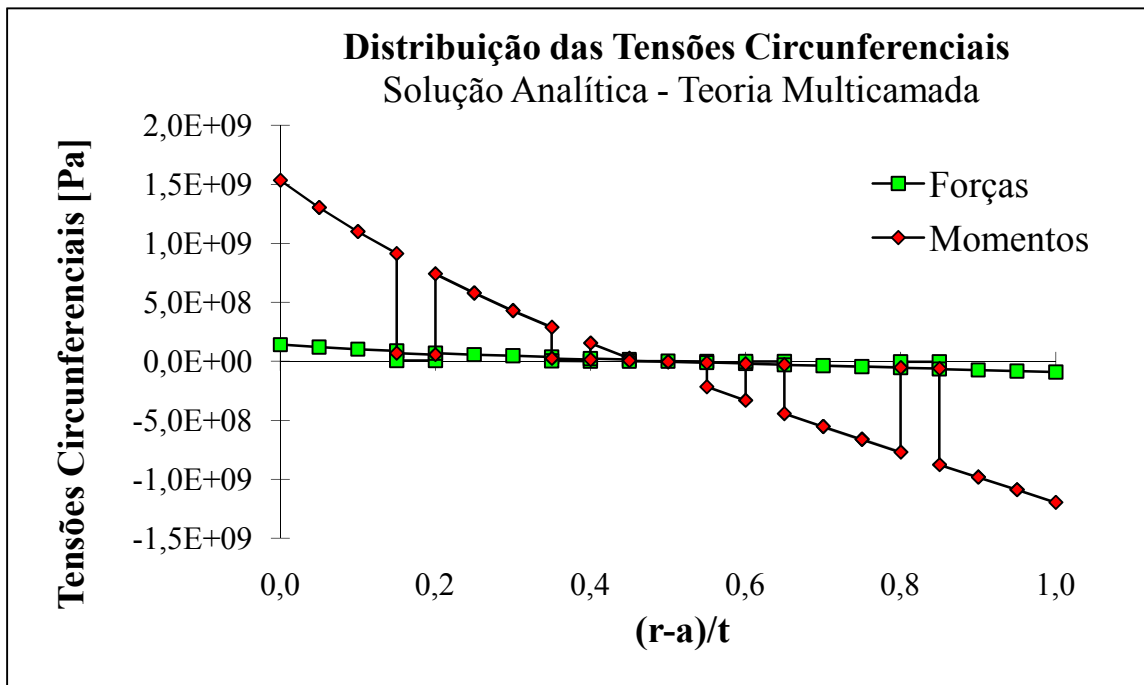


Figura 28 - Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no estudo *Layup* I de Sun e Kelly (1988): Distribuição da tensão circunferencial.

9.2.3 – Estudo da *Layup J*

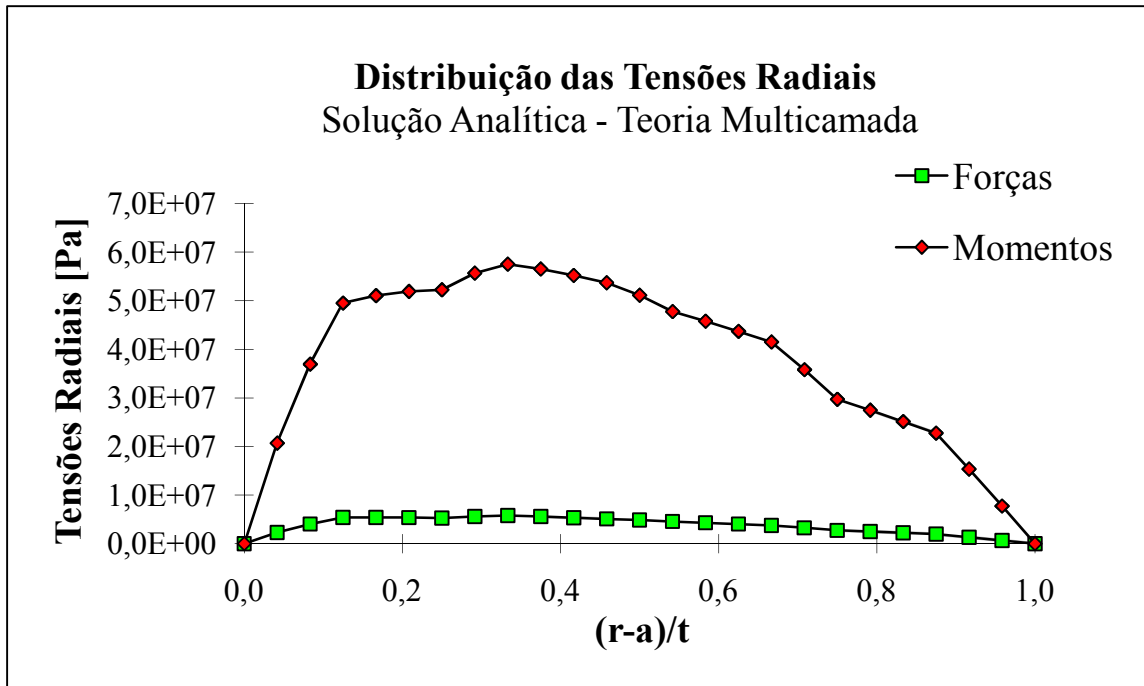


Figura 29 – Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no estudo *Layup J* de Sun e Kelly (1988): Distribuição da tensão radial.

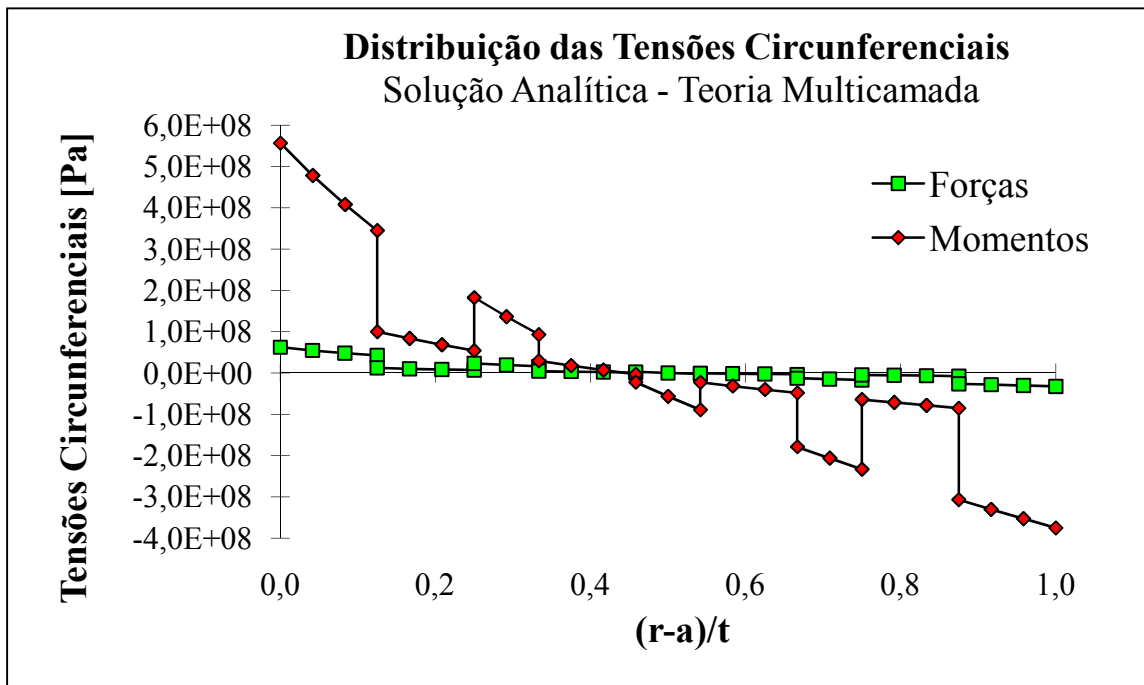


Figura 30 - Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no estudo *Layup J* de Sun e Kelly (1988): Distribuição da tensão circunferencial.

### 9.3 – Multilayer Theory aplicada ao novo provete em estudo

De seguida apresentam-se os resultados das tensões radiais e circunferenciais, respectivamente para os casos de forças e momentos nos extremos, para os três tipos de empilhamentos estudados, H, I e J, para o presente estudo.

#### 9.3.1 – Estudo da *Layup* H

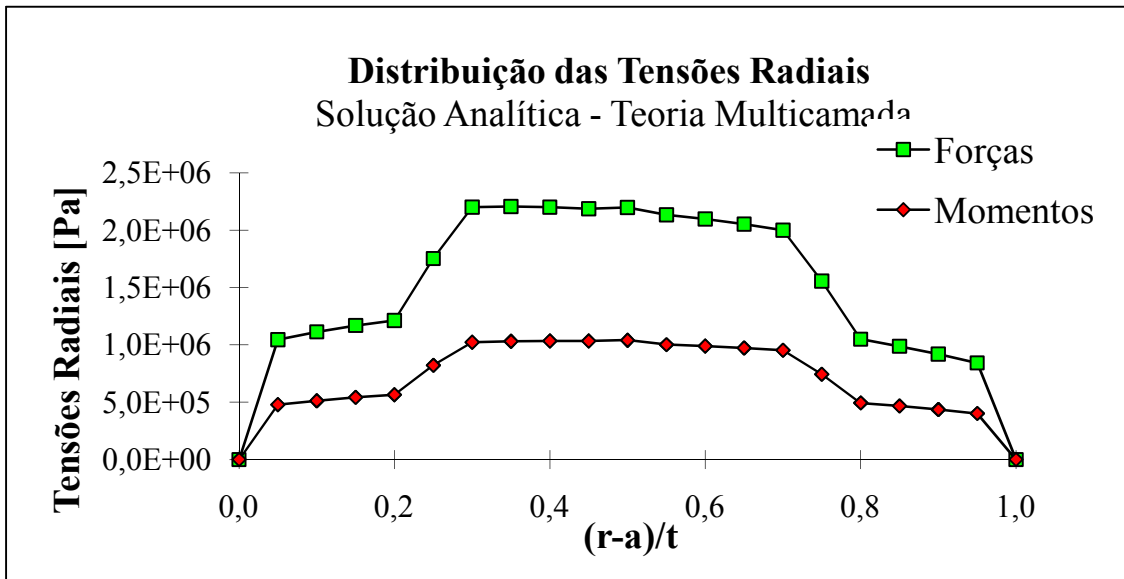


Figura 31 – Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no novo estudo *Layup* H: Distribuição da tensão radial.

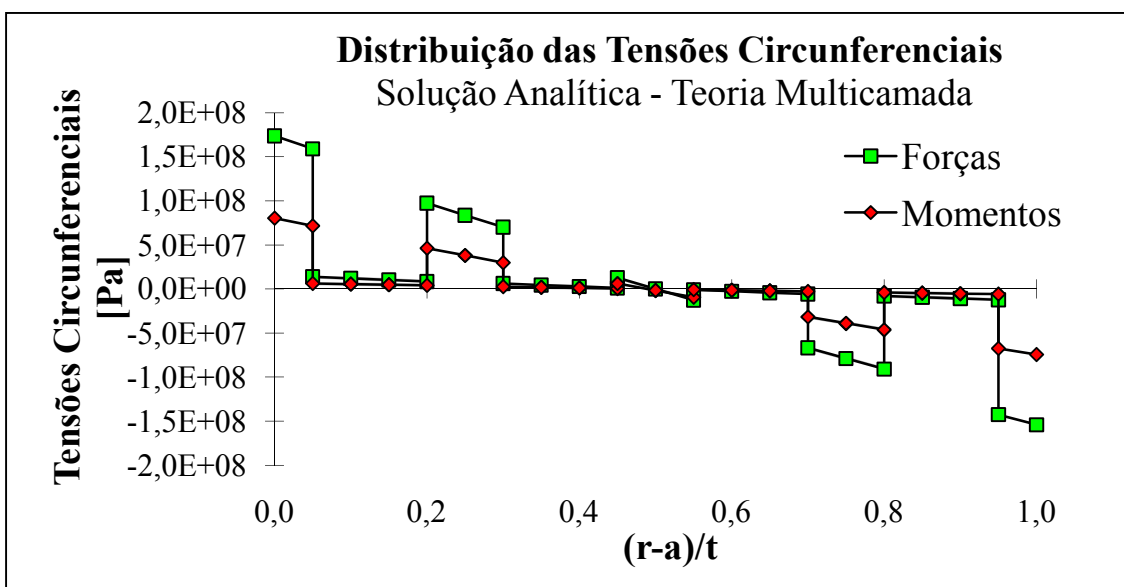


Figura 32 - Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no novo estudo *Layup* H: Distribuição da tensão circunferencial.

9.3.2 – Estudo da *Layup* I

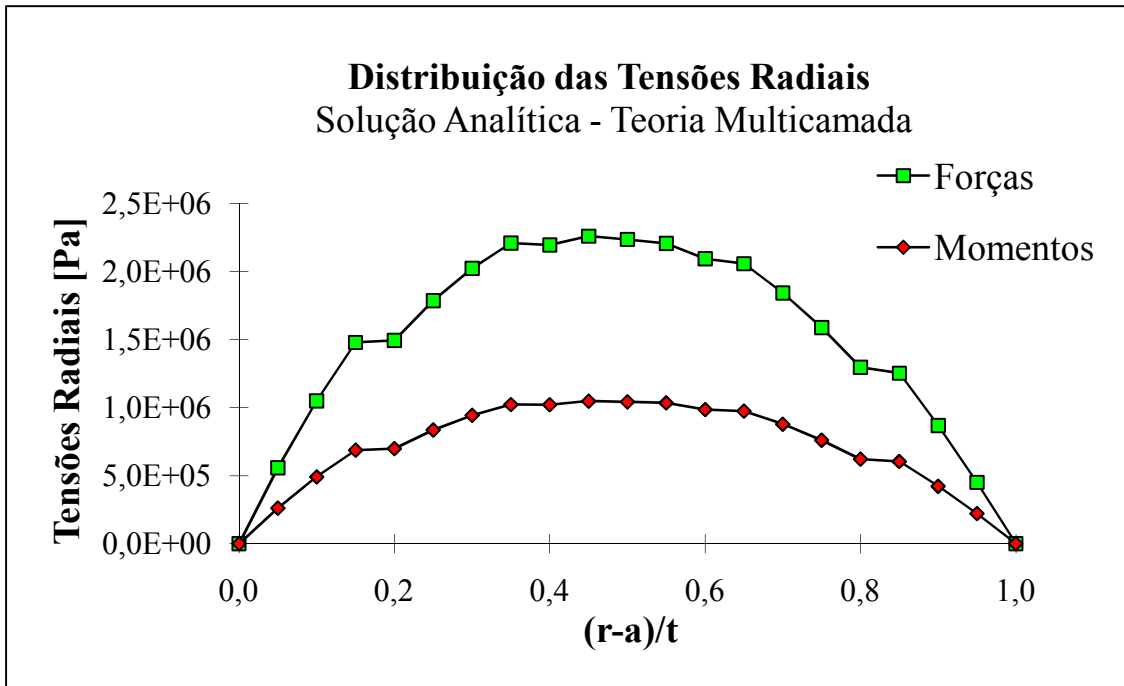


Figura 33 – Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no novo estudo *Layup* I: Distribuição da tensão radial.

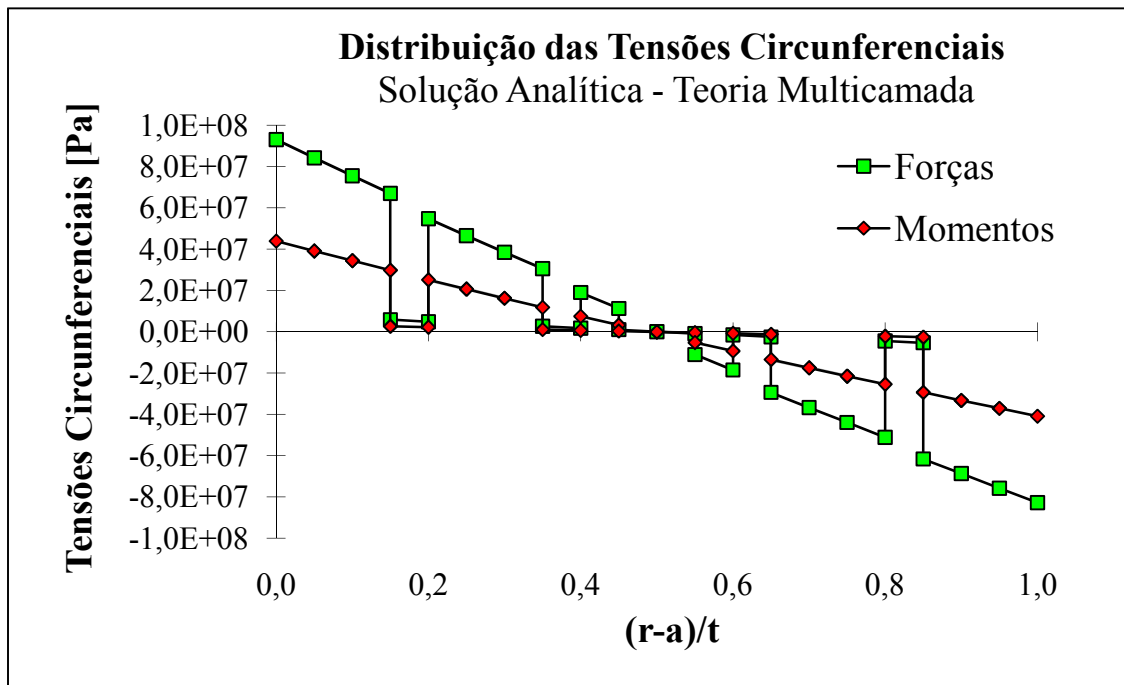


Figura 34 - Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no novo estudo *Layup* I: Distribuição da tensão circunferencial.

9.3.3 – Estudo da *Layup J*

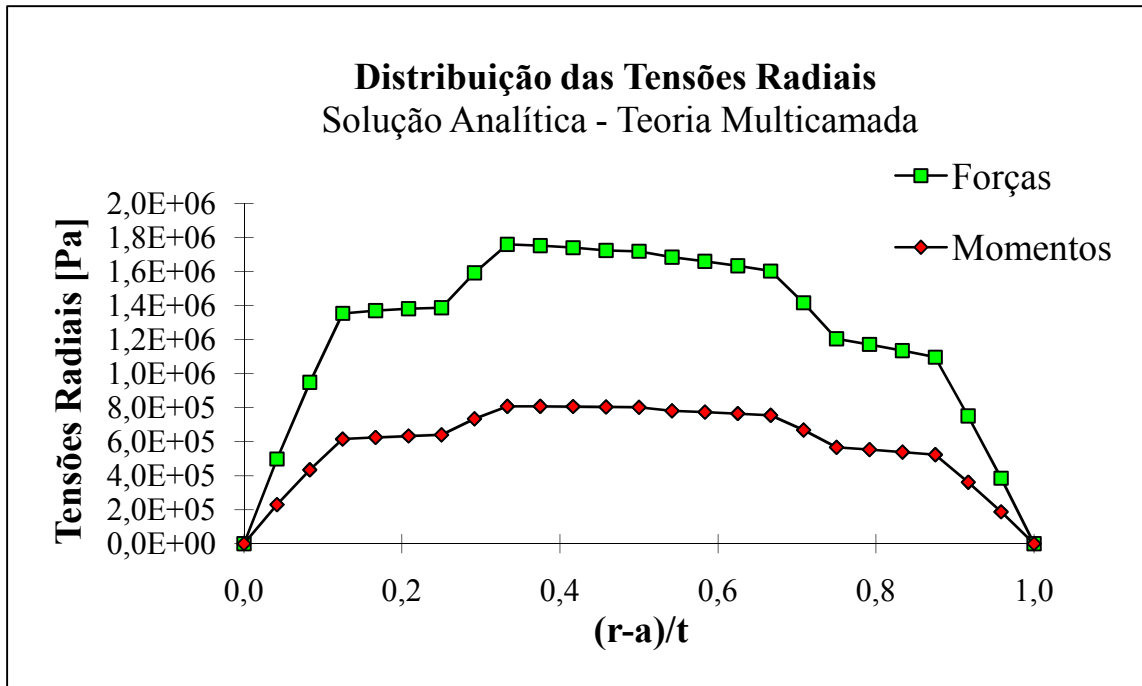


Figura 35 – Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no novo estudo *Layup J*: Distribuição da tensão radial.

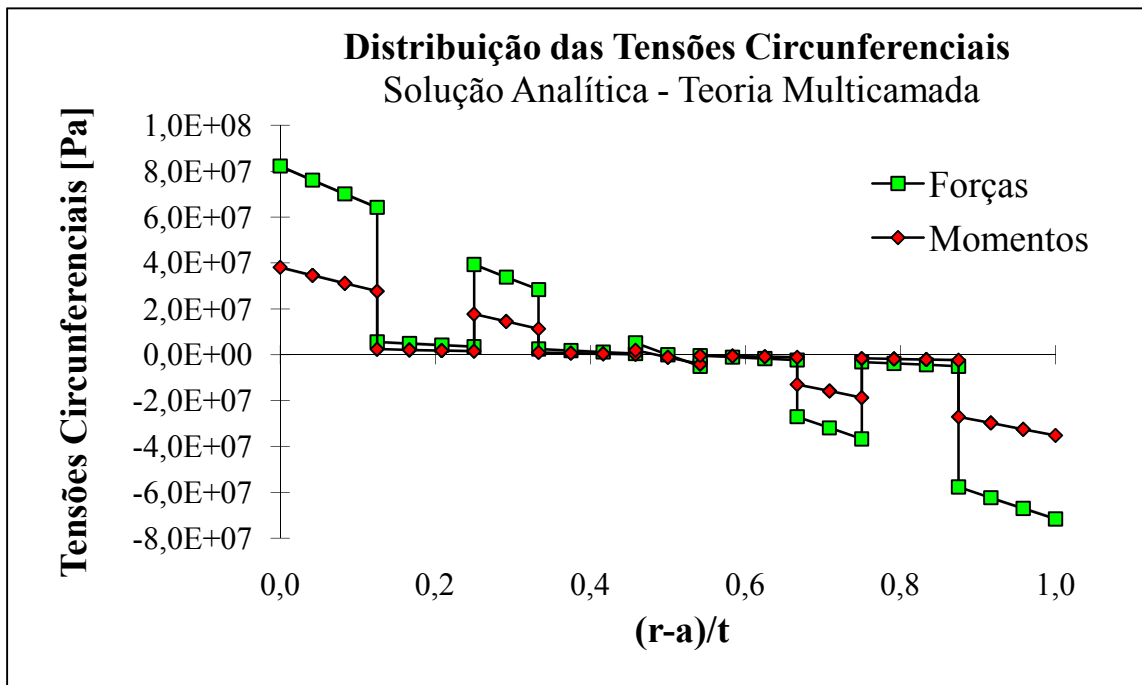


Figura 36 - Solução analítica dada pela *Multilayer Theory* no novo estudo *Layup J*: Distribuição da tensão circunferencial.

## **10 – Critério de rotura de Hashin**

O ponto de partida de Hashin é de que um critério para prever a falha de um material compósito tem de se basear necessariamente nos seus mecanismos de falha, em contrapartida com outros critérios que surgem como extrapolação de critérios existentes para outros materiais.

Seguindo esta ideia, são duas as propostas de Hashin. A primeira, mais simples (Hashin e Rotem 1973) para um estado biaxial de tensões, e a segunda, mais elaborada (Hashin 1980) para um estado tridimensional de tensões, que quando particularizado a 2D conduz a uma proposta diferente à anterior, a do ano de 1973 (París 2006).

As hipóteses em que se baseiam as propostas originais são as seguintes:

- Consideração separada dos mecanismos de falha (fibra, matriz, tracção e compressão);
- No modo de falha da matriz é considerado que as componentes do vector tensão no plano da falha são as responsáveis pela mesma;
- A interacção entre os distintos componentes que intervêm num modo de falha supõem-se quadráticas.

É interessante, inicialmente, estudar o critério para o caso plano de tensões (estado bidimensional) e depois passar para o estado 3D, um pouco mais complexo.

A evolução dos critérios mostrados, ainda que não haja muitas diferenças entre eles, requer alguns comentários. Ambas as propostas estimam os mecanismos de falha de uma lâmina de material compósito: falha da fibra (FF) e falha da matriz (FM). É baseada na observação da forma de rotura de uma lâmina unidireccional com um certo ângulo de orientação da fibra.

Tabela 10 - Critérios de Hashin para o caso bidimensional de tensões

Modos de Falha	Hashin 1973	Hashin 1980
<b>Falha da Fibra à Tracção (FFT)</b>	$\sigma_{11} = X_T$ $(\sigma_{11}, X_T > 0)$	$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (\sigma_{11} > 0)$
<b>Falha da Fibra à Compressão (FFC)</b>	$ \sigma_{11}  = X_T$ $(\sigma_{11} < 0, X_C > 0)$	$ \sigma_{11}  = X_T \quad (\sigma_{11} < 0, X_C > 0)$
<b>Falha da Matriz à Tracção (FMT)</b>	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$ $(\sigma_{22} > 0)$	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (\sigma_{22} > 0)$
<b>Falha da Matriz à Compressão (FMC)</b>	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$ $(\sigma_{22} < 0)$	$\left(\frac{\sigma_{22}}{2 \cdot S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2 \cdot S_T}\right)^2 - 1\right] \cdot \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$ $(\sigma_{22} < 0)$

A figura 37-a) representa a forma de rotura que surge num provete em que a fibra forma um ângulo de 0° com a respectiva orientação da carga. Por outro lado, a figura 37-b) representa a forma de rotura (que não envolve rotura das fibras) que aparece num provete em que a fibra forma um ângulo de 30° com a orientação da carga – experiência feita por Paris 2006.



a) com a fibra formando 0° com a direcção da carga



b) com a fibra formando 30° com a direcção da carga

Figura 37 – Rotura de provetes unidireccionais – retirado de Paris (2006)

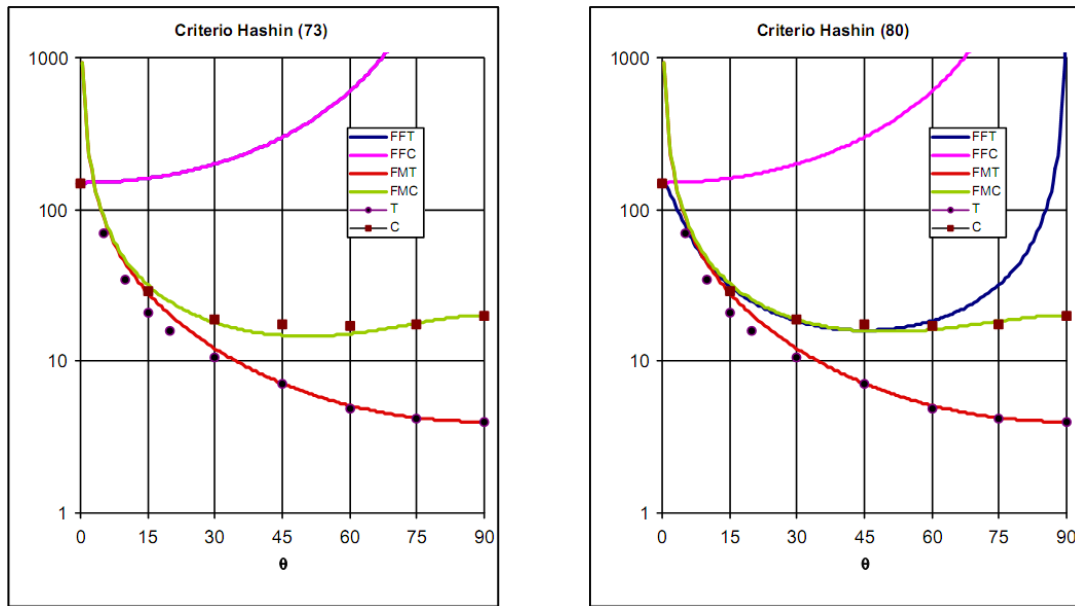
Com referência à falha na fibra, a única diferença reside na inclusão no critério de 1980 da contribuição de  $S_{12}$  para a falha à tracção. Esta modificação tenta ser coerente com a segunda das hipóteses descritas, que supõem que todas os componentes do vector de tensão no plano de falha contribuíam para o mesmo. Contudo, há que salientar que esta modificação não conta com claros fundamentos físicos, e em todo o caso esta segunda hipótese não se mantém para o efeito de falha da matriz.

Referenciando o tipo de interacção assumida entre componentes (quadrática), é necessário dar ênfase ao facto de que Hashin tenta evitar qualquer ligação da sua proposta com conceitos energéticos. A razão desta escolha deve-se à forma simples de aproximar uma interacção entre os diferentes feitos, uma vez que a interacção linear é excluída.

Em relação à falha da matriz, existem diferenças para o caso da compressão, que advêm do facto de que a proposta de 1980 surge como uma particularização de uma expressão tridimensional para o caso bidimensional. Em segundo lugar, Hashin propõe uma interacção quadrática dos invariantes do estado de tensões, abandonando assim a ideia original de relacionar o critério de falha com o modo de falha. A respeito desta função há que destacar a presença do valor admissível  $S_T$ , que é uma característica tridimensional dentro de uma relação 2D, e a ausência da tensão associada à dita resistência ( $\sigma_{22}$ ). Uma discussão sobre as implicações dos critérios de Hashin e o aparecimento de uma resistência fora do plano na rotura de uma lâmina antes da carga biaxial pode ser encontrada em París (2006).

Com o objectivo de comparar os critérios anteriores, París (2006), considerou, para o mesmo caso analisado anteriormente, uma lâmina submetida à tracção com as fibras formando um certo ângulo com a direcção da carga.

Nas figuras 38-a) e 38-b) representam-se respectivamente os resultados previstos para ambos os critérios (Hashin1973; Hashin1980) para o mesmo material considerado previamente. Ainda a mencionar que para o critério de 1980, foi considerado para o valor de  $S_T$  uma aproximação proposta por Puck,  $S_T = 0,4 \times Y_C$ .



a) Segundo Hashin et al. (1973)

b) Segundo Hashin (1980)

Figura 38 – Comparação dos resultados experimentais com os resultados previstos pelos critérios – retirado de Paris (2006)

Como se pode observar, ambos os critérios ajustam-se de forma aceitável aos valores experimentais, obtendo-se para o caso do critério de 1980, uma melhoria quanto à previsão da falha por compressão.

No estudo deste trabalho, o critério 3D é a principal proposta de Hashin em 1980 (Hashin 1980). É também dividido em 4 modos de falha:

Falha na Fibra à Tração (FFT)

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (28)$$

$$\sigma_{11} = X_T \quad (29)$$

Falha na Fibra à Compressão (FFC)

$$|\sigma_{11}| = X_C \quad (30)$$

Falha na Matriz à Tração (FMT),  $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) > 0$

$$\frac{1}{Y_T^2} \cdot (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_T^2} \cdot (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22} \cdot \sigma_{33}) + \frac{1}{S^2} \cdot (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (31)$$

Falha na Matriz à Compressão (FMC),  $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) < 0$

$$\frac{1}{Y_C} \cdot \left[ \left( \frac{Y_C}{2 \cdot S_T} \right)^2 - 1 \right] \cdot (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4 \cdot S_T^2} \cdot (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_T^2} \cdot (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22} \cdot \sigma_{33}) + \frac{1}{S^2} \cdot (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad 32)$$

Podemos ainda definir a carga crítica como sendo a carga que iniciaria a rotura, isto é, igualaria as equações de Hashin a 1. Sendo um critério quadrático, é possível determiná-la através de:

$$P_{crit} = \frac{P}{\sqrt{m}} \quad 33)$$



# Capítulo Quatro – Modelos Numéricos

## 11 – Introdução

Os estudos numéricos dos vários elementos curvos foram feitos com recurso ao software comercial de elementos finitos ANSYS V11.0. Tanto Sun e Kelly (1988) como Ko e Jackson (1989) validaram os seus estudos recorrendo a modelos MEF 2D. No presente trabalho, o objectivo dos cálculos numéricos é fazer o estudo dos trabalhos de Sun e Kelly (1988) e Ko e Jackson (1989) mas em modelos MEF 3D, visto ser um tipo de estudo pouco realizado na literatura dos elementos curvos em matérias compósitos. Assim, foram feitos sete modelos MEF 3D a fim de:

- Analisar os três provetes de Sun e Kelly (1988) – Anexos R, S e T;
- Analisar o provete de Ko e Jackson (1989) – Anexo U;
- Estudar o comportamento mecânico do novo provete curvo que é objecto de estudo deste trabalho – Anexos V, W e X.

Para todos os casos, foram utilizados elementos sólidos anisotrópicos com oito nós cada (SOLID64). A escolha deste tipo de elemento deve-se ao facto dos *Composite Elements* apresentados pelo ANSYS não simularem convenientemente as tensões interlaminares. Este tipo de elemento já foi estudado por Leite (2008) na simulação de elementos curvos em forma de C com abas planas nas extremidades. No capítulo anterior – Modelos Analíticos – foram abordados os empilhamentos, direcções axiais e tipos de materiais utilizados nestes estudos.

## 12 – Modelo MEF 3D de Sun e Kelly (1988) em ANSYS

Para analisar os estudos de Sun e Kelly (1988) foram feitos três modelos geometricamente semelhantes, em que as únicas diferenças entre eles são os empilhamentos e materiais utilizados. A figura 39 mostra a geometria e o aspecto da malha do modelo *Layup H*. Para os outros dois casos estudados, *Layup I* e *Layup J*, a construção da malha é semelhante.

Em termos de condições de fronteira, fizeram-se duas aproximações ao feito originalmente por Sun e Kelly (1988). Para as cargas aplicadas, que os autores consideraram distribuídas ao longo da espessura, neste estudo fez-se uma aproximação, consideraram-se três cargas localizadas, uma em cada vértice da extremidade e uma ao centro (figura 39). A aplicação da carga é no sentido positivo do eixo dos  $yy$ , permitindo também translação ao longo o mesmo eixo. A aplicação dos constrangimentos da aba inferior foi também feita nas pontas e meio do modelo, considerando não haver nenhum grau de liberdade para qualquer um dos três eixos.

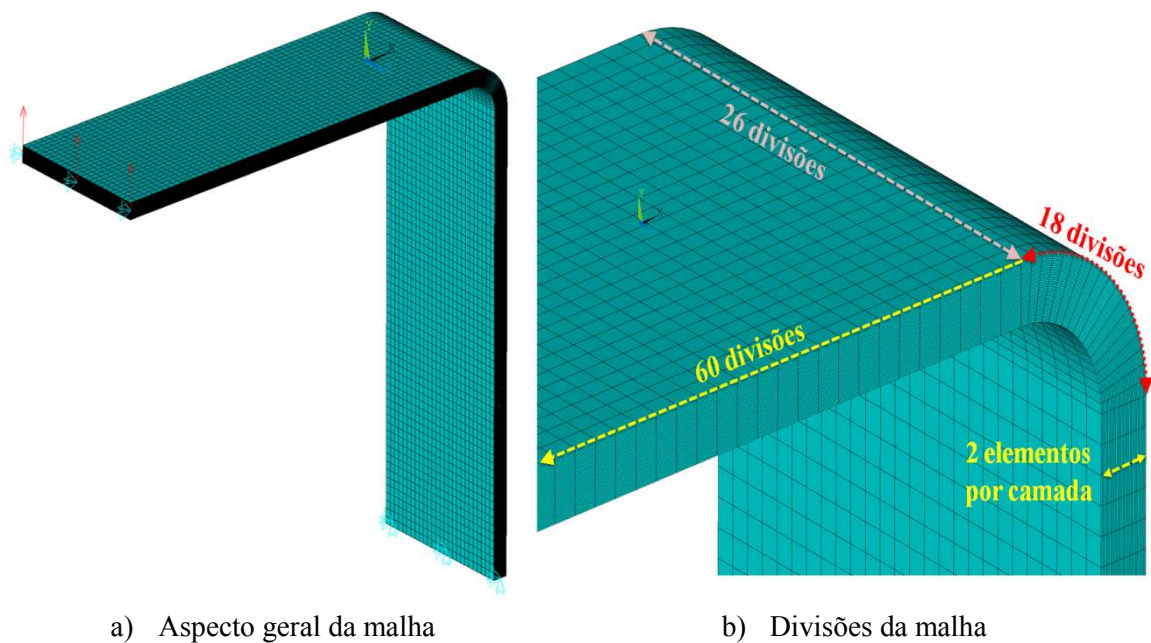


Figura 39 – Modelo numérico do estudo de Sun e Kelly (1988).

Como também se pode observar na figura 39, a malha foi construída da seguinte forma: 60 divisões ao longo do comprimento de cada aba; 18 divisões ao longo da curva de  $90^\circ$  (quarto de circunferência), permitindo haver nós de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ ; 26 divisões ao longo da largura do provete; e 2 divisões (elementos) por cada camada ao longo da espessura.

Na tabela seguinte mostra-se o número de elementos, número de nós e a carga aplicada para cada tipo de provete deste estudo.

Tabela 11- Carga aplicada e número de elementos e nós para os provetes de Sun e Kelly (1988).

	<i>Layup H</i>	<i>Layup I</i>	<i>Layup J</i>
<b>N.º de Elementos</b>	143520	143520	172224
<b>N.º de Nós</b>	153873	153873	183897
<b>Carga Aplicada</b>	444,8N (100lbf)		

Nas figuras 40 a 42 apresentam-se os resultados numéricos para as tensões radiais e circunferenciais para os três empilhamentos, H, I e J.

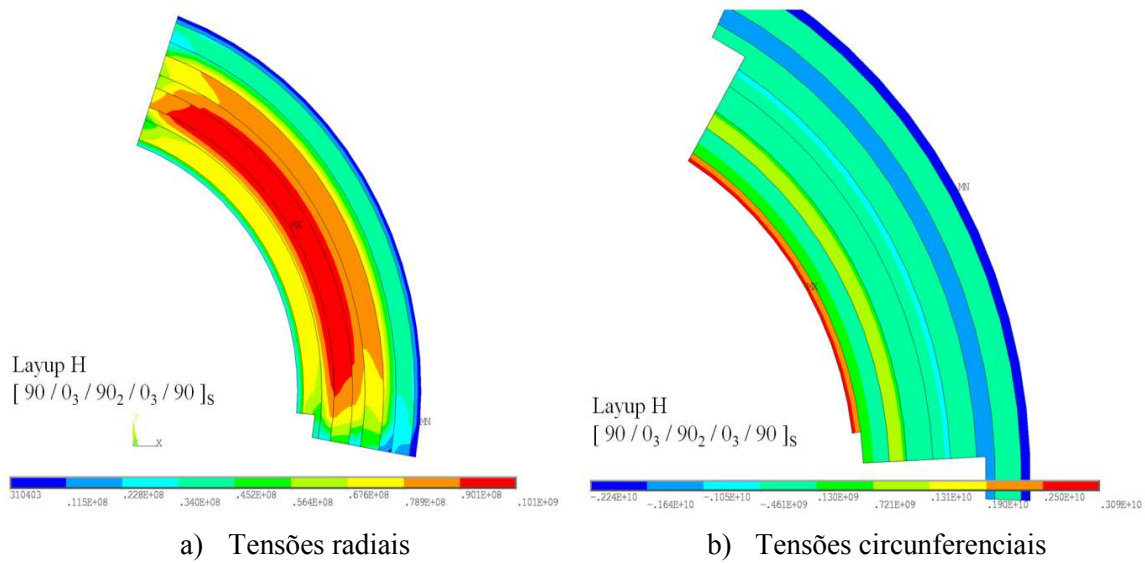


Figura 40 – Solução numérica para a *Layup H* do estudo de Sun e Kelly (1988).

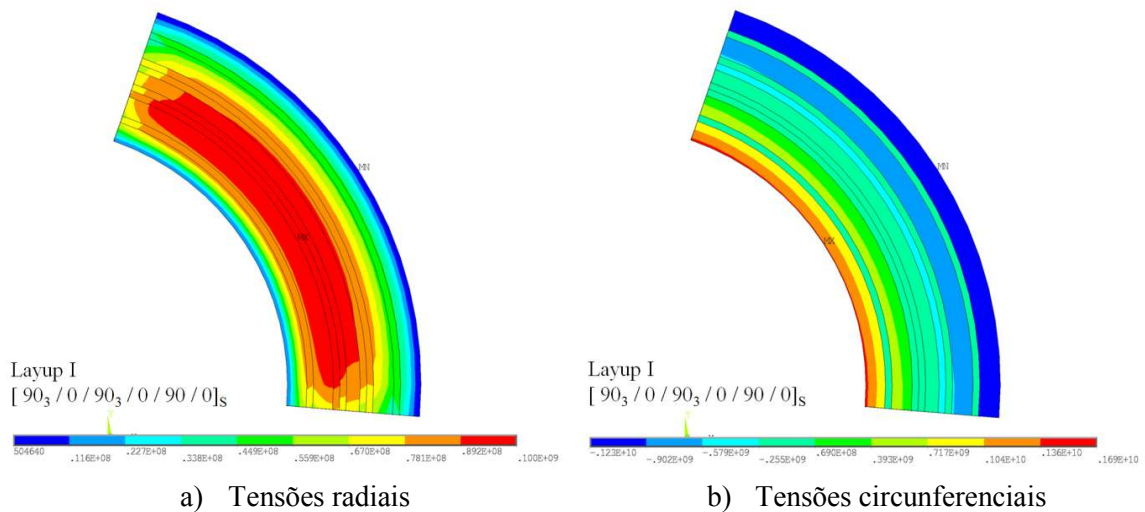


Figura 41 – Solução numérica para a *Layup I* do estudo de Sun e Kelly (1988).

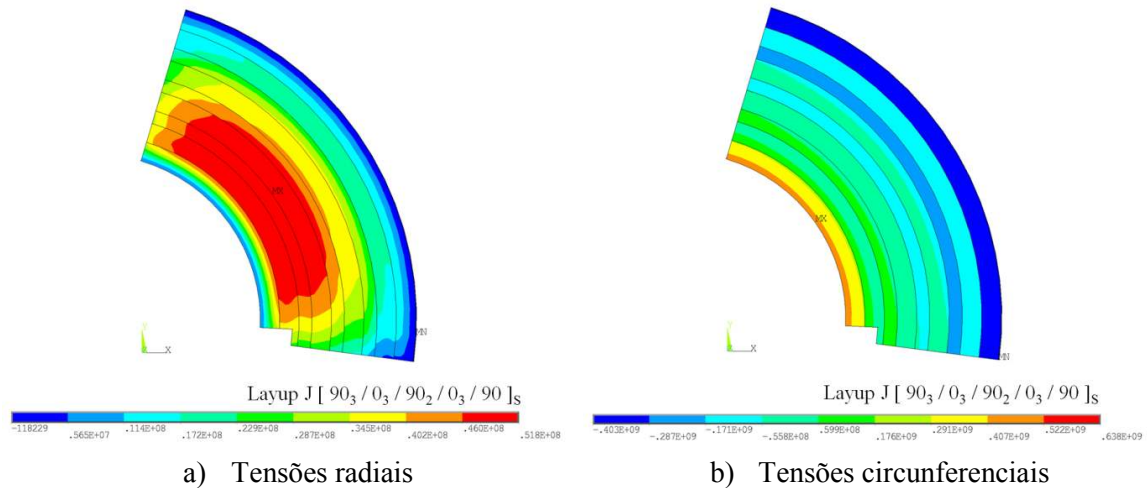


Figura 42 – Solução numérica para a *Layup J* do estudo de Sun e Kelly (1988).

### 13 – Modelo MEF 3D de Ko e Jackson (1989) em ANSYS

Ko e Jackson (1989) fizeram apenas um modelo 2D para validar a sua *Multilayer Theory*. Nesta secção foi feito o mesmo modelo mas em 3D e com algumas aproximações. Tal como anteriormente, as cargas e os constrangimentos foram aplicados nas pontas e meio do provete. As forças com a amplitude de uma unidade, 1N, tal como Ko e Jackson (1989) fizeram, têm o sentido positivo do eixo dos *yy*. Ainda nos pontos de aplicação das forças, os constrangimentos só permitem translação vertical. Na aba inferior, os constrangimentos não permitem qualquer deslocamento axial.

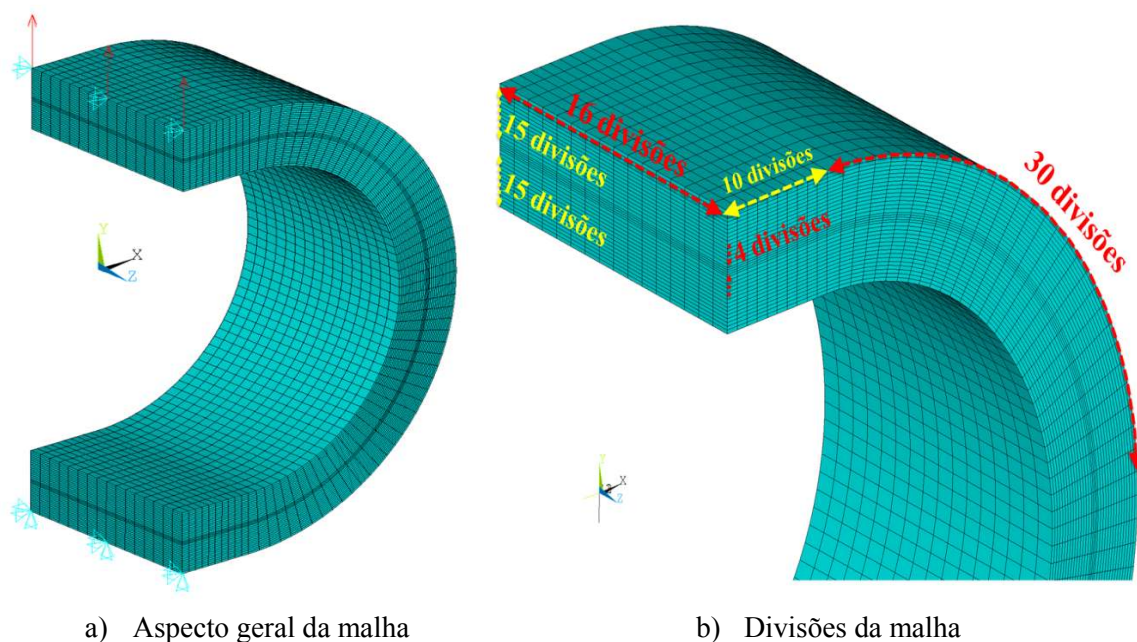


Figura 43 – Modelo numérico do estudo de Ko e Jackson (1989).

Na figura 43 pode-se observar que a malha foi construída da seguinte forma: 10 divisões ao longo do comprimento de cada aba; 30 divisões ao longo da curva de 90° (quarto de circunferência), permitindo haver nós de 3° em 3°, tendo toda a semicircunferência 60 divisões; 16 divisões ao longo da largura de todo o modelo; 15 divisões para as vinte e cinco primeiras camadas orientadas a 0°, novamente 15 divisões para as últimas vinte e cinco camadas orientadas a 0°, e 4 divisões pelas quatro camadas orientadas a  $\pm 15^\circ$  a meio do empilhamento, havendo um total de 34 divisões ao longo da espessura. O modelo é constituído por 43520 elementos e 48195 nós. De seguida, na figura 44, apresenta-se a solução numérica das tensões radiais e circunferenciais para o estudo de Ko e Jackson (1989).

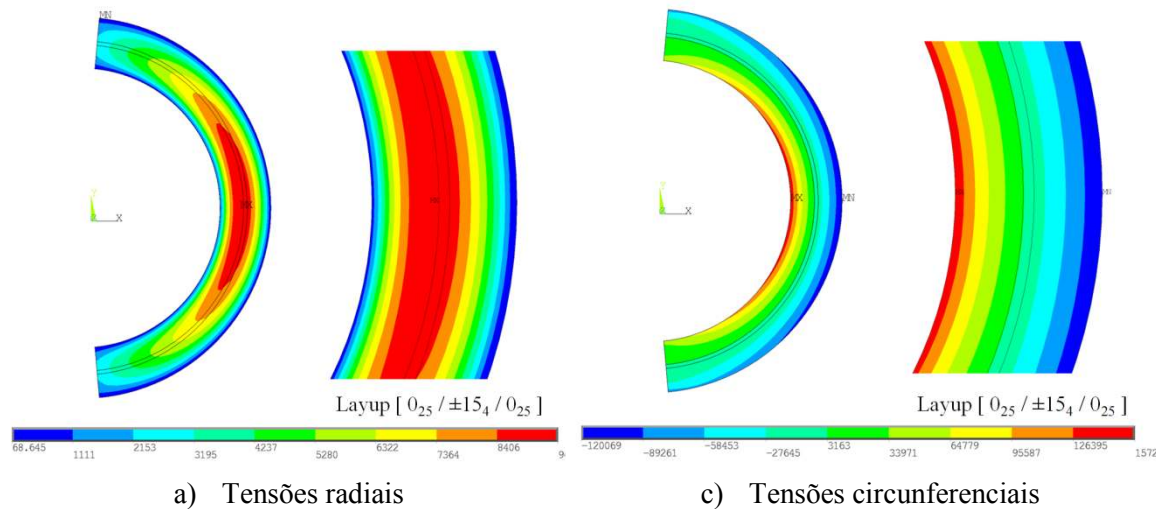
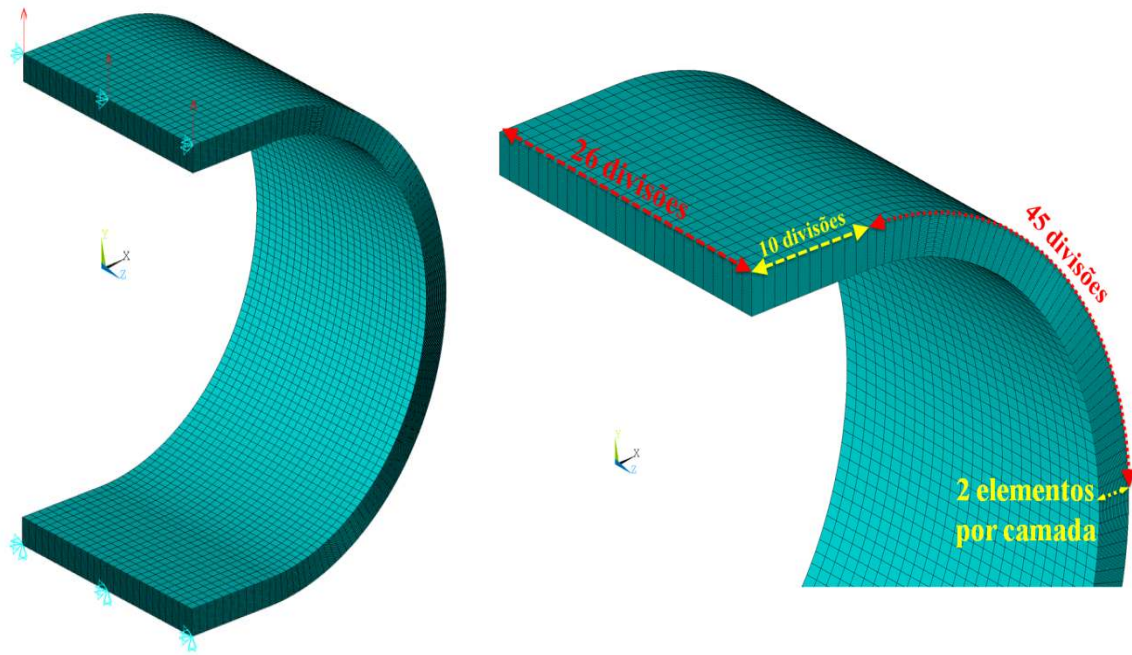


Figura 44 – Solução numérica para o estudo de Ko e Jackson (1989)

## 14 – Modelo MEF 3D do presente estudo em ANSYS

Este é o modelo numérico do principal estudo deste trabalho. Dos dois anteriores, ganhou-se experiência e confiança para abordar este novo estudo que se pretende fazer. Ora, em termos de condições de fronteira, tanto os constrangimentos como as cargas aplicadas são idênticos aos dois modelos anteriores. Na figura 45 pode-se observar o novo modelo numérico onde a malha tem as seguintes dimensões: 10 divisões ao longo do comprimento de cada aba; 45 divisões ao longo da curva de 90° (quarto de circunferência), permitindo haver nós de 2° em 2°, tendo toda a semicircunferência 90 divisões; 26 divisões ao longo da largura de todo o modelo; e 2 divisões (elementos) por cada camada ao longo da espessura.



a) Aspecto geral da malha

b) Divisões da malha

Figura 45 – Modelo numérico do novo estudo.

Na tabela seguinte mostra-se o número de elementos, número de nós e a carga aplicada para cada tipo de provete neste estudo.

Tabela 12 - Carga aplicada e número de elementos e nós para os novos provetes do principal estudo deste trabalho.

	Layup H	Layup I	Layup J
N.º de Elementos	114400	114400	137280
N.º de Nós	122877	122877	146853
<b>Carga Aplicada</b>		100 N	

Nas figuras 46 a 51 apresentam-se os resultados numéricos, em termos de franja de cores com os gráficos sobrepostos das tensões radiais e circunferenciais, para os três empilhamentos, H, I e J. Estas figuras mostram o modelo numérico na zona de  $\theta = 90^\circ$ .

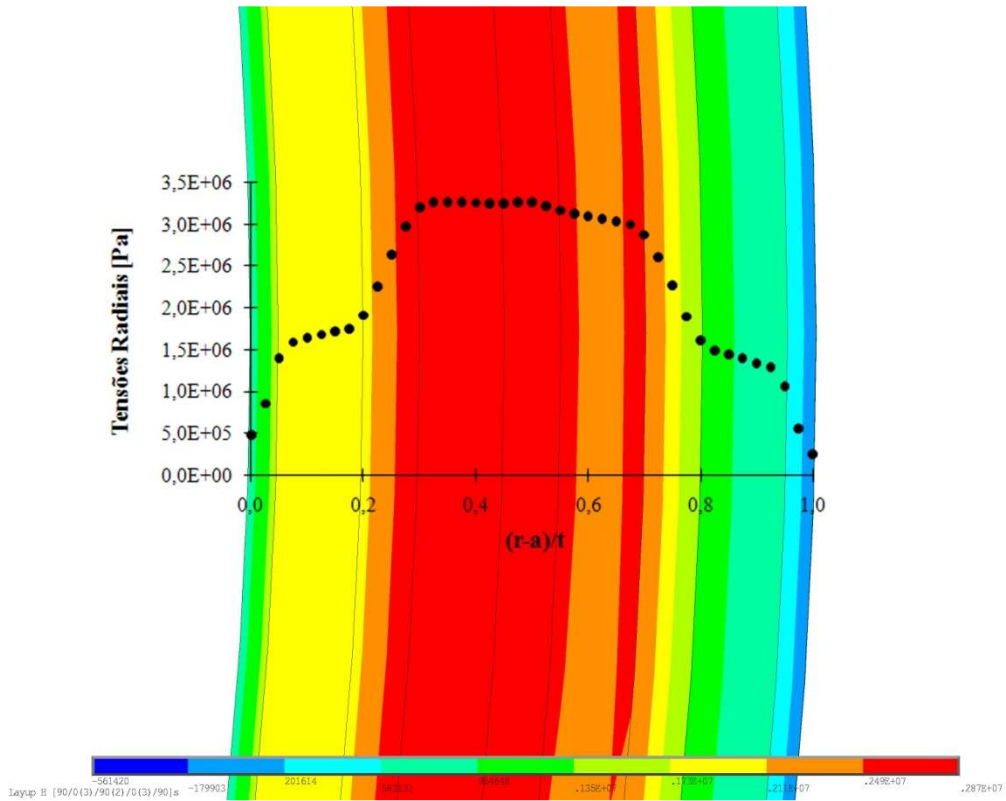


Figura 46 – Solução numérica das tensões radiais para a Layup H no presente estudo.

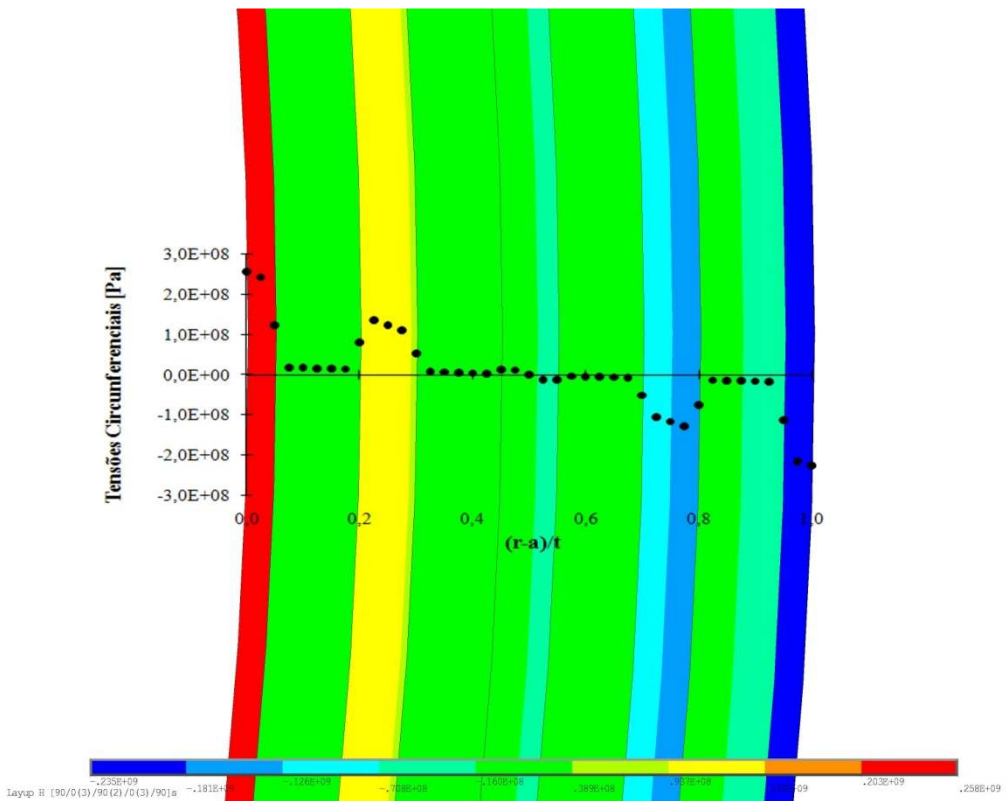


Figura 47 – Solução numérica das tensões circunferenciais para a Layup H no presente estudo.

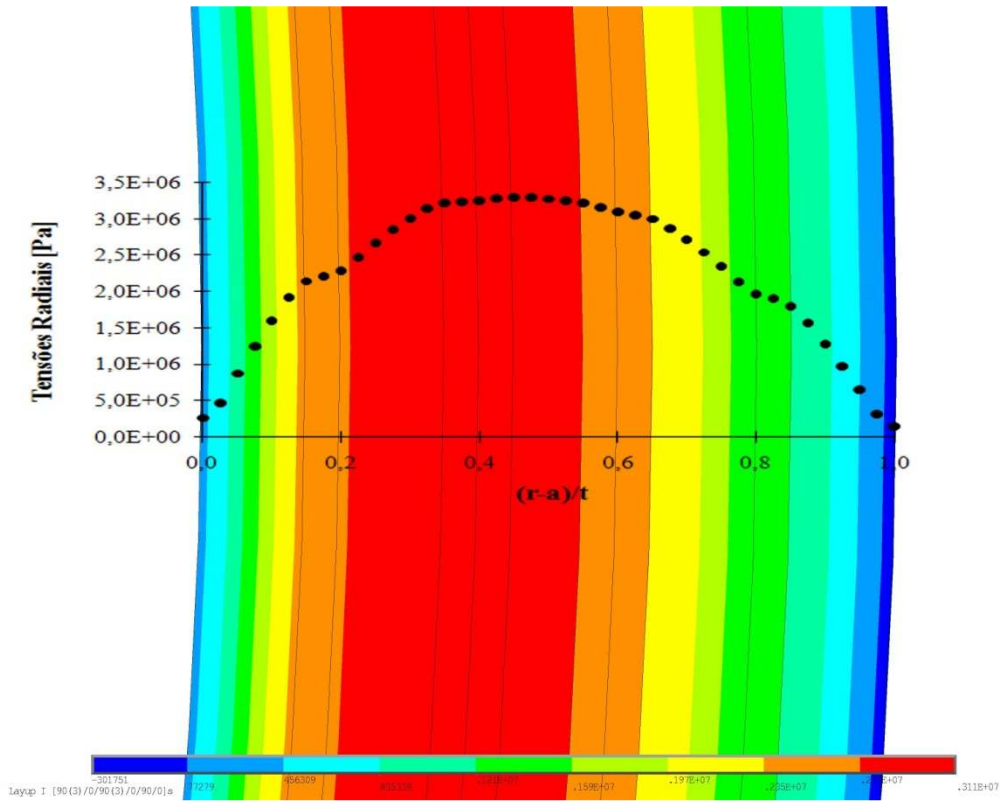


Figura 48 – Solução numérica das tensões radiais para a Layup I no presente estudo.

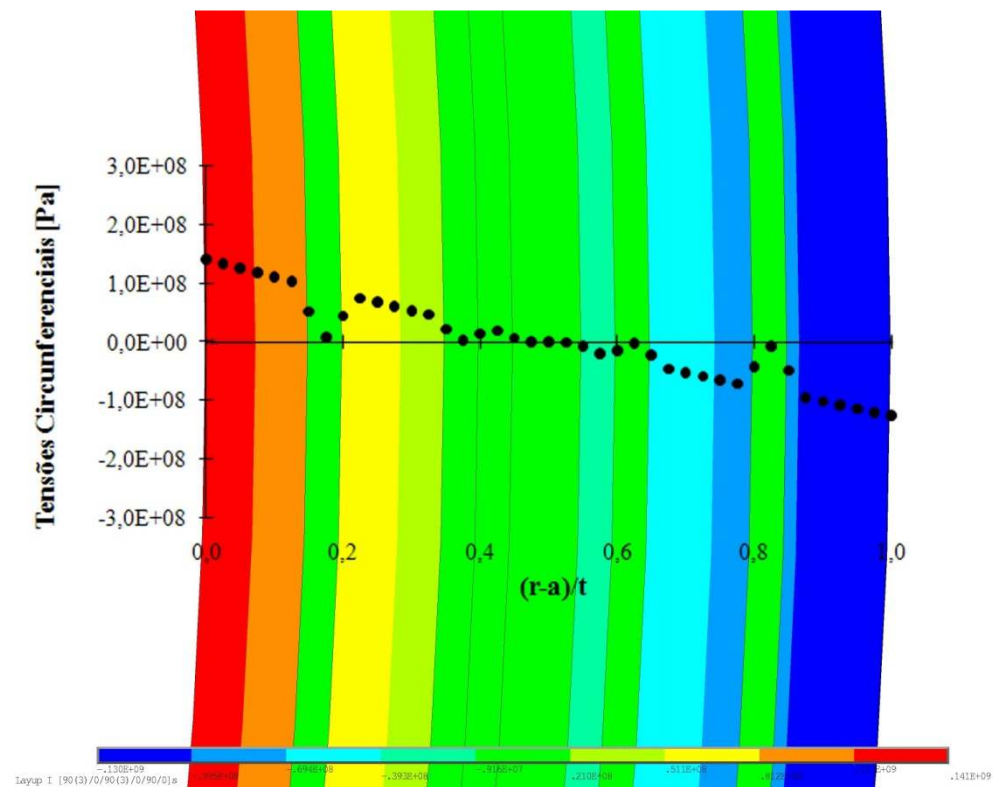


Figura 49 – Solução numérica das tensões circunferenciais para a Layup I no presente estudo.

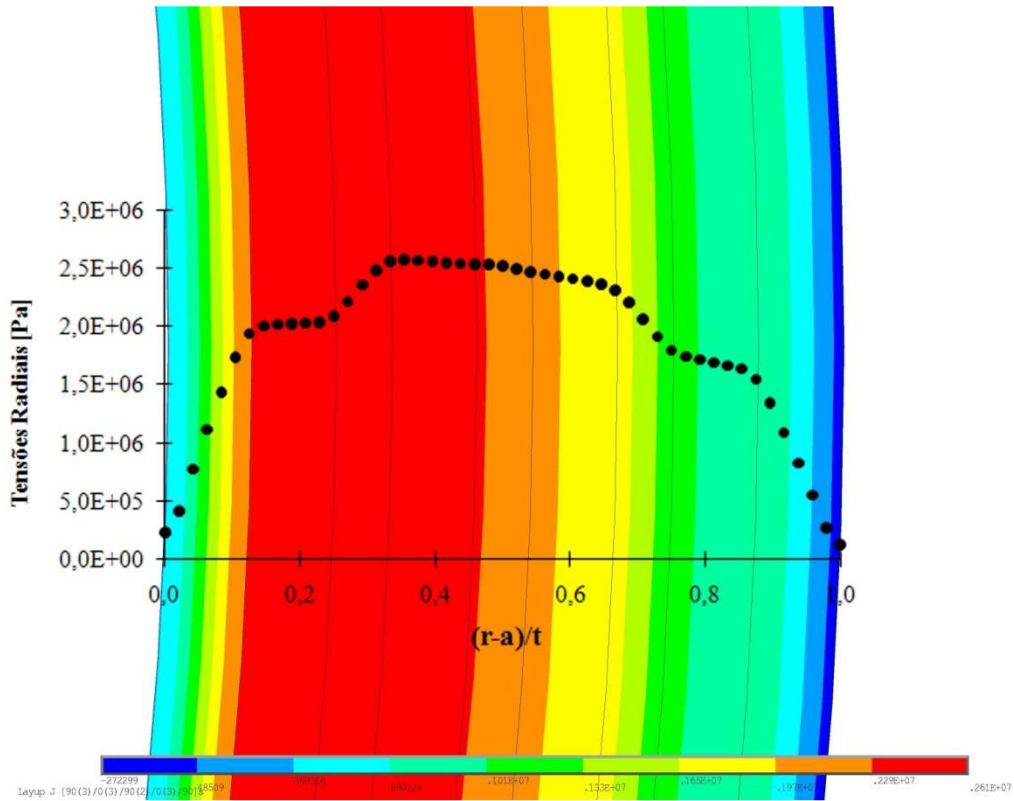


Figura 50 – Solução numérica das tensões radiais para a *Layup J* no presente estudo.

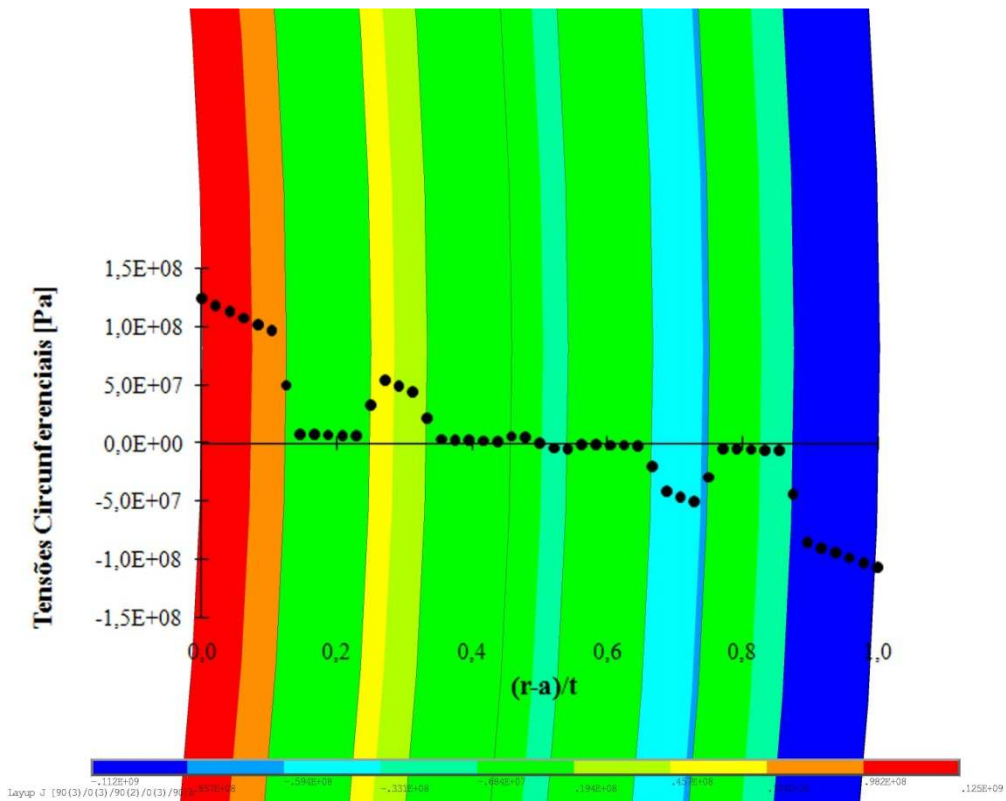


Figura 51 – Solução numérica das tensões circunferenciais para a *Layup J* no presente estudo.



# Capítulo Cinco – Resultados e Análise

## 15 – Análise do artigo de Sun e Kelly (1988)

Para analisar o artigo de Sun e Kelly (1989) foi feita uma comparação dos resultados teóricos obtidos pela *Multilayer Theory* com os resultados numéricos obtidos em ANSYS. Todos os dados do artigo de Sun e Kelly (1988) são retirados para a zona curva do provete com  $\theta = 65^\circ$ . É ainda feita uma comparação do estudo numérico feito no artigo com o estudo numérico feito em ANSYS.

**15.1** – Comparação dos resultados da *Multilayer Theory* com os resultados do Ansys MEF 3D, para  $\theta = 65^\circ$  e a meio da largura

### 15.1.1 – Estudo da *Layup* H

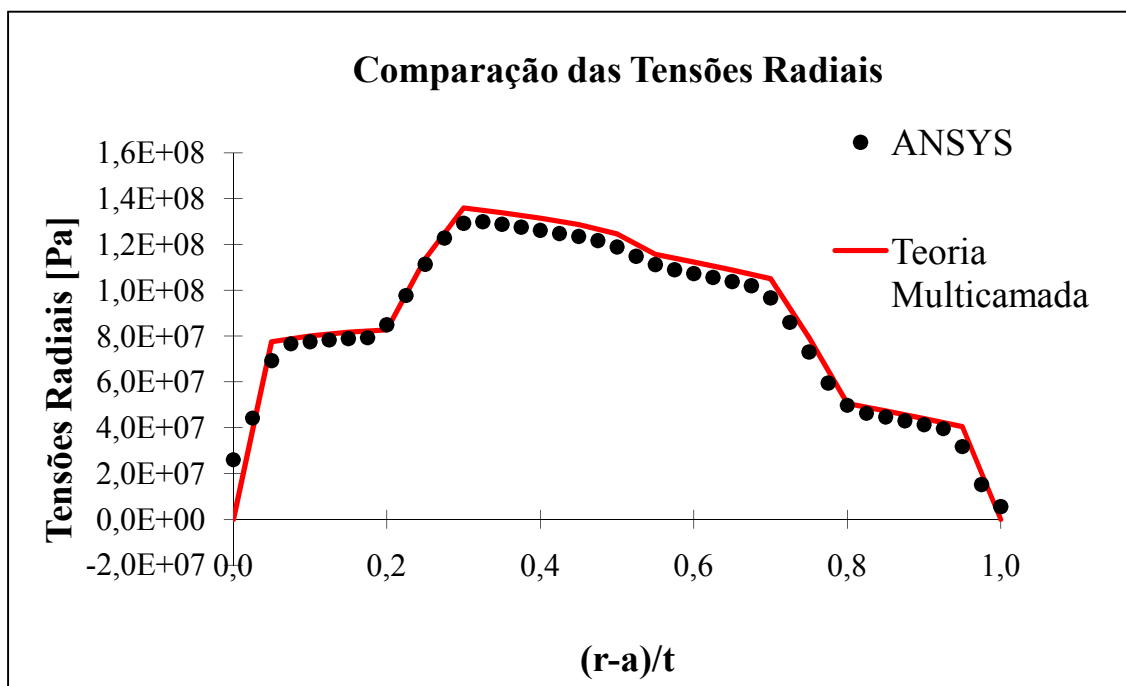


Figura 52 – Comparação das distribuição as tensões radiais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS para  $\theta = 65^\circ$ , para a *Layup* H, no estudo de Sun e Kelly (1988).

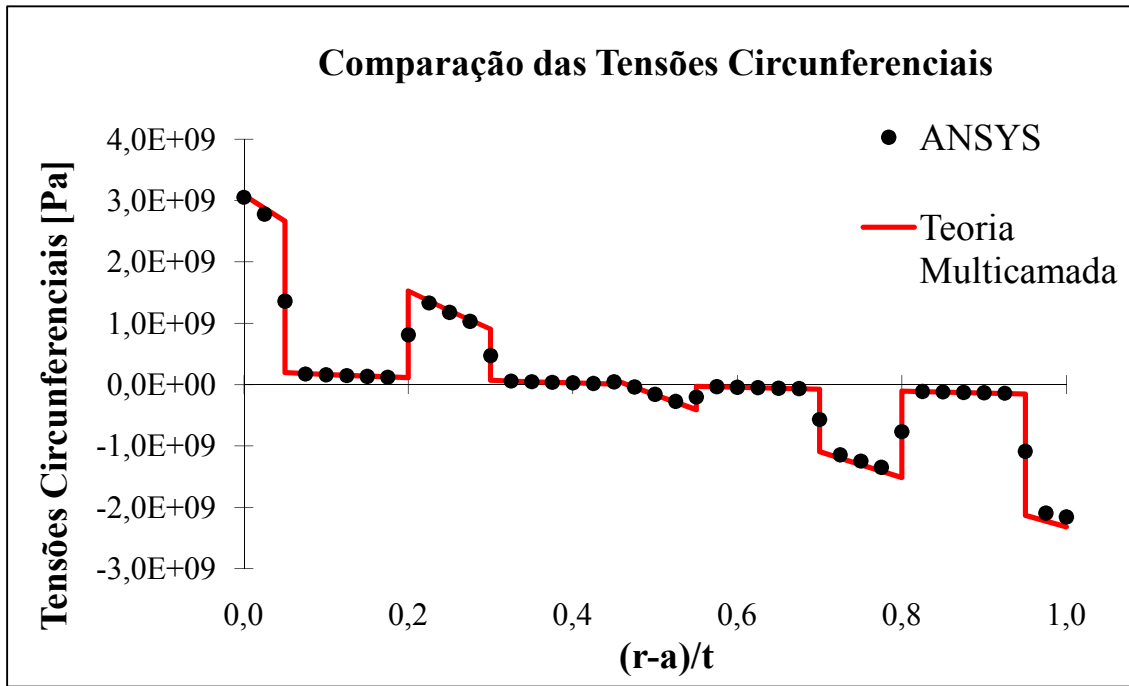


Figura 53 – Comparação das distribuição as tensões circunferenciais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS, para  $\theta = 65^\circ$ , para a *Layup H*, no estudo de Sun e Kelly (1988).

### 15.1.2 – Estudo da *Layup I*

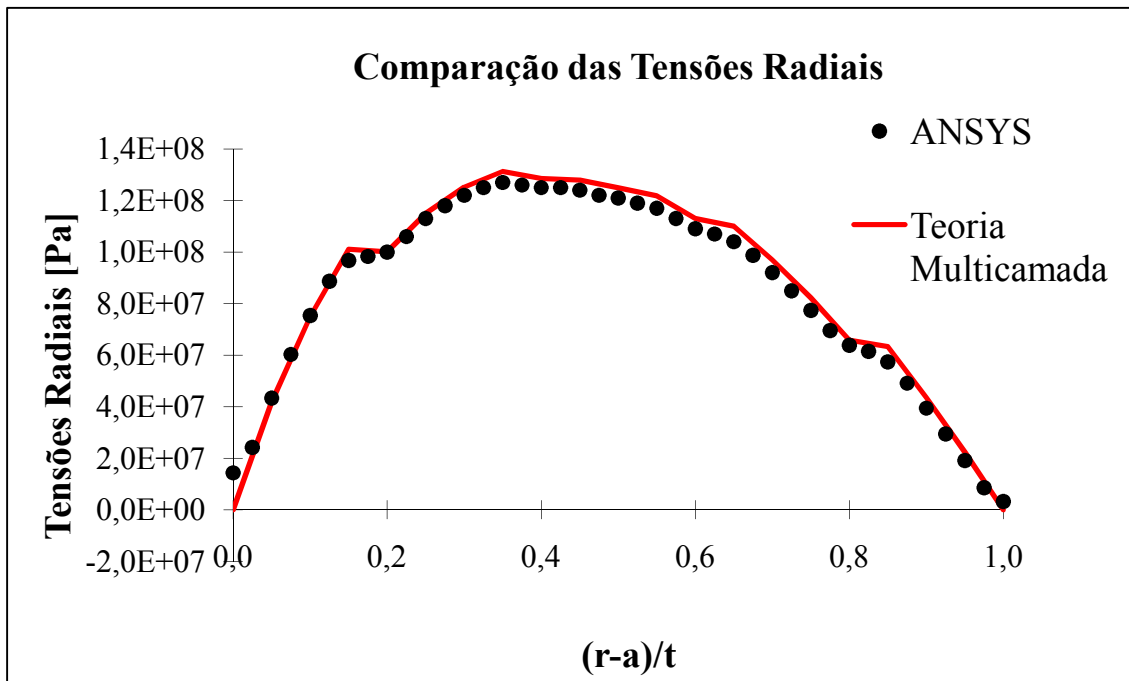


Figura 54 – Comparação das distribuição as tensões radiais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS para  $\theta = 65^\circ$ , para a *Layup I*, no estudo de Sun e Kelly (1988).

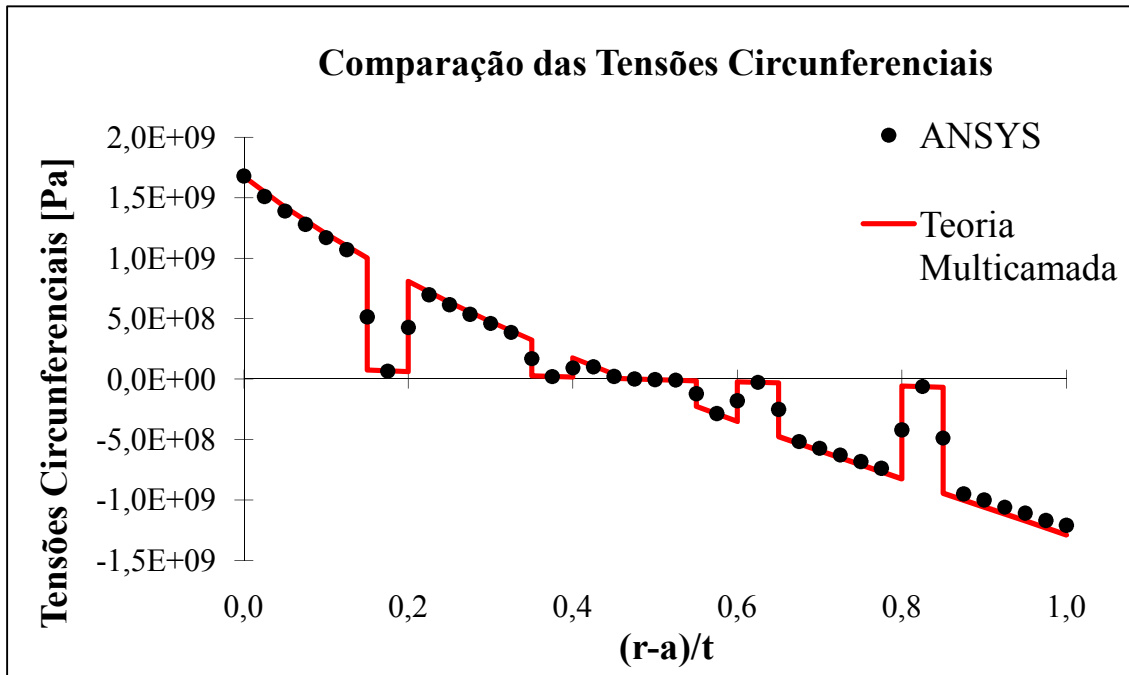


Figura 55 – Comparação das distribuição as tensões circunferenciais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS, para  $\theta = 65^\circ$ , para a *Layup I*, no estudo de Sun e Kelly (1988).

### 15.1.3 – Estudo da *Layup J*

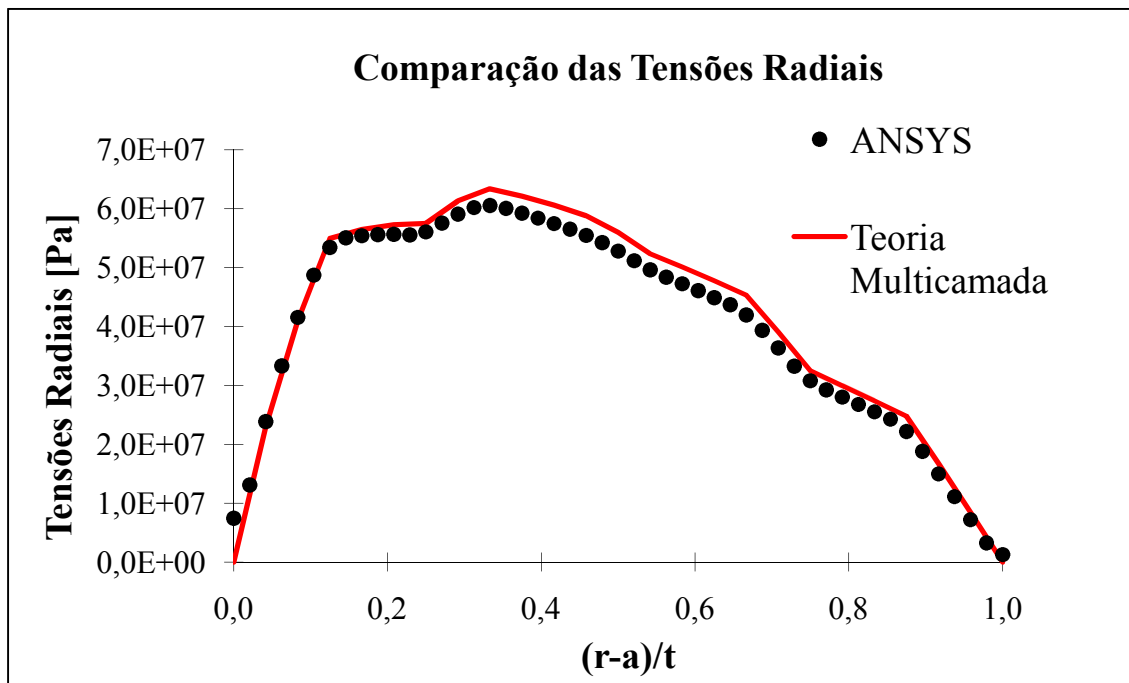


Figura 56 – Comparação das distribuição as tensões radiais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS para  $\theta = 65^\circ$ , para a *Layup J*, no estudo de Sun e Kelly (1988).

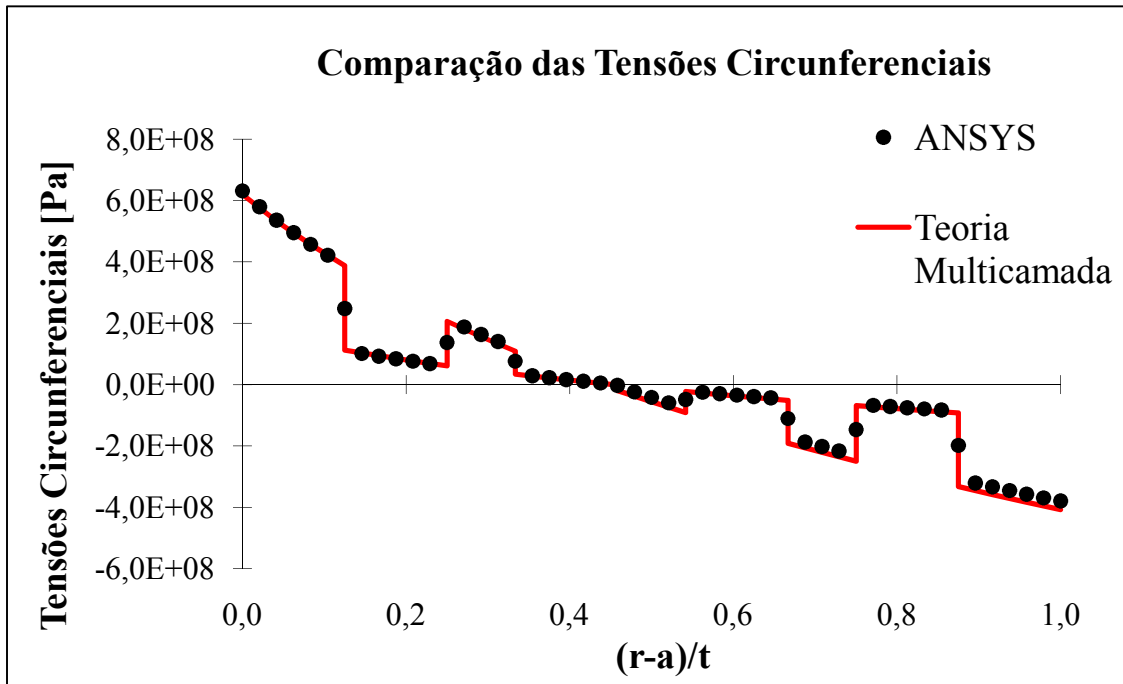


Figura 57 – Comparação das distribuição as tensões circunferenciais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS, para  $\theta = 65^\circ$ , para a *Layup J*, no estudo de Sun e Kelly (1988).

Como se pode observar nos gráficos anteriores, obtém-se excelente correlação de resultados entre os cálculos analíticos (*Multilayer Theory*) e os cálculos numéricos (ANSYS). No caso das tensões radiais, verifica-se que os cálculos numéricos são mais conservativos que os cálculos analíticos. Contudo, no caso das tensões circunferenciais, isso quase não se verifica. De notar que a *Multilayer Theory* foi desenvolvida para um provete curvo, em forma de C, tendo sido aplicada numa secção correspondente a um ângulo de  $90^\circ$ . Ao provete de Sun e Kelly (1988), em forma de L, foi também aplicada a *Multilayer Theory* a um ângulo  $\theta = 65^\circ$  (figura 58).

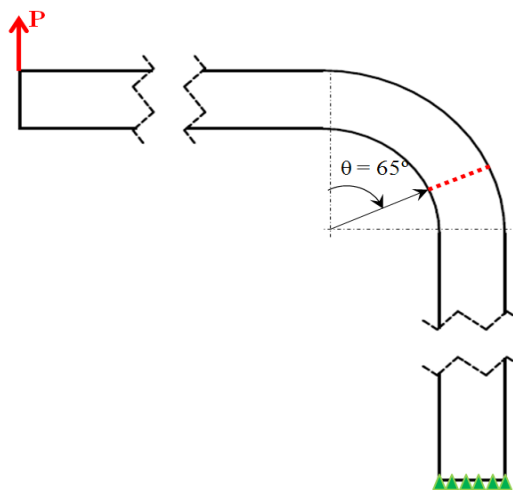


Figura 58 – Zona de aplicação da *Multilayer Theory* no provete de Sun e Kelly (1988).

**15.2 - Comparação do estudo numérico MEF 2D do artigo com o estudo numérico em ANSYS MEF 3D, para  $\theta = 65^\circ$  e a meio da largura**

De seguida apresentam-se comparações entre os valores do artigo de Sun e Kelly (1988), com os resultados MEF do ANSYS e resultados analíticos da *Multilayer Theory*. Essa comparação resulta de uma análise feita através de um erro relativo aos valores dados no artigo.

**15.2.1 – Estudo da *Layup* H**

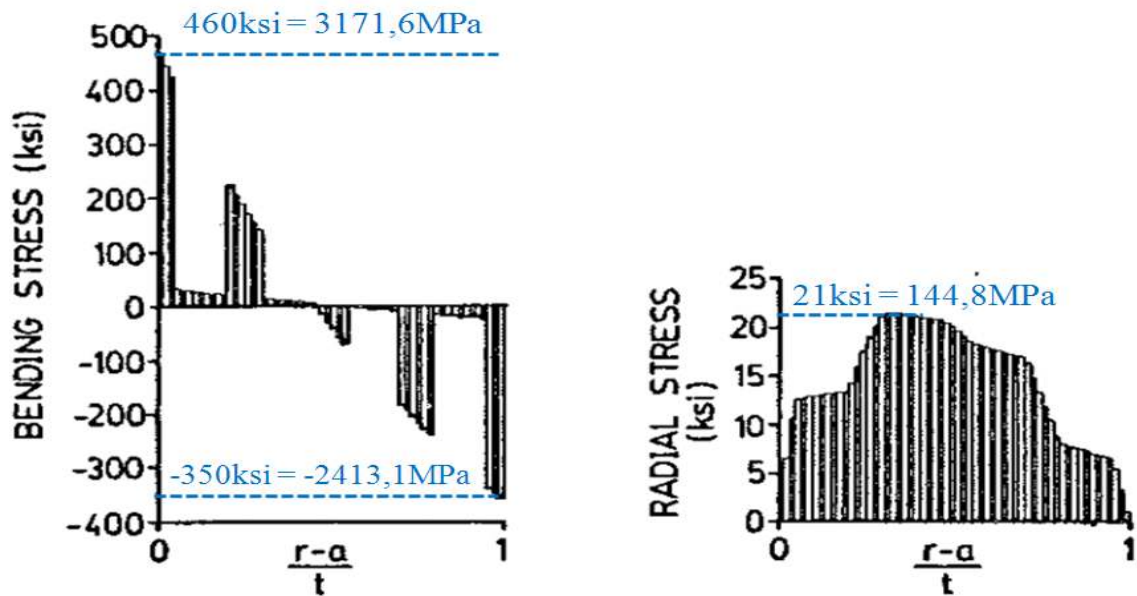
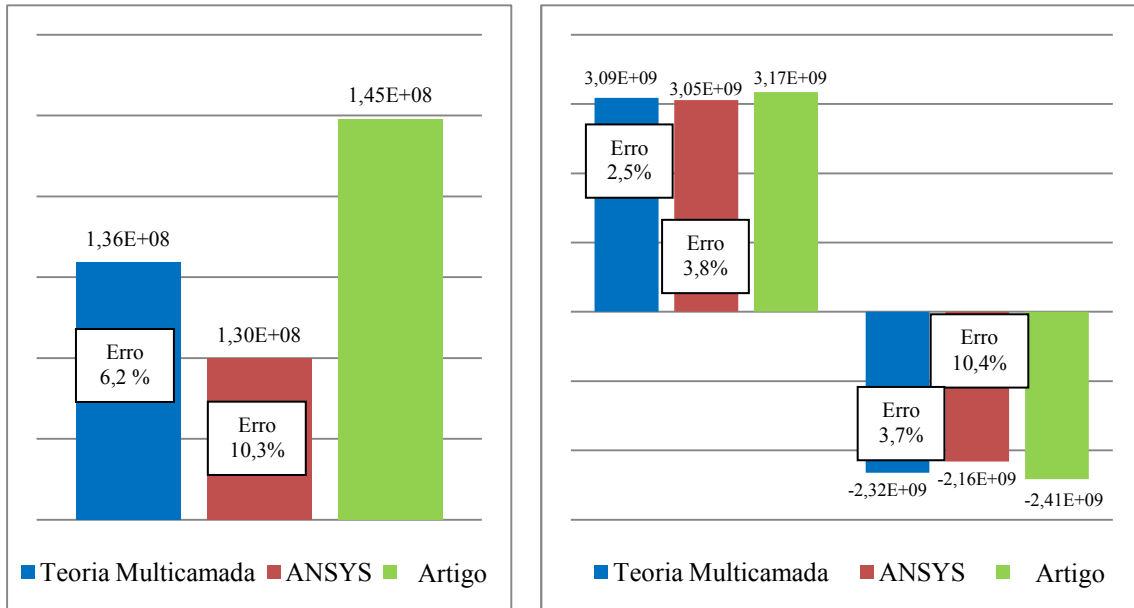


Figura 59 – Resultados das distribuições de tensões circunferenciais e radiais máximas para  $\theta = 65^\circ$ , retirados do artigo de Sun e Kelly (1988), para a *Layup* H.



a) Valores máximos das tensões radiais  
 b) Valores máximos e mínimos das tensões circunferenciais  
 Figura 60 – Comparação dos valores finais das tensões para a *Layup* H, para o estudo de Sun e Kelly (1988) – unidades em Pa.

15.2.2 – Estudo da *Layup* I

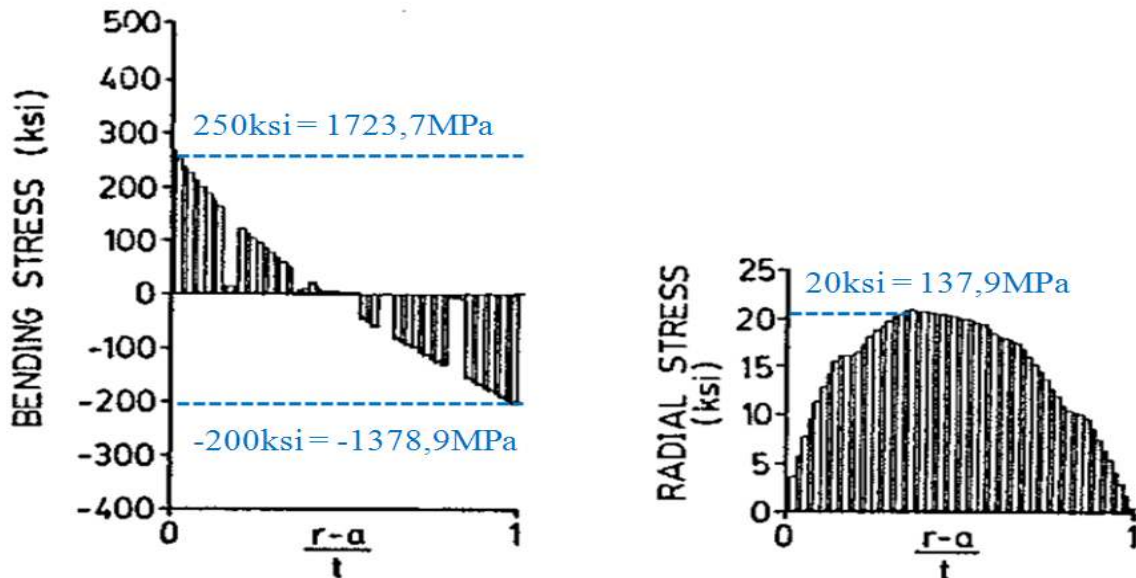


Figura 61 – Resultados das distribuições de tensões circunferenciais e radiais máximas para  $\theta = 65^\circ$ , retirados do artigo de Sun e Kelly (1988), para a *Layup* I.

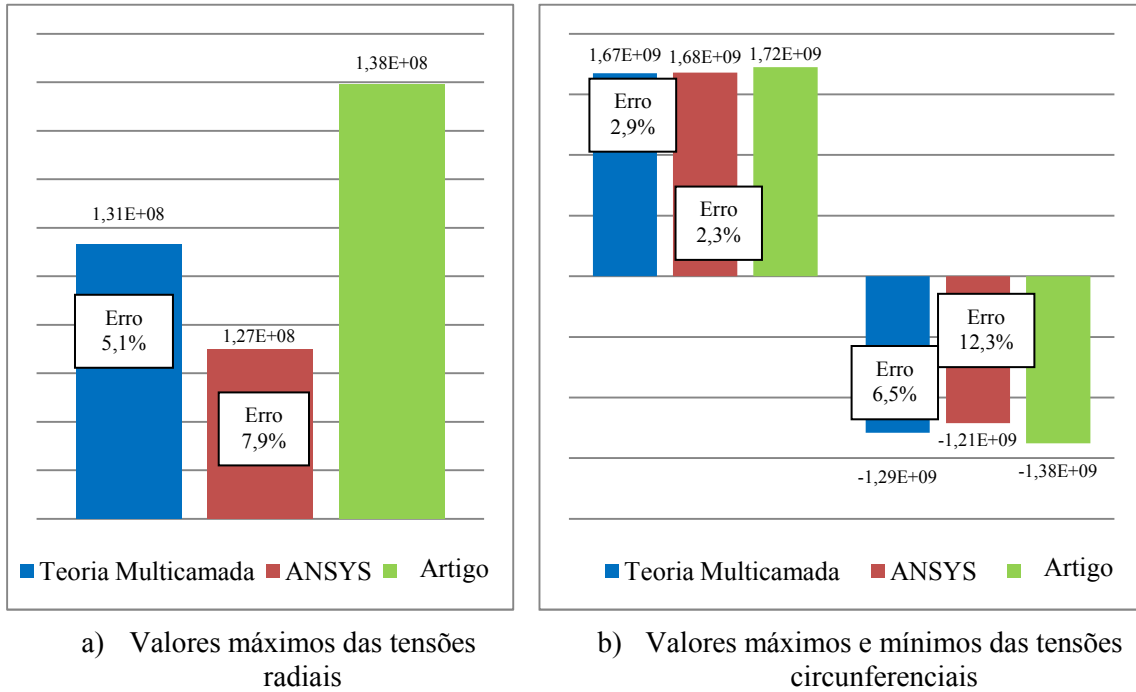


Figura 62 – Comparação dos valores finais das tensões para a *Layup I*, para o estudo de Sun e Kelly (1988) – unidades em Pa.

15.2.3 – Estudo da *Layup J*

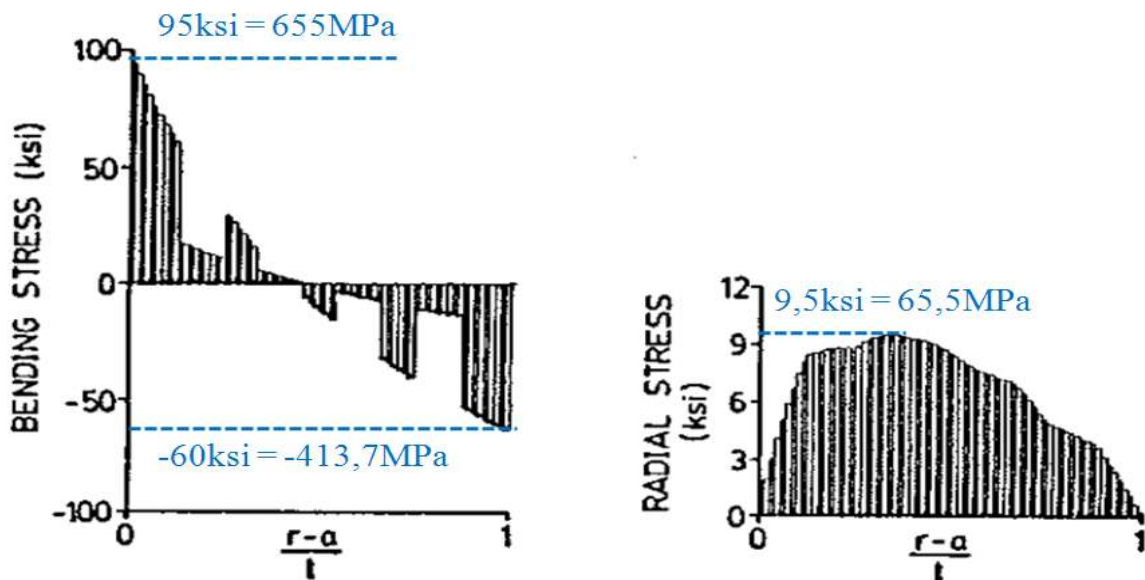


Figura 63 – Resultados das distribuições de tensões circunferenciais e radiais máximas para  $\theta = 65^\circ$ , retirados do artigo de Sun e Kelly (1988), para a *Layup J*.

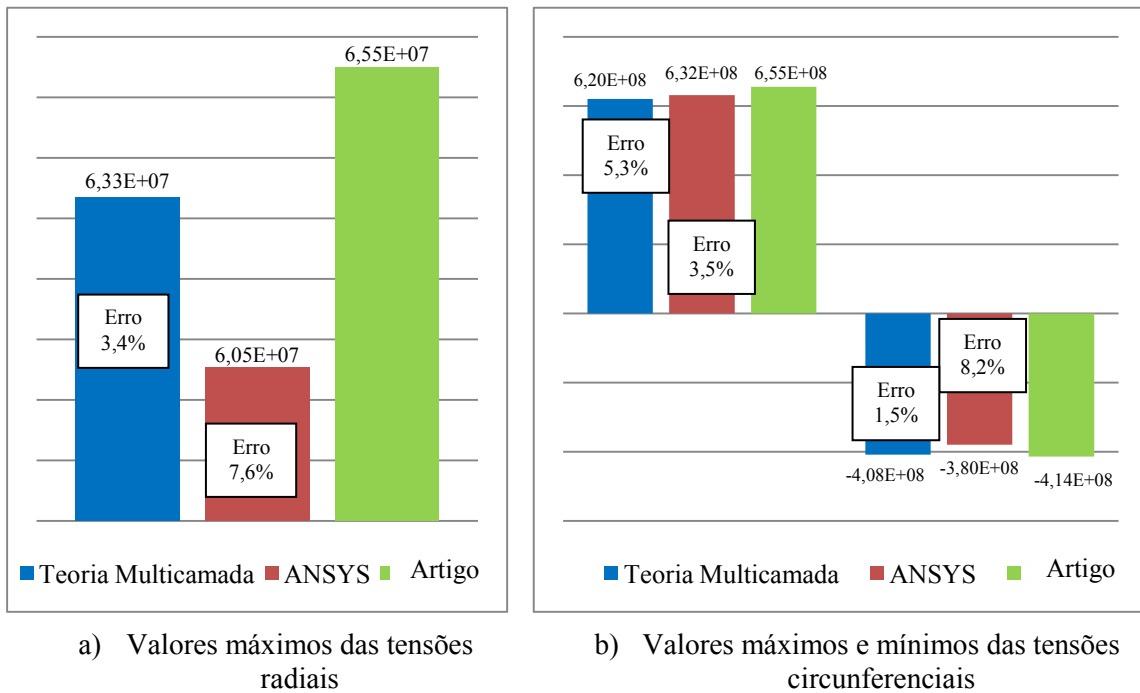


Figura 64 – Comparação dos valores finais das tensões para a *Layup J*, para o estudo de Sun e Kelly (1988) – unidades em Pa.

Foi, então, feita uma comparação dos resultados entre a *Multilayer Theory*, o ANSYS e o artigo para as tensões radiais e circunferenciais, para os três tipos de empilhamentos. Observou-se então que os erros relativos entre os resultados são baixos. De notar ainda que os dados que foram retirados do artigo de Sun e Kelly (1980), foram de difícil interpretação, como se pode observar nas figuras 51, 53 e 55. Os resultados finais do ANSYS para  $\theta = 65^\circ$ , para os provetes de Sun e Kelly (1989), estão no Anexo B para a *Layup H*, Anexo D para a *Layup I*, e Anexo F para a *Layup J*.

## 16 – Análise do artigo de Ko e Jackson (1989)

Seguidamente é feita uma comparação dos resultados analíticos (*Multilayer Theory*) com os resultados numéricos (ANSYS) para o provete estudado por Ko e Jackson (1989). Para as tensões radiais, os resultados relacionam-se de forma excelente (figura 65). Contudo, para as tensões circunferenciais, os resultados numéricos não se mostram muito coerentes na parte central. Não se verifica o corte entre as últimas camadas

(figura 66), talvez devido à simplificação tida ao juntar as quatro camadas de 15°, perdendo-se a simetria e tornando o laminado anti-simétrico.

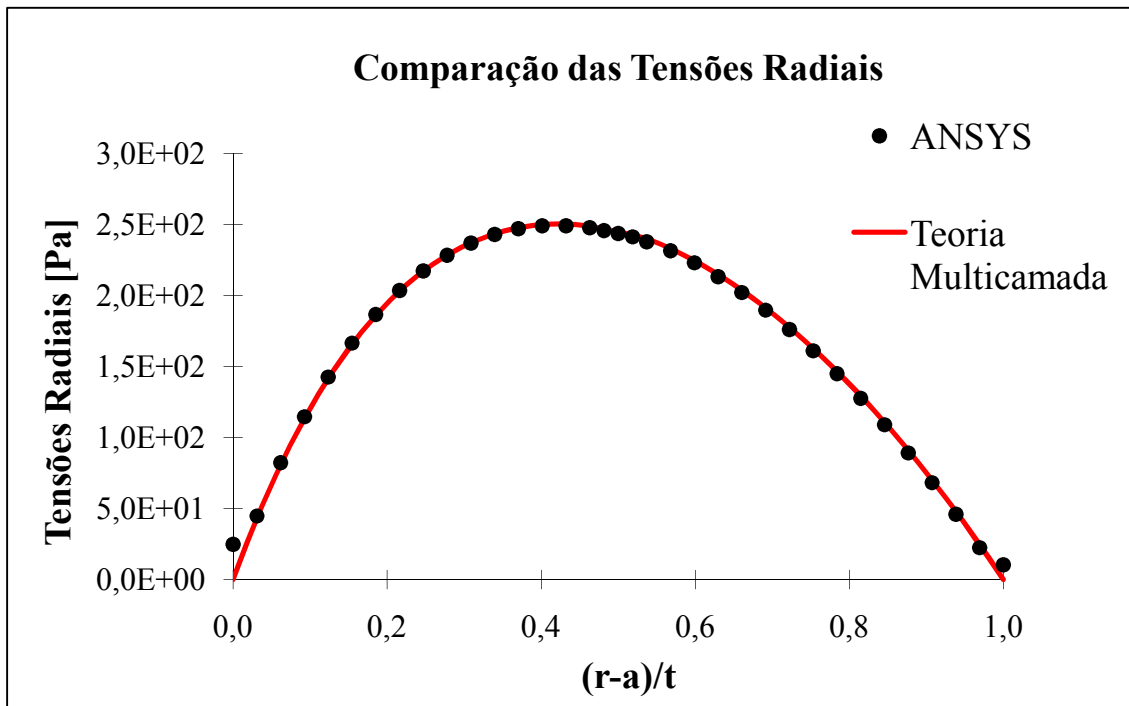


Figura 65 – Comparação das distribuição as tensões radiais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS no estudo de Ko e Jackson (1989).

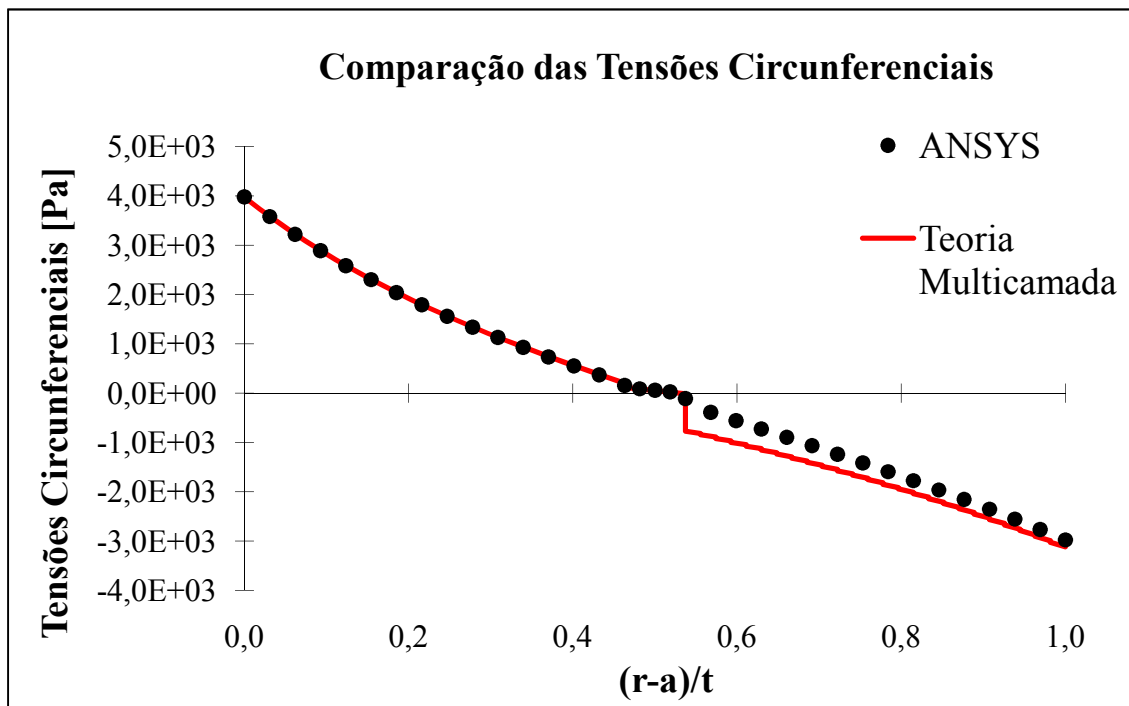


Figura 66 – Comparação das distribuição as tensões circunferenciais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS no estudo de Ko e Jackson (1989).

Ainda, no artigo de Ko e Jackson (1989) é feita uma comparação dos resultados obtidos para verificar, em cada um dos estudos, qual é o raio e a tensão de delaminação previstos. Para isto utilizaram-se as equações 22 a 26, e obtiveram-se os resultados indicados nas tabelas 13 a 14. Observa-se que os erros entre resultados são muito pequenos, validando assim os resultados.

Tabela 13 – Comparação das intensidades e localizações das tensões de delaminação no provete semicircular sujeito a carga de força nas extremidades.

Resultados	$\frac{h(b-a)}{P} \sigma_D$	$\frac{r_D - a}{b - a}$
<b>Multilayer Theory (artigo Ko e Jackson, 1989)</b>	2,0415	0,4212
<b>Multilayer Theory (neste trabalho)</b>	2,0373	0,4253
<b>erro (%)</b>	0,2045	0,9643
<b>SPAR (provete semicircular) - artigo Ko e Jackson (1989)</b>	2,0405	0,3935
<b>ANSYS (provete semicircular)</b>	2,0270	0,4320
<b>erro (%)</b>	0,6622	9,7875

Tabela 14 - Comparação das intensidades e localizações das tensões de delaminação da *Multilayer Theory* do artigo de Ko e Jackson (1989) e deste trabalho.

Resultados	$\frac{h(b-a)}{P} (\sigma_r)_{\max}$	$\frac{r_m - a}{b - a}$	$\frac{ha_m(b-a)}{M} (\sigma_r')_{\max}$	$\frac{r'_m - a}{b - a}$
<b>Multilayer Theory (artigo)</b>	1,4864	0,3907	1,4988	0,4327
<b>Multilayer Theory</b>	1,4808	0,4179	1,4991	0,4326
<b>erro (%)</b>	0,3771	6,9677	0,0200	0,0231
<b>Diferença [m]</b>		0,00022143 1		0,00000081 2
<b>Espessura da camada [m]</b>		0,0001506		0,00015060
<b>Nº de camadas em diferença</b>		1,47		0,01

Em que o número de camadas em diferença não é mais que a distância radial em número de camadas entre os resultados do artigo e os resultados deste trabalho, isto é, existe uma diferença de 1,47 camadas na comparação de resultados para o  $r_m$  e 0,01 camadas na comparação de resultados para o  $r'_m$ .

## 17 – Resultados do presente estudo

### 17.1 – Comparação dos resultados da Multilayer Theory com os resultados do estudo MEF 3D feito em ANSYS e a meio da largura

#### 17.1.1 – Estudo da *Layup* H

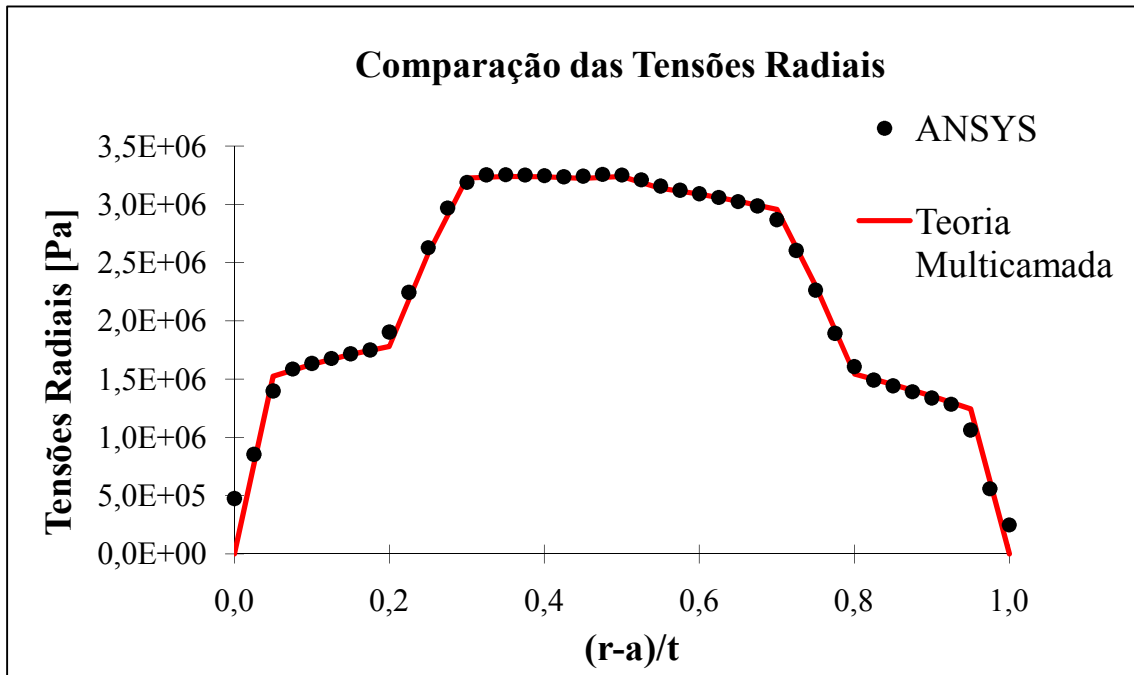


Figura 67 – Comparação das distribuição das tensões radiais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS para  $\theta = 90^\circ$ , para a *Layup* H, no novo estudo realizado.

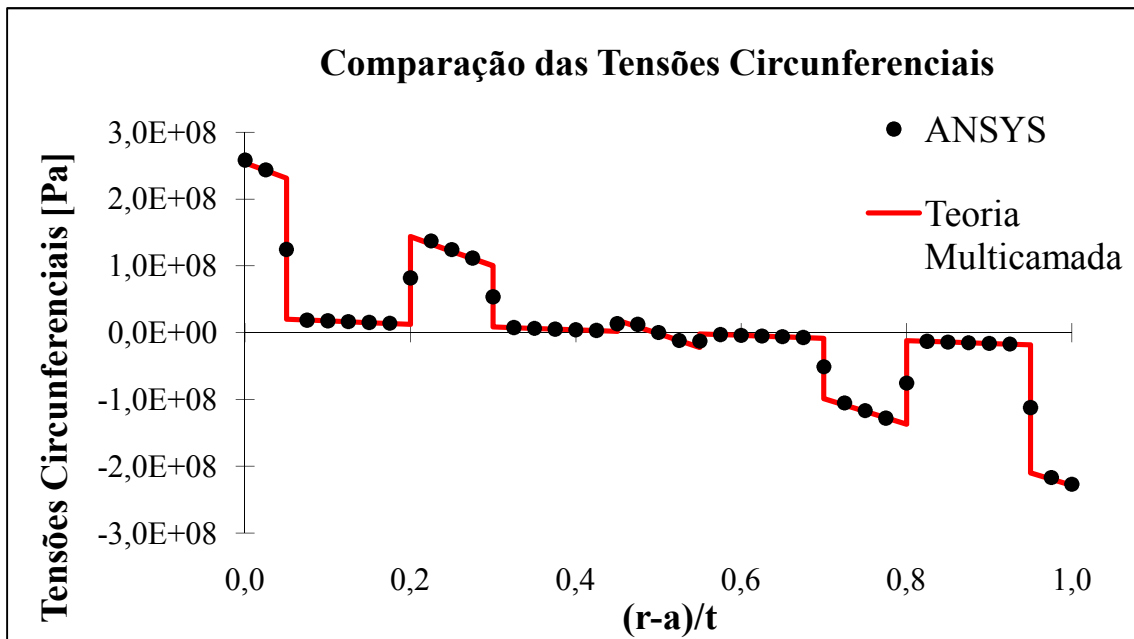


Figura 68 – Comparação das distribuição das tensões circunferenciais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS para  $\theta = 90^\circ$ , para a *Layup* H, no novo estudo realizado.

17.1.2 – Estudo da *Layup* I

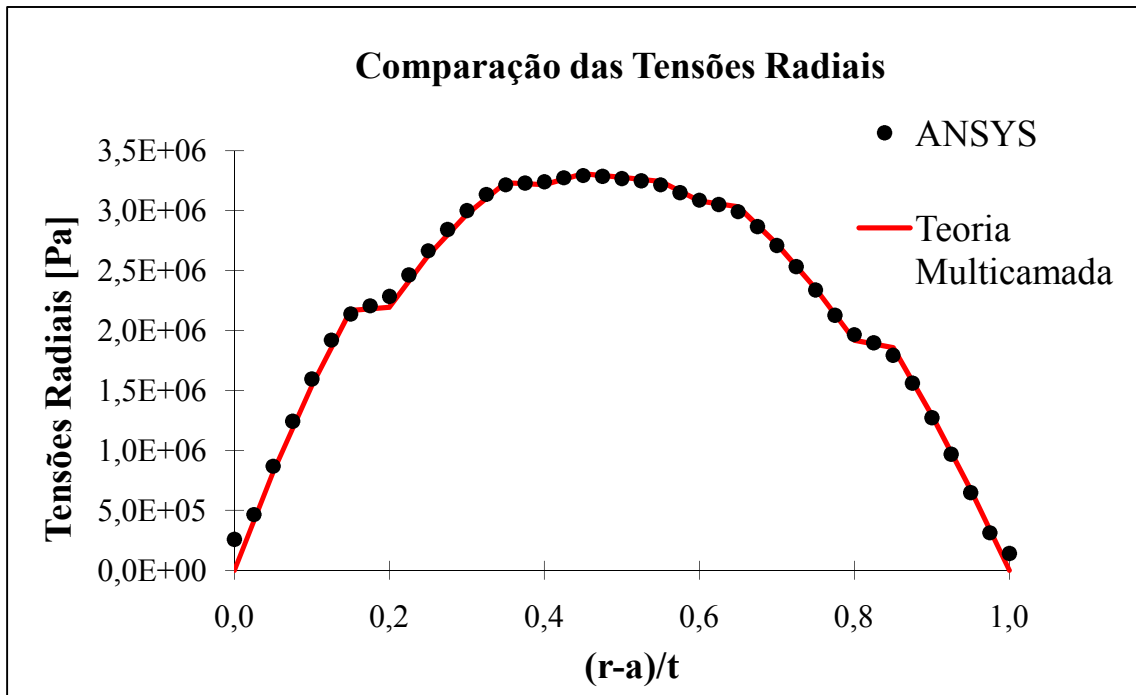


Figura 69 – Comparação das distribuição das tensões radiais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS para  $\theta = 90^\circ$ , para a *Layup* I, no novo estudo realizado.

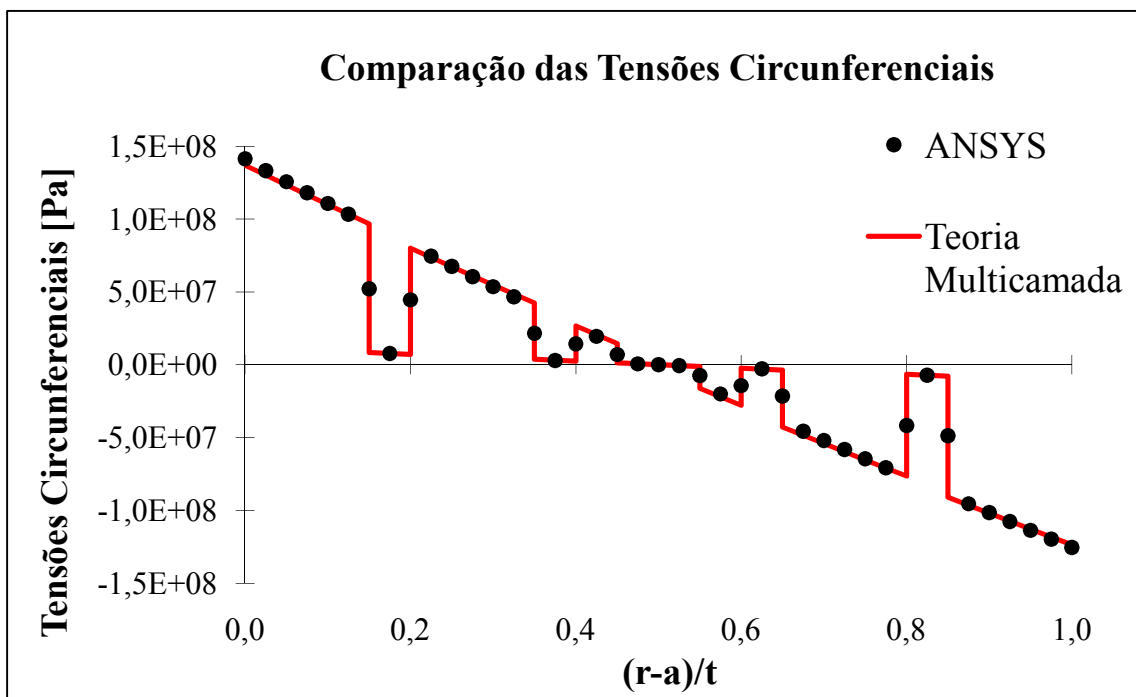


Figura 70 – Comparação das distribuição das tensões circunferenciais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS para  $\theta = 90^\circ$ , para a *Layup* I, no novo estudo realizado.

17.1.3 – Estudo da *Layup J*

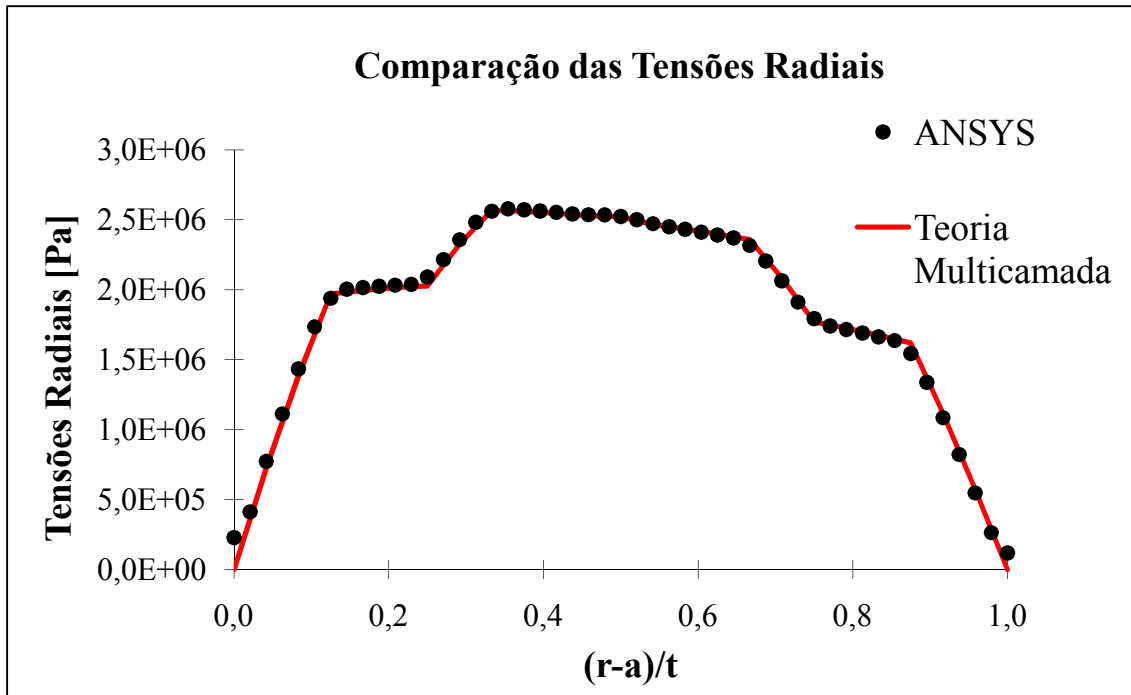


Figura 71 – Comparação das distribuição das tensões radiais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS para  $\theta = 90^\circ$ , para a *Layup J*, no novo estudo realizado.

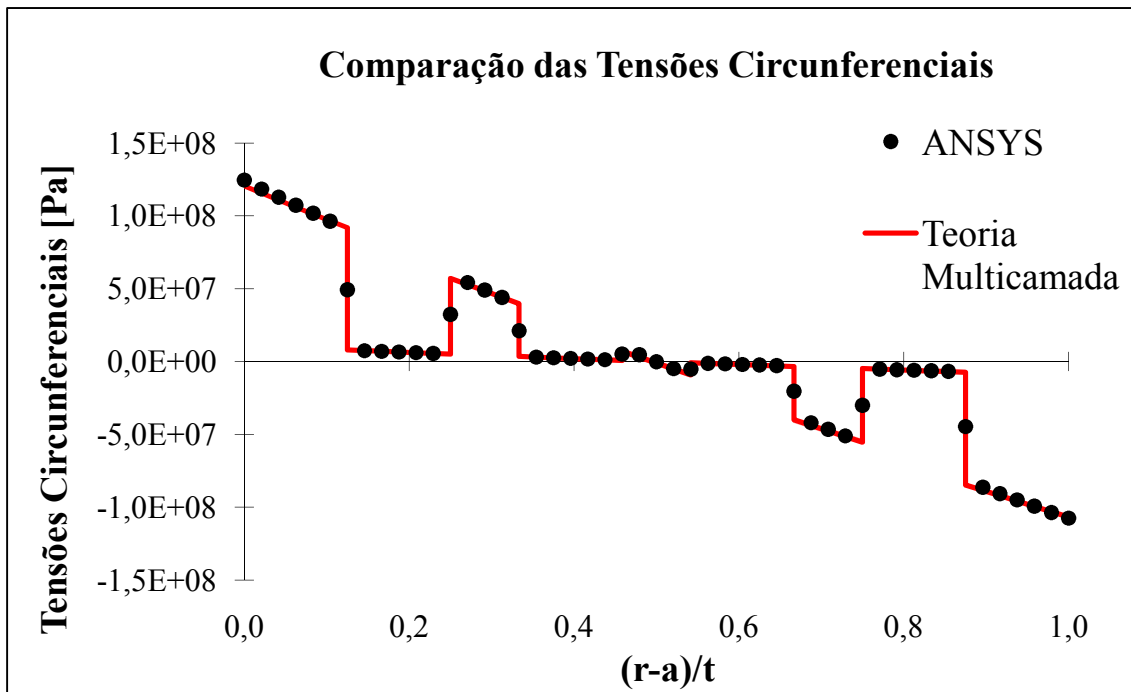


Figura 72 – Comparação das distribuição das tensões circunferenciais entre os resultados da *Multilayer Theory* e do ANSYS para  $\theta = 90^\circ$ , para a *Layup J*, no novo estudo realizado.

Mais uma vez, é conseguida uma excelente correlação entre resultados. É natural que isto aconteça porque ao validarem-se estudos anteriores através dos artigos originais, conseguiu-se interpretar bem as teorias envolvidas e tem-se mais facilidade em aplicá-las neste novo estudo.

### 17.2 – Previsão dos modos e cargas de rotura

Para os dois laminados projectados para falharem no plano da fibra (*Layup H* e *Layup J*), dever-se-á notar que a tensão circunferencial, nas camadas a  $0^\circ$  posicionadas mais perto da fibra neutra, tinha um valor mais elevado do que a tensão radial máxima. Assim o modo de falha previsto será rotura das lâminas a  $0^\circ$ , no plano das lâminas e não delaminagem. Inversamente, para o laminado projectado para sofrer delaminagem (*Layup I*), a tensão circunferencial nas camadas a  $0^\circ$  era sempre inferior à tensão radial máxima, logo estarão formadas as condições para ocorrer delaminagem.

As tabelas com as tensões obtidas no ANSYS, para  $\theta = 90^\circ$  e a meio da espessura, estão apresentadas no Anexo J para a *Layup H*, no Anexo M para a *Layup I*, e no Anexo P para a *Layup J*.

### 17.3 – Aplicação do Critério de Hashin 3D a toda a zona curva do provete

Ao fazer os estudos MEF 3D dos elementos curvos, ficou-se com a possibilidade de se poder aplicar critérios de rotura também 3D. O que se fez nos estudos numéricos em ANSYS foi retirar todas as tensões (seis no total – ver figura 21) e aplicar às equações de Hashin atrás estudadas (equações 28 a 32), e ainda determinar a carga crítica dos provetes (equação 33).

Tendo cada camada milhares de nós, e como são feitos os cálculos para cada nó de cada camada, o mais proveitoso foi recorrer novamente ao *Microsoft Office Excel*, visto também haver alguma facilidade (mas não muita) de exportação de dados do ANSYS para estas folhas de cálculo. Em Anexo são apresentados os valores máximos do critério de Hashin 3D verificados para a zona curva, em cada camada de cada provete. Recorde-se que os estudos foram feitos para uma carga de 100N (secção 14). O Anexo K apresenta os valores máximos do critério de Hashin 3D para a *Layup H*, o Anexo N para a *Layup I*, e o Anexo Q para a *Layup J*.

# Capítulo Seis – Conclusões e Sugestões para Posterior Investigação

## 18 – Conclusões

A *Multilayer Theory* mostrou ser, de facto, uma excelente ferramenta analítica para simular o comportamento mecânico de elementos curvos. De notar que, apesar de se considerar, na generalidade deste trabalho, que  $E_T = E_Z$ , a *Multilayer Theory* não permite esta aproximação particularmente para este estudo. Quando se têm orientações de camadas a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , a equação 20) chega a ficar nula quando passa para o sistema de coordenadas cilíndricas,  $E_\theta = E_r$ . Assim sendo, considerou-se, apenas para o cálculo da *Multilayer Theory* que,  $E_Z = 0.99 \times E_T$ . Esta foi uma conclusão muito difícil de chegar pois não existe em nenhum estudo anterior, referência a este problema. Assim, na *Multilayer Theory*, ao ser aplicada a laminados com empilhamentos com orientações perpendiculares, por exemplo,  $0^\circ$  e  $90^\circ$  ou  $-45^\circ$  e  $45^\circ$ , tem de se ter em conta uma não inversão da matriz dos coeficientes das incógnitas.

O estudo MEF 3D foi, de facto, uma mais-valia do cálculo numérico. Conseguiu-se uma excelente correlação de resultados com a *Multilayer Theory*, mesmo quando a análise foi feita apenas para uma linha de nós a meio de largura dos provetes.

Conseguiu-se reproduzir com uma boa concordância os resultados apresentados no trabalho de Sun e Kelly (1988), com recurso aos dois métodos atrás ditos. Tanto o ANSYS 3D, como a *Multilayer Theory* apresentaram uma boa correlação de resultados, denotando-se que o estudo numérico foi um pouco mais conservativo que o estudo analítico.

De notar ainda que os empilhamentos propostos por Sun e Kelly (1988) não possibilitam que os gráficos das tensões radiais sejam simétricos, isto porque, geralmente, a tensão máxima radial observa-se pouco antes da linha neutra teórica. Esta ocorrência pode dever-se ao facto do material ser ortotrópico, e também porque os elementos curvos apresentam um comportamento diferente face a solicitações conducentes à redução do raio de curvatura e a situações que provoquem o aumento do raio de curvatura.

Comparando os resultados analíticos e numéricos com os resultados dados no artigo de Sun e Kelly (1988), consegue-se obter uma legitimação dos resultados dos cálculos deste trabalho. Verificaram-se que os erros das tensões, relativos ao artigo, eram baixos – quase sempre inferiores a 10% – além disso, os autores fizeram um estudo MEF 2D, quando neste trabalho, o estudo foi em 3D.

Quanto ao trabalho de Ko e Jackson (1989), a comparação de resultados analíticos e numéricos foi boa para o caso das tensões radiais contudo, no caso das tensões circunferenciais a correlação não é tão boa, havendo discrepância de resultados a partir da segunda camada. Isto pode dever-se à aproximação sugerida por Ko e Jackson (1989), em que não se considerou que as 4 camadas do meio fossem distintas. Na realidade estas camadas têm orientações a  $+15^\circ/-15^\circ/-15^\circ/+15^\circ$ , e os autores consideraram uma camada central com orientações das lâminas a  $+15^\circ/-15^\circ/-15^\circ/+15^\circ$ .

Fazendo comparação dos resultados entre o estudo ANSYS 3D e o trabalho de Ko e Jackson (1989), obteve-se um erro relativo de 0,66% para a tensão de delaminação  $\sigma_D$ , e 9,8% para o raio de delaminação  $r_D$ . Em relação aos estudos da *Multilayer Theory* do artigo e deste trabalho, obteve-se um erro relativo de 0,2% para a tensão de delaminação  $\sigma_D$ , e 0,96% para o raio de delaminação  $r_D$ . O valor mais alto de erro (9,8%), pode ter origem dos diferentes modos de cálculo numérico, uma vez que Ko e Jackson (1989) fizeram um estudo MEF 2D enquanto neste trabalho o estudo foi em 3D.

Comparando, ainda, a localização radial de  $(\sigma_r)_{max}$  e de  $(\sigma'_r)_{max}$ , conclui-se haver uma diferença de 1,47 camadas para o  $r_m$  e, 0,01 camadas para o  $r'_m$ , entre os dados do artigo e os dados do estudo efectuado no presente trabalho.

Chegando ao provete cujo estudo é o principal tema deste trabalho, pretendia-se chegar à mesma previsão dos modos de rotura a que chegaram Sun e Kelly (1988), daí a razão de ser ter escolhido os mesmos empilhamentos, tendo sido essa previsão bem sucedida. Para a *Layup H*, na camada a  $0^\circ$  mais próxima da fibra neutra (camada 9), a tensão radial (3,24MPa) é inferior à tensão circunferencial (13,3MPa) – Anexo J. De igual modo, para a *Layup J*, na camada a  $0^\circ$  mais próxima da fibra neutra (camada 11), a tensão radial (2,54MPa) é inferior à tensão circunferencial (5,16MPa) – Anexo P. Prevê-se então a falha por rotura matricial ao longo da direcção circunferencial para

estes dois tipos de empilhamento. Porém, para a *Layup* I, na camada 10, que é a camada central do empilhamento e a  $0^\circ$ , a tensão radial (3,28MPa) é superior à tensão circunferencial (0,57MPa) – Anexo M. Assim sendo, o modo de falha neste último caso é por delaminação.

De notar que a *Layup* H falha na camada 9, a *Layup* I falha na camada 10 e, *Layup* J falha na camada 11.

Fazendo previsão dos modos de ruptura através do critério de Hashin 3D, observa-se que:

- Pelo Anexo K, a *Layup* H falha nas camadas 2, 4 e 7, falha matricial numa orientação a  $0^\circ$ . A carga crítica é de 38,2N.
- Pelo Anexo N, a *Layup* I falha na camada 4, falha matricial numa orientação a  $0^\circ$ . A carga crítica é de 89,1N
- Pelo Anexo Q, a *Layup* J também falha na camada 4, falha matricial numa orientação a  $0^\circ$ . A carga crítica é de 94,4N.

## 19 – Sugestões para posterior investigação

- Elaborar um algoritmo em linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language) em que se pretenda fazer o estudo de tensões e extensões 3D de um provete curvo em forma de C, dado como *inputs* as propriedades do material; a geometria do provete; o número de camadas; carga aplicada;
- Fazer o estudo dos efeitos de bordo verificados para os três tipos de empilhamento de Sun e Kelly (1988);
- Estudar os efeitos de tensões interlaminares de corte nos elementos curvos;
- Estudo da delaminação e sua progressão, para o provete curvo em forma de C, com base em métodos de mecânica de fractura, utilizando modelos MEF.
- Explorar de forma mais aprofundada o critério de Hashin e otimizar a leitura das tensões.
- Aplicar o critério de Puck e Zinoviev ao provete, fazendo uma comparação dos resultados com o critério de Hashin;
- Fabricar os provetes curvos em forma de C, com os mesmos empilhamentos aqui estudados. Ensaia-los à rotura e estudar os modos de falha experimentalmente;
- Medir porosidades nos provetes através de vários métodos;
- Fazer uma análise comparativa das características dos critérios do WWFE.

## Bibliografia

ANSYS Release 11.0 Documentation.

**ASTM D6415-99** – Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite (1999).

CHANG, Fu-Kuo; SPRINGER, George S. – The Strengths of Fiber Reinforced Composite Bends. **Journal of Composites Materials**. Vol. 20 (1986), p. 30-45.

**Element SOLID64 3-D Anisotropic Solid**. Consultado em 29 de Janeiro de 2009, em Instituto Politécnico de Lisboa, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa: [http://uic.edu/depts/accs/software/ansys/html/elem\\_55/chapter4/ES4-64.htm](http://uic.edu/depts/accs/software/ansys/html/elem_55/chapter4/ES4-64.htm).

GRASSI, Marcello; ZHANG, Xiang – Finite Element Analyses of Mode I Interlaminar Delamination in Z-Fiber Reinforced Composite Laminates. **Composites Science and Technology**. Vol. 63 (2003), p. 1815-1832.

HASHIN, Zvi – Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. **Journal of Applied Mechanics**. Vol. 47 (1980), p. 329-334.

HASHIN, Zvi; ROTEM, Arava – A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials. **Journal of Composite Materials**. Vol. 7 (1973), p. 448-464.

HINTON, M. J.; KADDOUR, A. S.; SODEN, P. D. – **Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise**. Elsevier, 2004. ISBN: 0-08-044475-X.

KIM, Heung Soo; CHATTOPADHYAY, Aditi; GHOSHAL, Anindya – Characterization of Delamination Effect on Composite Laminates Using a New Generalized Layerwise Approach. **Computers & Structures**. Vol. 81 (2003), p. 1555-1566.

KO, William L. – Delamination Stresses in Semicircular Laminated Composite Bars. **NASA Technical Memorandum**. Vol. 4026 (1988).

KO, William L.; JACKSON, Raymond H. – Multilayer Theory for Delamination Analysis of a Composite Curved Bar Subjected to End Forces and End Moments. **NASA Technical Memorandum**. Vol. 4139 (1989).

LEITE, Afonso Manuel da Costa de Sousa – **Flexão de Elementos Curvos em Materiais Compósitos**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008. 114p. Tese de Mestrado.

LIU, Hong-Yuan; YAN, Wenyi; YU, Xiao-Yan; MAI, Yiu-Wing – Experimental Study on Effect of Loading Rate on Mode I Delamination of Z-Pin Reinforced Laminates. **Composites Science and Technology**. Vol. 67 (2007), p. 1294-1301

MARTIN, Roderick H. – Delamination Failure in a Unidirectional Curved Composite Laminate. **NASA Contractor Report**. Vol. 182018 (1990).

MARTIN, Roderick H.; JACKSON, Wade C. – Damage Prediction in Cross-Plied Curved Composite Laminates. **Composites Materials: Fatigue and Fracture, Fourth Volume, ASTM STP 1156**, W. W. Stinchcomb and N. E. Ashbaugh, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1993), p. 105-126.

MATSUNAGA, Hiroyuki – Interlaminar Stress Analysis of Laminated Composite Beams According to Global Higher-Order Deformation Theories. **Composite Structures**. Vol. 55 (2002), p. 105-114.

MOURA, Marcelo F. S. F. de; MORAIS, Alfredo B. de; MAGALHÃES, António G. de – **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. Publindústria, 2005. ISBN: 972-8953-00-3

MOURITZ, A. P. – Review of Z-Pinned Composite Laminates. **Journal of Composites: Part A**. Vol. 38 (2007), p. 2383-2397.

NOSIER, A.; BAHRAMI, A. – Interlaminar Stress in Antisymmetric Angle-Ply Laminates. **Composite Structures**. Vol. 78 (2007), p. 18-33.

NOSIER, A.; MALEKI, M. – Free-Edge Stresses in General Composite Laminates. **International Journal of Mechanical Sciences**. Vol. 50 (2008), p. 1435-1447.

PARÍS, F. – A Study of Failure Criteria of Fibrous Composite Materials. **NASA Contractor Report**. Vol. 210661 (2001).

PARÍS, F.; CAÑAS, J., MARÍN, J. C. – **Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Compuestos**. Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, 2006.

PINHO, S. T.; DÁVILA, C. G.; CAMANHO, P. P.; IANNUCCI, L. – Failure Models and Criteria for FRP Under In-Plane or Three-Dimensional Stress States Including Shear Non-Linearity. **NASA Technical Memorandum**. Vol. 21350 (2005).

PLAGIANAKOS, Theofanis S.; SAVARANOS, Dimitris A. – Higher-Order Layerwise Laminate Theory for the Prediction of Interlaminar Shear Stresses in Thick Composite and Sandwich Composite Plates. **Composite Structures**. Vol. 87 (2009), p. 23-35.

REDDY, J. N. – **Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis**. CRC, 2<sup>nd</sup> Edition, 2003. ISBN: 0849315921.

SODEN, P. D.; HINTON, M. J.; KADDOUR, A. S. – A Comparison of the Predictive Capabilities of Current Failure Theories for Composite Laminates. **Composites Science and Technology**. Vol. 58 (1998), p. 1225-1254.

SODEN, P. D.; HINTON, M. J.; KADDOUR, A. S. – Lamina Properties, Lay-Up configurations and Loading Conditions for a Range of Fibre-Reinforced Composite Laminates. **Composites Science and Technology**. Vol. 58 (1998), p. 1011-1022.

SUN, C. T.; KELLY, S. R. – Failure in Composite Angle Structures. Part I: Initial Failure. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. Vol. 7 (1988), p. 220-232.

TRAVASSOS, João Manuel Candeias – **Produção de Materiais Compósitos de Elevado Desempenho Mecânico**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1994. 349fl. Tese de Doutoramento.

WIMMER, G.; SCHUECKER, C.; PETTERMANN, H. E. – Numerical Simulation of Delemination in Laminated Composite Components: A Combination of a Strength Criterion and Fracture Mechanics. **Journal of Composites: Part B**. Vol. 40 (2009), p. 158-165.



## Anexo A – Implementação da *Multilayer Theory* para o provete de Sun e Kelly (1988): *Layup H*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Contem os dados, as matrizes dos coeficientes das constantes arbitrárias, vectores de carga e vectores das constantes arbitrárias, para os dois casos de carga, forças e momentos, nos extremos do elemento curvo.

<b>Layup H</b>										
Empilhamento: [90/0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90] → N = 9										
<b>Geometria</b>			<b>Material: Hercules AS4/3501-6 graphite/epoxy prepreg</b>							
e [m]	=	6,91E-02	espessura da lâmina [m]		=	1,27E-04	número total de camadas		=	20
a [m]	=	4,57E-03	espessura total da lâmina [m]		=	2,54E-03				
h [m]	=	0,0254	<b>E<sub>L</sub> [Pa]</b>		=	1,38E+11	<b>v<sub>LT</sub></b>		=	0,300
			<b>E<sub>T</sub> [Pa]</b>		=	1,00E+10	<b>v<sub>TL</sub></b>		=	0,02175
			<b>E<sub>Z</sub> [Pa]</b>		=	1,00E+10	<b>G<sub>rθ</sub> [Pa]</b>		=	5,24E+09
			<b>90°</b>				<b>0°</b>			
			<b>E<sub>r</sub> [Pa]</b>		=	1,00E+10	<b>E<sub>r</sub> [Pa]</b>		=	1,00E+10
			<b>E<sub>θ</sub> [Pa]</b>		=	1,38E+11	<b>E<sub>θ</sub> [Pa]</b>		=	1,00E+10
			<b>v<sub>rθ</sub></b>		=	0,300	<b>v<sub>rθ</sub></b>		=	0,300
			<b>v<sub>θr</sub></b>		=	0,022	<b>v<sub>θr</sub></b>		=	0,022
			<b>G<sub>rθ</sub> [Pa]</b>		=	5,24E+09	<b>G<sub>rθ</sub> [Pa]</b>		=	5,24E+09
<b>Carga</b>										
P [N]	=	444,822162								
<b>Momento</b>										
M [N.m]	=	30,73187353								
<b>Camada (i)</b>										
0		0,00	<b>E<sub>r</sub></b>	<b>E<sub>θ</sub></b>	<b>v<sub>rθ</sub></b>	<b>v<sub>θr</sub></b>	<b>G<sub>rθ</sub></b>	<b>β<sub>i</sub></b>	<b>k (i)</b>	<b>Camada (i)</b>
1	90	0,004699	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	1
2	0 x 3	0,005080	1,00E+10	1,00E+10	0,300	0,022	5,24E+09	1,8	1,0	2
3	90 x 2	0,005334	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	3
4	0 x 3	0,005715	1,00E+10	1,00E+10	0,300	0,022	5,24E+09	1,8	1,0	4
5	90 x 2	0,005969	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	5
6	0 x 3	0,006350	1,00E+10	1,00E+10	0,300	0,022	5,24E+09	1,8	1,0	6
7	90 x 2	0,006604	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	7
8	0 x 3	0,006985	1,00E+10	1,00E+10	0,300	0,022	5,24E+09	1,8	1,0	8
9	90	0,007112	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	9

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

		A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] =	Equação (43), $\sigma_r^{(1)}$	2,24117E-13	-1,46501E+14	1	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(1)}$	2,62215E-13	-1,25215E+14	1	-0,000106022	31205,14171	-1
	Equação (44), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	0,000122175	-27079,52155	1
	Equação (44), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (45), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(1)}$	4,52803E-24	2201,765737	-5,35249E-10	-5,47201E-15	-1,74633E-06	5,24433E-10
	Equação (46), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	6,30568E-15	1,51545E-06	-5,16805E-10
	Equação (46), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(1)}$	1,27557E-23	4314,695933	7,09387E-12	-2,96561E-14	-2,62331E-06	-9,78245E-11
	Equação (47), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	3,41742E-14	2,27648E-06	9,78245E-11
	Equação (47), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (48), Sum i=1 a N=9	6,64886E-15	-3,71474E+12	0,027398974	8,88042E-06	-2268,181523	0,077961541

A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	B <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4,0989E-13	8,01028E+13	-1	0	0	0	0	0	0
5,42104E-13	-6,05665E+13	1	-0,000133513	24779,89942	-1	0	0	0
0	0	0	0,000151364	-21857,43044	1	-8,04958E-13	4,07889E+13	-1
0	0	0	0	0	0	1,03273E-12	-3,17927E+13	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7,07812E-24	-1408,516443	5,27464E-10	0	0	0	0	0	0
9,36125E-24	1064,992168	-5,22592E-10	-6,89086E-15	-1,38676E-06	5,12032E-10	0	0	0
0	0	0	7,81221E-15	1,22321E-06	-5,05282E-10	-1,39003E-23	-717,2259245	5,15703E-10
0	0	0	0	0	0	1,78336E-23	559,0391497	-5,11361E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,99395E-23	-2760,202899	-7,09387E-12	0	0	0	0	0	0
2,63712E-23	2087,014662	7,09387E-12	-3,73456E-14	-2,08316E-06	-9,78245E-11	0	0	0
0	0	0	4,2339E-14	1,83748E-06	9,78245E-11	-3,9158E-23	-1405,513642	-7,09387E-12
0	0	0	0	0	0	5,02382E-23	1095,522519	7,09387E-12
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,30739E-14	-3,40946E+12	0,048790164	9,81438E-06	-1606,713634	0,068992871	3,97506E-14	-1,57E+12	0,043485112

A <sub>6</sub>	B <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	B <sub>7</sub>	D <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	B <sub>8</sub>	D <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,000163823	20195,20873	-1	0	0	0	0	0	0
0,000183338	-18045,55758	1	-1,4722E-12	2,23023E+13	-1	0	0	0
0	0	0	1,84318E-12	-1,78134E+13	1	-0,000196895	16803,05228	-1
0	0	0	0	0	0	0,000218043	-15173,32284	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8,45521E-15	-1,13018E-06	5,01028E-10	0	0	0	0	0	0
9,46243E-15	1,00988E-06	-4,94974E-10	-2,54224E-23	-392,1604381	5,05182E-10	0	0	0
0	0	0	3,18286E-23	313,2290856	-5,01266E-10	-1,01621E-14	-9,40348E-07	4,91137E-10
0	0	0	0	0	0	1,12536E-14	8,49143E-07	-4,8565E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4,58238E-14	-1,69774E-06	-9,78245E-11	0	0	0	0	0	0
5,12825E-14	1,51703E-06	9,78245E-11	-7,16164E-23	-768,498219	-7,09387E-12	0	0	0
0	0	0	8,96632E-23	613,8201895	7,09387E-12	-5,50746E-14	-1,41258E-06	-9,78245E-11
0	0	0	0	0	0	6,099E-14	1,27557E-06	9,78245E-11
1,0729E-05	-1181,834208	0,061875404	6,47434E-14	-7,83389E+11	0,039220713	1,16267E-05	-895,9918916	0,056089467



(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]	
1	1	0,004572	-2,21189E-09	-8,70823E-08	6586877,889	259325901,1
		0,004699	165193,2124	6503669,779	5839447,011	229899488,6
2	2	0,004699	165193,2124	6503669,779	426788,3403	16802690,56
		0,004826	166794,7591	6566722,798	358299,9815	14106298,48
2	3	0,004826	166794,7591	6566722,798	358299,9815	14106298,48
		0,004953	166590,5284	6558682,222	293623,3666	11559975,06
4	4	0,004953	166590,5284	6558682,222	293623,3666	11559975,06
		0,005080	164847,9808	6490077,984	232369,5853	9148408,869
5	5	0,005080	164847,9808	6490077,984	3158508,437	124350725,9
		0,005207	226676,947	8924289,25	2648478,01	104270787,8
3	6	0,005207	226676,947	8924289,25	2648478,01	104270787,8
		0,005334	272993,3165	10747768,37	2207679,125	86916500,99
7	7	0,005334	272993,3165	10747768,37	165601,0282	6519725,521
		0,005461	263711,7711	10382353,19	119286,6041	4696322,996
4	8	0,005461	263711,7711	10382353,19	119286,6041	4696322,996
		0,005588	254037,3332	10001469,81	74901,55698	2948880,196
9	9	0,005588	254037,3332	10001469,81	74901,55698	2948880,196
		0,005715	244045,0726	9608073,723	32280,66112	1270892,17
10	10	0,005715	244045,0726	9608073,723	377245,97	14852203,54
		0,005842	237799,3815	9362180,372	21811,45679	858718,7714
5	11	0,005842	237799,3815	9362180,372	21811,45679	858718,7714
		0,005969	224603,2086	8842646,009	-321637,3911	-12662889,41
12	12	0,005969	224603,2086	8842646,009	-18792,07017	-739845,2825
		0,006096	214557,468	8447144,411	-56979,62885	-2243292,475
6	13	0,006096	214557,468	8447144,411	-56979,62885	-2243292,475
		0,006223	204362,3875	8045763,288	-93874,82744	-3695859,348
14	14	0,006223	204362,3875	8045763,288	-93874,82744	-3695859,348
		0,006350	194054,3966	7639936,874	-129575,0563	-5101380,169
15	15	0,006350	194054,3966	7639936,874	-1840834,712	-72473807,58
		0,006477	147729,1431	5816107,997	-2156294,691	-84893491,76
7	16	0,006477	147729,1431	5816107,997	-2156294,691	-84893491,76
		0,006604	97897,38312	3854227,682	-2487281,016	-97924449,44
17	17	0,006604	97897,38312	3854227,682	-178393,1507	-7023352,39
		0,006731	90562,25866	3565443,254	-214640,8772	-8450428,235
8	18	0,006731	90562,25866	3565443,254	-214640,8772	-8450428,235
		0,006858	82976,04989	3266773,618	-249792,119	-9834335,394
19	19	0,006858	82976,04989	3266773,618	-249792,119	-9834335,394
		0,006985	75175,89928	2959681,074	-283923,6487	-11178096,41
9	20	0,006985	75175,89928	2959681,074	-3936224,441	-154969466,2
		0,007112	-4,65661E-10	-1,83331E-08	-4262804,313	-167826941,5

		B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] =	Equação (49), $\sigma_r^{(1)}$	2	2,10693E-06	-2,90439E+11	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(1)}$	2	2,26955E-06	-2,55251E+11	-2	-1,999513981	2,26520805
	Equação (50), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	2	1,999521776	-1,938161082
	Equação (50), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (51), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(1)}$	9,38411E-13	2,85518E-19	0,032489897	-9,19449E-13	-9,19178E-13	-1,08763E-12
	Equação (52), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	9,93999E-13	9,9371E-13	1,00605E-12
	Equação (52), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(1)}$	-8,71743E-13	0	0	9,39894E-17	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	-1,0161E-16	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (54), Sum i=1 a N=9	1,17742E-06	4,7835E-12	595334,4177	3,7258E-06	3,72509E-06	3,8996E-06

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-2,80427E-06	1,76754E+11	0	0	0	0	0	0
2	3,20126E-06	-1,4044E+11	-2	-1,999526655	1,757964947	0	0	0
0	0	0	2	1,999533553	-1,531377515	-2	-3,86039E-06	1,0145E+11
0	0	0	0	0	0	2	4,3439E-06	-82648321566
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,0145E-12	-3,81392E-19	-0,024322586	0	0	0	0	0	0
1,06522E-12	4,57154E-19	0,020291754	-1,0437E-12	-1,0434E-12	-9,58145E-13	0	0	0
0	0	0	1,11825E-12	1,11793E-12	8,94266E-13	-1,14131E-12	-5,90657E-19	-0,015705289
0	0	0	0	0	0	1,19204E-12	6,94176E-19	0,013363244
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,42425E-13	0	0	0	0	0	0	0	0
-9,89546E-13	0	0	1,06691E-16	0	0	0	0	0
0	0	0	-1,14311E-16	0	0	1,06023E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	-1,10735E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,64516E-06	1,47428E-11	774105,3016	4,20967E-06	4,20889E-06	3,45097E-06	2,96774E-06	2,25984E-11	504728,6179

B <sub>6</sub>	C <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	B <sub>7</sub>	C <sub>7</sub>	D <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>	C <sub>8</sub>	D <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-1,999537901	1,40381744	0	0	0	0	0	0
2	1,999544087	-1,240409252	-2	-5,1381E-06	61740122093	0	0	0
0	0	0	2	5,71512E-06	-51318962162	-2	-1,999548009	1,146825831
0	0	0	0	0	0	2	1,999553617	-1,025126728
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,16795E-12	-1,16762E-12	-8,5621E-13	0	0	0	0	0	0
1,2425E-12	1,24215E-12	8,04835E-13	-1,26812E-12	-8,73502E-19	-0,010619828	0	0	0
0	0	0	1,31885E-12	1,01046E-18	0,009180392	-1,2922E-12	-1,29184E-12	-7,73878E-13
0	0	0	0	0	0	1,36675E-12	1,36637E-12	7,31664E-13
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,19392E-16	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,27013E-16	0	0	1,17803E-12	0	0	0	0	0
0	0	0	-1,22515E-12	0	0	1,32093E-16	0	0
0	0	0	0	0	0	-1,39714E-16	0	0
4,69354E-06	4,6927E-06	3,09494E-06	3,29032E-06	3,31461E-11	343975,7006	5,17741E-06	5,17651E-06	2,80552E-06

B <sub>9</sub>	C <sub>9</sub>	D <sub>9</sub>	[M] =	[B'C'D'] =		
0	0	0	0	12175116,35	B' <sub>1</sub>	
0	0	0	0	-2,74545E+12	C' <sub>1</sub>	
0	0	0	0	6,3923E-05	D' <sub>1</sub>	
0	0	0	0	1,12923E+11	B' <sub>2</sub>	
0	0	0	0	-1,12946E+11	C' <sub>2</sub>	
0	0	0	0	3091913,402	D' <sub>2</sub>	
0	0	0	0	12175116,06	B' <sub>3</sub>	
0	0	0	0	-3,45282E+12	C' <sub>3</sub>	
0	0	0	0	7,20428E-05	D' <sub>3</sub>	
-2	-6,6547E-06	39396336180	0	1,12923E+11	B' <sub>4</sub>	
2	6,98818E-06	-36188429825	0	-1,12946E+11	C' <sub>4</sub>	
0	0	0	0	2756395,333	D' <sub>4</sub>	
0	0	0	0	12175116,06	B' <sub>5</sub>	
0	0	0	0	-3,55693E+12	C' <sub>5</sub>	
0	0	0	0	7,48589E-05	D' <sub>5</sub>	
0	0	0	0	1,12923E+11	B' <sub>6</sub>	
0	0	0	0	-1,12946E+11	C' <sub>6</sub>	
0	0	0	0	2815904,916	D' <sub>6</sub>	
0	0	0	0	12175116,06	B' <sub>7</sub>	
-1,39494E-12	-1,24447E-18	-0,007454157	0	-3,44741E+12	C' <sub>7</sub>	
0	0	0	0	6,74349E-05	D' <sub>7</sub>	
0	0	0	0	1,12923E+11	B' <sub>8</sub>	
0	0	0	0	-1,12946E+11	C' <sub>8</sub>	
0	0	0	0	3279204,138	D' <sub>8</sub>	
0	0	0	0	12175116,06	B' <sub>9</sub>	
0	0	0	0	-3,26503E+12	C' <sub>9</sub>	
0	0	0	0	4,23787E-05	D' <sub>9</sub>	
1,29583E-12	0	0	-30,73187353			
1,79032E-06	2,26755E-11	125526,906				

(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]
1	1	0,004572	0	71815818,32	2827394422
		0,004699	1802907,486	70980609,69	61804253,26
2	2	0,004699	1802907,486	70980609,69	4518195,553
		0,004826	1865531,373	73446117,05	3853224,112
	3	0,004826	1865531,373	73446117,05	3853224,112
		0,004953	1908354,783	75132078,06	3223700,459
	4	0,004953	1908354,783	75132078,06	3223700,459
		0,005080	1933709,095	76130279,32	2626500,768
3	5	0,005080	1933709,095	76130279,32	35681400,58
		0,005207	2661792,752	104794990,2	27993452,89
	6	0,005207	2661792,752	104794990,2	27993452,89
4	7	0,005334	3179165,774	125164006,8	20875278,63
		0,005334	3179165,774	125164006,8	1577945,317
	8	0,005461	3136205,119	123472642,5	1089432,925
		0,005461	3136205,119	123472642,5	1089432,925
	9	0,005588	3084337,911	121430626,4	622045,8361
		0,005588	3084337,911	121430626,4	622045,8361
5	10	0,005715	3024609,34	119079107,9	174189,6147
		0,005715	3024609,34	119079107,9	1560492,03
	11	0,005842	2928128,56	115280652	-4349093,437
		0,005842	2928128,56	115280652	-4349093,437
6	12	0,005969	2712289,255	106783041,5	-10053329,32
		0,005969	2712289,255	106783041,5	-674303,7057
	13	0,006096	2637533,985	103839920,7	-1075073,593
		0,006096	2637533,985	103839920,7	-1075073,593
	14	0,006223	2557803,541	100700926,8	-1461063,12
		0,006223	2557803,541	100700926,8	-1461063,12
7	15	0,006350	2473682,081	97389058,31	-1833252,667
		0,006350	2473682,081	97389058,31	-25968844,21
	16	0,006477	1866818,896	73496806,94	-30978394,82
		0,006477	1866818,896	73496806,94	-30978394,82
8	17	0,006604	1187203,96	46740313,4	-35965973,62
		0,006604	1187203,96	46740313,4	-2584165,332
	18	0,006731	1112671,274	43805955,66	-2939869,714
		0,006731	1112671,274	43805955,66	-2939869,714
9	19	0,006858	1034421,952	40725273,69	-3283815,317
		0,006858	1034421,952	40725273,69	-3283815,317
	20	0,006985	952866,014	37514410	-3616707,317
	0,006985	952866,014	37514410	-50139524,2	
	0,007112	0	0	-54687883,81	-2153066292

(i)	Raio r	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$ [Pa]	(r-a)/t	
1	1	0,004572	-8,7082E-08	3086720323	0
	1	0,004699	77484279,47	2663137806	0,05
2	2	0,004699	77484279,47	194684405	0,05
	2	0,004826	80012839,85	165808035	0,1
3	3	0,004826	80012839,85	165808035	0,1
	3	0,004953	81690760,28	138477316	0,15
4	4	0,004953	81690760,28	138477316	0,15
	4	0,005080	82620357,3	112553951	0,2
5	5	0,005080	82620357,3	1529130276	0,2
	5	0,005207	113719279,5	1206375232	0,25
6	6	0,005207	113719279,5	1206375232	0,25
	6	0,005334	135911775,2	908777864	0,3
7	7	0,005334	135911775,2	68643556,9	0,3
	7	0,005461	133854995,7	47587383	0,35
8	8	0,005461	133854995,7	47587383	0,35
	8	0,005588	131432096,2	27438873,7	0,4
9	9	0,005588	131432096,2	27438873,7	0,4
	9	0,005715	128687181,6	8128751,02	0,45
10	10	0,005715	128687181,6	76288897,6	0,45
	10	0,005842	124642832,3	-170365432	0,5
11	11	0,005842	124642832,3	-170365432	0,5
	11	0,005969	115625687,5	-408463256	0,55
12	12	0,005969	115625687,5	-27287235	0,55
	12	0,006096	112287065,1	-44569024	0,6
13	13	0,006096	112287065,1	-44569024	0,6
	13	0,006223	108746690,1	-61218029	0,65
14	14	0,006223	108746690,1	-61218029	0,65
	14	0,006350	105028995,2	-77276682	0,7
15	15	0,006350	105028995,2	-1,095E+09	0,7
	15	0,006477	79312914,94	-1,305E+09	0,75
16	16	0,006477	79312914,94	-1,305E+09	0,75
	16	0,006604	50594541,08	-1,514E+09	0,8
17	17	0,006604	50594541,08	-108762145	0,8
	17	0,006731	47371398,91	-124193330	0,85
18	18	0,006731	47371398,91	-124193330	0,85
	18	0,006858	43992047,31	-139118403	0,9
19	19	0,006858	43992047,31	-139118403	0,9
	19	0,006985	40474091,07	-153568148	0,95
20	20	0,006985	40474091,07	-2,129E+09	0,95
	20	0,007112	-1,8333E-08	-2,321E+09	1

Anexo B – Tensões a  $\theta = 65^\circ$  e a meio da espessura, retiradas do cálculo numérico em ANSYS 3D, para o provete de Sun e Kelly (1988): *Layup H*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Camada	NÓDULO	Cordenadas Cilíndricas			Tensões [Pa] ANSYS						(r-a)/t		
		X	Y	Z	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ			
		[m]	[graus]	[m]	Sr	Sθ	SZ	Srθ	SθZ	Srz			
1	135894	4,57E-03	65	1,27E-02	2,60E+07	3,05E+09	5,69E+07	156820	1,62E+00	0	0	2,28E-02	0,00
	136119	4,64E-03	65	1,27E-02	4,42E+07	2,78E+09	5,46E+07	274830	1,36E+00	0	0	9,14E-02	0,03
	135269	4,70E-03	65	1,27E-02	6,93E+07	1,36E+09	6,44E+07	436100	1,33E+00	0	0	1,47E-01	0,05
2	135269	4,70E-03	65	1,27E-02	6,93E+07	1,36E+09	6,44E+07	436100	1,33E+00	0	0	1,47E-01	0,05
	145299	4,76E-03	65	1,27E-02	7,66E+07	1,74E+08	7,26E+07	477790	1,24E+00	0	0	9,96E-02	0,08
	144874	4,83E-03	65	1,27E-02	7,75E+07	1,60E+08	7,08E+07	474390	1,16E+00	0	0	9,47E-02	0,10
3	144874	4,83E-03	65	1,27E-02	7,75E+07	1,60E+08	7,08E+07	474390	1,16E+00	0	0	9,47E-02	0,10
	146217	4,89E-03	65	1,27E-02	7,83E+07	1,47E+08	6,86E+07	470050	1,09E+00	0	0	9,60E-02	0,13
	145792	4,95E-03	65	1,27E-02	7,89E+07	1,34E+08	6,62E+07	464980	1,01E+00	0	0	8,56E-02	0,15
4	145792	4,95E-03	65	1,27E-02	7,89E+07	1,34E+08	6,62E+07	464980	1,01E+00	0	0	8,56E-02	0,15
	146676	5,02E-03	65	1,27E-02	7,93E+07	1,21E+08	6,34E+07	459360	0	9,38E-01	6,90E-02	0,18	
	137071	5,08E-03	65	1,27E-02	8,49E+07	8,13E+08	4,84E+07	489040	0	8,86E-01	1,04E-01	0,20	
5	137071	5,08E-03	65	1,27E-02	8,49E+07	8,13E+08	4,84E+07	489040	0	8,86E-01	1,04E-01	0,20	
	137496	5,14E-03	65	1,27E-02	9,77E+07	1,33E+09	3,42E+07	565410	0	7,52E-01	7,25E-02	0,23	
	136646	5,21E-03	65	1,27E-02	1,11E+08	1,18E+09	3,36E+07	646720	0	7,27E-01	-3,34E-02	0,25	
6	136646	5,21E-03	65	1,27E-02	1,11E+08	1,18E+09	3,36E+07	646720	0	7,27E-01	-3,34E-02	0,25	
	138414	5,27E-03	65	1,27E-02	1,23E+08	1,03E+09	3,28E+07	710340	0	6,25E-01	-4,30E-02	0,28	
	137989	5,33E-03	65	1,27E-02	1,29E+08	4,72E+08	1,10E+08	741050	0	5,51E-01	-5,28E-03	0,30	
7	137989	5,33E-03	65	1,27E-02	1,29E+08	4,72E+08	1,10E+08	741050	0	5,51E-01	-5,28E-03	0,30	
	147594	5,40E-03	65	1,27E-02	1,30E+08	5,78E+07	1,84E+08	735680	0	4,89E-01	3,70E-02	0,33	
	147169	5,46E-03	65	1,27E-02	1,29E+08	4,76E+07	1,78E+08	717000	0	4,07E-01	-1,53E-02	0,35	
8	147169	5,46E-03	65	1,27E-02	1,29E+08	4,76E+07	1,78E+08	717000	0	4,07E-01	-1,53E-02	0,35	
	148512	5,52E-03	65	1,27E-02	1,28E+08	3,77E+07	1,72E+08	698270	0	3,69E-01	1,51E-01	0,38	
	148087	5,59E-03	65	1,27E-02	1,26E+08	2,80E+07	1,65E+08	679510	0	2,34E-01	9,32E-02	0,40	
9	148087	5,59E-03	65	1,27E-02	1,26E+08	2,80E+07	1,65E+08	679510	0	2,34E-01	9,32E-02	0,40	

	7	03		02	8			0			
	14897	5,65E-		1,27E-	1,25E+0			660810		-1,34E-	0,43
	1	03	65	02	8	1,85E+07	1,59E+08	0	2,01E-01	01	
	13936	5,72E-		1,27E-	1,23E+0			643280		-7,32E-	0,45
	6	03	65	02	8	4,45E+07	8,32E+07	0	1,41E-01	02	
	13936	5,72E-		1,27E-	1,23E+0			643280		-7,32E-	0,45
10	6	03	65	02	8	4,45E+07	8,32E+07	0	1,41E-01	02	
	13979	5,78E-		1,27E-	1,22E+0	-		625040		-1,40E-	0,48
	1	03	65	02	8	3,95E+07	9,64E+06	0	9,79E-02	01	
	13894	5,84E-		1,27E-	1,19E+0	-		603320		-1,83E-	0,50
	1	03	65	02	8	1,57E+08	6,56E+06	0	6,32E-02	01	
	13894	5,84E-		1,27E-	1,19E+0	-		603320		-1,83E-	0,50
11	1	03	65	02	8	1,57E+08	6,56E+06	0	6,32E-02	01	
	14070	5,91E-		1,27E-	1,15E+0	-		576870	-1,64E-	-2,33E-	0,53
	9	03	65	02	8	2,74E+08	3289400	0	02	01	
	14028	5,97E-		1,27E-	1,11E+0	-		553300	-5,32E-	-2,14E-	0,55
	4	03	65	02	8	2,03E+08	5,25E+07	0	02	01	
	14028	5,97E-		1,27E-	1,11E+0	-		553300	-5,32E-	-2,14E-	0,55
12	4	03	65	02	8	2,03E+08	5,25E+07	0	02	01	
	14988	6,03E-		1,27E-	1,09E+0	-		534310	-1,07E-	-9,00E-	0,58
	9	03	65	02	8	3,40E+07	9,98E+07	0	01	02	
	14946	6,10E-		1,27E-	1,07E+0	-		516620	-1,64E-	-3,82E-	0,60
	4	03	65	02	8	4,23E+07	9,27E+07	0	01	02	
	14946	6,10E-		1,27E-	1,07E+0	-		516620	-1,64E-	-3,82E-	0,60
13	4	03	65	02	8	4,23E+07	9,27E+07	0	01	02	
	15080	6,16E-		1,27E-	1,06E+0	-		499340	-2,26E-	-6,54E-	0,63
	7	03	65	02	8	5,04E+07	8,56E+07	0	01	02	
	15038	6,22E-		1,27E-	1,04E+0	-		482390	-2,84E-	-9,81E-	0,65
	2	03	65	02	8	5,84E+07	7,83E+07	0	01	02	
	15038	6,22E-		1,27E-	1,04E+0	-		482390	-2,84E-	-9,81E-	0,65
14	2	03	65	02	8	5,84E+07	7,83E+07	0	01	02	
	15126	6,29E-		1,27E-	1,02E+0	-		465780	-3,39E-	-8,83E-	0,68
	6	03	65	02	8	6,62E+07	7,10E+07	0	01	02	
	14166	6,35E-		1,27E-	9,67E+0	-		444880	-4,02E-	-4,13E-	0,70
	1	03	65	02	7	5,68E+08	2,40E+07	0	01	02	
	14166	6,35E-		1,27E-	9,67E+0	-		444880	-4,02E-	-4,13E-	0,70
15	1	03	65	02	7	5,68E+08	2,40E+07	0	01	02	
	14208	6,41E-		1,27E-	8,60E+0	-	-	417160	-5,05E-		0,73
	6	03	65	02	7	1,15E+09	2,12E+07	0	01	2,99E-02	
	14123	6,48E-		1,27E-	7,31E+0	-	-	383310	-4,39E-		0,75
	6	03	65	02	7	1,25E+09	2,59E+07	0	01	1,05E-01	
	14123	6,48E-		1,27E-	7,31E+0	-	-	383310	-4,39E-		0,75
16	6	03	65	02	7	1,25E+09	2,59E+07	0	01	1,05E-01	
	14300	6,54E-		1,27E-	5,95E+0	-	-	342420	-4,69E-	-1,22E-	0,78
	4	03	65	02	7	1,35E+09	3,08E+07	0	01	02	
	14257	6,60E-		1,27E-	4,98E+0	-	-	307860	-5,46E-	-2,49E-	0,80
	9	03	65	02	7	7,67E+08	6,34E+07	0	01	01	
	14257	6,60E-		1,27E-	4,98E+0	-	-	307860	-5,46E-	-2,49E-	0,80
17	9	03	65	02	7	7,67E+08	6,34E+07	0	01	01	
	15218	6,67E-		1,27E-	4,63E+0	-	-	288020	-6,10E-	-2,36E-	0,83
	4	03	65	02	7	1,13E+08	9,73E+07	0	01	01	
	15175	6,73E-		1,27E-	4,47E+0	-	-	272470	-6,80E-	-1,48E-	0,85
	9	03	65	02	7	1,20E+08	1,04E+08	0	01	01	
18	15175	6,73E-	65	1,27E-	4,47E+0	-	-	272470	-6,80E-	-1,48E-	0,85

	9	03		02	7	1,20E+08	1,04E+08	0	01	01	
	15310	6,79E-		1,27E-	4,30E+0	-	-	256640	-7,36E-	-1,36E-	0,88
	2	03	65	02	7	1,27E+08	1,11E+08	0	01	01	
	15267	6,86E-		1,27E-	4,13E+0	-	-	240480	-7,88E-	-1,05E-	0,90
	7	03	65	02	7	1,34E+08	1,18E+08	0	01	01	
19	15267	6,86E-		1,27E-	4,13E+0	-	-	240480	-7,88E-	-1,05E-	0,90
	7	03	65	02	7	1,34E+08	1,18E+08	0	01	01	
	15356	6,92E-		1,27E-	3,96E+0	-	-	224120	-8,47E-	-7,63E-	0,93
	1	03	65	02	7	1,40E+08	1,25E+08	0	01	02	
	14395	6,99E-		1,27E-	3,18E+0	-	-	180770	-9,04E-	-3,71E-	0,95
	6	03	65	02	7	1,09E+09	9,11E+07	0	01	02	
20	14395	6,99E-		1,27E-	3,18E+0	-	-	180770	-9,04E-	-3,71E-	0,95
	6	03	65	02	7	1,09E+09	9,11E+07	0	01	02	
	14438	7,05E-		1,27E-	1,52E+0	-	-		-9,78E-	-8,45E-	0,98
	1	03	65	02	7	2,09E+09	5,58E+07	883490	01	03	
	14353	7,11E-		1,27E-	5,58E+0	-	-		-9,74E-	-2,39E-	1,00
	1	03	65	02	6	2,16E+09	5,92E+07	352210	01	02	

## Anexo C – Implementação da *Multilayer Theory* para o provete de Sun e Kelly (1988): *Layup I*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Contem os dados, as matrizes dos coeficientes das constantes arbitrárias, vectores de carga e vectores das constantes arbitrárias, para os dois casos de carga, forças e momentos, nos extremos do elemento curvo.

<b>Layup I</b>			
Empilhamento: [90 <sub>3</sub> /0/90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> /90/0 <sub>2</sub> /90/0/90 <sub>3</sub> /0/90 <sub>3</sub> ]	→	N	= 11

Geometria	
e [m]	= 6,91E-02
a [m]	= 4,57E-03
h [m]	= 0,0254

1 inch [m]	= 2,54E-02
1 lb-force [N]	= 4,44822162

graus	radianos
90	= 1,570796327

Carga	
P [N]	= 444,822162

Momento	
M [N.m]	= 30,73187353

Material: Hercules AS4/3501-6 graphite/epoxy prepreg			
espessura da lâmina [m]	=	1,27E-04	
número total de camadas	=	20	
espessura total da lâmina [m]	=	2,54E-03	
E <sub>L</sub> [Pa]	=	1,38E+11	v <sub>LT</sub> = 0,300
E <sub>T</sub> [Pa]	=	1,00E+10	v <sub>TL</sub> = 0,02175
E <sub>Z</sub> [Pa]	=	1,00E+10	G <sub>rθ</sub> [Pa] = 5,24E+09
90°		0°	
E <sub>r</sub> [Pa]	=	1,00E+10	E <sub>r</sub> [Pa] = 1,00E+10
E <sub>θ</sub> [Pa]	=	1,38E+11	E <sub>θ</sub> [Pa] = 1,00E+10
v <sub>rθ</sub>	=	0,300	v <sub>rθ</sub> = 0,300
v <sub>θr</sub>	=	0,022	v <sub>θr</sub> = 0,022
G <sub>rθ</sub> [Pa]	=	5,24E+09	G <sub>rθ</sub> [Pa] = 5,24E+09

Camada (i)		a <sub>i</sub> [m]	E <sub>r</sub>	E <sub>θ</sub>	v <sub>rθ</sub>	v <sub>θr</sub>	G <sub>rθ</sub>	β <sub>i</sub>	k (i)	Camada (i)
0		0,00								0
1	90 x 3	0,004953	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	1
2	0	0,005080	1,00E+10	1,00E+10	0,300	0,022	5,24E+09	1,8	1,0	2
3	90 x 3	0,005461	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	3
4	0	0,005588	1,00E+10	1,00E+10	0,300	0,022	5,24E+09	1,8	1,0	4
5	90	0,005715	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	5
6	0 x 2	0,005969	1,00E+10	1,00E+10	0,300	0,022	5,24E+09	1,8	1,0	6
7	90	0,006096	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	7
8	0	0,006223	1,00E+10	1,00E+10	0,300	0,022	5,24E+09	1,8	1,0	8
9	90 x 3	0,006604	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	9
10	0	0,006731	1,00E+10	1,00E+10	0,300	0,022	5,24E+09	1,8	1,0	10
11	90 x 3	0,007112	1,00E+10	1,38E+11	0,300	0,022	5,24E+09	5,7	3,7	11

		A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] =	Equação (43), $\sigma_r^{(1)}$	2,24117E-13	-1,46501E+14	1	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(1)}$	3,54539E-13	-9,26087E+13	1	-0,000116676	28355,71558	-1
	Equação (44), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	0,000122175	-27079,52155	1
	Equação (44), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (45), $\sigma_r^{(11)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(1)}$	6,12229E-24	1628,418025	-5,29992E-10	-6,02188E-15	-1,58687E-06	5,19282E-10
	Equação (46), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	6,30568E-15	1,51545E-06	-5,16805E-10
	Equação (46), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(1)}$	1,72469E-23	3191,133603	7,09387E-12	-3,26362E-14	-2,38377E-06	-9,78245E-11
	Equação (47), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	3,41742E-14	2,27648E-06	9,78245E-11
	Equação (47), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (48), Sum i=1 a N=11	2,2761E-14	-9,40519E+12	0,080042708	3,02306E-06	-701,6253555	0,025317808

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	B <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4,0989E-13	8,01028E+13	-1	0	0	0	0	0	0
6,20353E-13	-5,29268E+13	1	-0,000139351	23741,69864	-1	0	0	0
0	0	0	0,000145302	-22769,38915	1	-7,077E-13	4,63944E+13	-1
0	0	0	0	0	0	8,04958E-13	-4,07889E+13	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7,07812E-24	-1408,516443	5,27464E-10	0	0	0	0	0	0
1,07125E-23	930,6581825	-5,20243E-10	-7,19219E-15	-1,32865E-06	5,0973E-10	0	0	0
0	0	0	7,49931E-15	1,27424E-06	-5,07481E-10	-1,22208E-23	-815,7934727	5,17947E-10
0	0	0	0	0	0	1,39003E-23	717,2259245	-5,15703E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,99395E-23	-2760,202899	-7,09387E-12	0	0	0	0	0	0
3,01777E-23	1823,76672	7,09387E-12	-3,89787E-14	-1,99588E-06	-9,78245E-11	0	0	0
0	0	0	4,06432E-14	1,91414E-06	9,78245E-11	-3,44268E-23	-1598,671793	-7,09387E-12
0	0	0	0	0	0	3,9158E-23	1405,513642	7,09387E-12
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,67298E-14	-4,74272E+12	0,072320662	3,27154E-06	-534,5558602	0,022989518	1,69734E-14	-9,78278E+11	0,022472856

A <sub>6</sub>	B <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	B <sub>7</sub>	D <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	B <sub>8</sub>	D <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,000151364	21857,43044	-1	0	0	0	0	0	0
0,000163823	-20195,20873	1	-1,03273E-12	3,17927E+13	-1	0	0	0
0	0	0	1,16514E-12	-2,81797E+13	1	-0,000170218	19436,46826	-1
0	0	0	0	0	0	0,000176723	-18721,01074	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7,81221E-15	-1,22321E-06	5,05282E-10	0	0	0	0	0	0
8,45521E-15	1,13018E-06	-5,01028E-10	-1,78336E-23	-559,0391497	5,11361E-10	0	0	0
0	0	0	2,01201E-23	495,5075807	-5,09259E-10	-8,78528E-15	-1,08772E-06	4,98968E-10
0	0	0	0	0	0	9,12102E-15	1,04768E-06	-4,96951E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4,2339E-14	-1,83748E-06	-9,78245E-11	0	0	0	0	0	0
4,58238E-14	1,69774E-06	9,78245E-11	-5,02382E-23	-1095,522519	-7,09387E-12	0	0	0
0	0	0	5,66795E-23	971,0227148	7,09387E-12	-4,76126E-14	-1,63396E-06	-9,78245E-11
0	0	0	0	0	0	4,94322E-14	1,57381E-06	9,78245E-11
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,84941E-06	-913,8554792	0,043485112	2,31083E-14	-6,30547E+11	0,021053409	3,57642E-06	-393,3439038	0,020619287

A <sub>9</sub>	B <sub>9</sub>	D <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>	B <sub>10</sub>	D <sub>10</sub>	A <sub>11</sub>	B <sub>11</sub>	D <sub>11</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,31127E-12	2,50394E+13	-1	0	0	0	0	0	0
1,84318E-12	-1,78134E+13	1	-0,000196895	16803,05228	-1	0	0	0
0	0	0	0,000203836	-16230,84726	1	-2,05574E-12	1,59715E+13	-1
0	0	0	0	0	0	2,8183E-12	-1,16501E+13	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2,26434E-23	-440,2898832	5,072E-10	0	0	0	0	0	0
3,18286E-23	313,2290856	-5,01266E-10	-1,01621E-14	-9,40348E-07	4,91137E-10	0	0	0
0	0	0	1,05204E-14	9,08325E-07	-4,89273E-10	-3,54993E-23	-280,8407908	4,99364E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-6,37878E-23	-862,8152108	-7,09387E-12	0	0	0	0	0	0
8,96632E-23	613,8201895	7,09387E-12	-5,50746E-14	-1,41258E-06	-9,78245E-11	0	0	0
0	0	0	5,70162E-14	1,36447E-06	9,78245E-11	-1,00004E-22	-550,3503837	-7,09387E-12
9,28288E-14	-1,26107E+12	0,05942342	3,81622E-06	-314,5866107	0,019048195	1,3308E-13	-7,54174E+11	0,055059777

[P] =	0	[ABD]	=	-2,30536E+14	A <sub>1</sub>
	0			1,98402E-11	B <sub>1</sub>
	0			2958,272291	D <sub>1</sub>
	0			-8715521,976	A <sub>2</sub>
	0			0,031725799	B <sub>2</sub>
	0			2955,665011	D <sub>2</sub>
	0			-6,95452E+14	A <sub>3</sub>
	0			2,04418E-11	B <sub>3</sub>
	0			2954,234626	D <sub>3</sub>
	0			-7419872,447	A <sub>4</sub>
	0			0,019536531	B <sub>4</sub>
	0			2938,686382	D <sub>4</sub>
	0			-8,58423E+14	A <sub>5</sub>
	0			1,99731E-11	B <sub>5</sub>
	0			2949,876732	D <sub>5</sub>
	0			-7223207,447	A <sub>6</sub>
	0			0,018355205	B <sub>6</sub>
	0			2938,735338	D <sub>6</sub>
	0			-1,01162E+15	A <sub>7</sub>
	0			1,60747E-11	B <sub>7</sub>
	0			2940,511471	D <sub>7</sub>
	0			-7210399,519	A <sub>8</sub>
	0			0,021026372	B <sub>8</sub>
	0			2944,868529	D <sub>8</sub>
	0			-1,03904E+15	A <sub>9</sub>
	0			1,1822E-11	B <sub>9</sub>
	0			2935,469373	D <sub>9</sub>
	0			-7522046,791	A <sub>10</sub>
	0			0,040929848	B <sub>10</sub>
	0			2978,533724	D <sub>10</sub>
	0			-1,03305E+15	A <sub>11</sub>
	0			1,57691E-12	B <sub>11</sub>
	444,822162			2929,815568	D <sub>11</sub>

(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]
1	0,004572	0	0	3578063,671	140868648,5
	0,004699	88003	3464701	3043679,491	119829901,2
2	0,004699	88003	3464701	3043679,491	119829901,2
	0,004826	156567	6164037	2604621,9	102544169,3
3	0,004826	156567	6164037	2604621,9	102544169,3
	0,004953	209805	8260033	2240875,527	88223445,94
4	0,004953	209805	8260033	166733,3354	6564304,545
	0,005080	203096	7995907	129445,0703	5096262,611
5	0,005080	203096	7995907	1728537,044	68052639,54
	0,005207	231312	9106761	1434130,255	56461821,08
6	0,005207	231312	9106761	1434130,255	56461821,08
	0,005334	251057	9884131	1176072,022	46302048,09
7	0,005334	251057	9884131	1176072,022	46302048,09
	0,005461	263850	10387811	946392,6678	37259553,85
8	0,005461	263850	10387811	73952,701	2911523,662
	0,005588	253352	9974478	47214,84113	1858852,013
9	0,005588	253352	9974478	580598,7799	22858219,68
	0,005715	252704	9948962	376714,6978	14831287,32
10	0,005715	252704	9948962	32416,84157	1276253,605
	0,005842	242268	9538108	7990,230895	314576,0195
11	0,005842	242268	9538108	7990,230895	314576,0195
	0,005969	231986	9133288	-15647,00564	-616023,8441
12	0,005969	231986	9133288	-280321,0451	-11036261,62
	0,006096	214706	8453008	-467428,2251	-18402686,03
13	0,006096	214706	8453008	-29563,9752	-1163936,031
	0,006223	205205	8078924	-52187,42661	-2054623,095
14	0,006223	205205	8078924	-776761,8102	-30581173,63
	0,006350	179864	7081242	-962551,3142	-37895721,03
15	0,006350	179864	7081242	-962551,3142	-37895721,03
	0,006477	152326	5997071	-1155315,639	-45484867,66
16	0,006477	152326	5997071	-1155315,639	-45484867,66
	0,006604	122613	4827270	-1356362,778	-53400109,39
17	0,006604	122613	4827270	-95884,4386	-3774977,898
	0,006731	116022	4567777	-118791,3536	-4676824,944
18	0,006731	116022	4567777	-1670415,188	-65764377,49
	0,006858	79237	3119581	-1876855,499	-73891948,8
19	0,006858	79237	3119581	-1876855,499	-73891948,8
	0,006985	40602	1598486	-2096760,646	-82549631,72
20	0,006985	40602	1598486	-2096760,646	-82549631,72
	0,007112	0	0	-2330908,672	-91768057,94

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

[X] =		B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
Equação (49), $\sigma_r^{(1)}$	2	2,10693E-06	-2,90439E+11	0	0	0	0
Equação (50), $\sigma_r^{(1)}$	2	2,61808E-06	-1,99158E+11	-2	-1,999519245	2,038830807	
Equação (50), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	2	1,999521776	-1,938161082	
Equação (50), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (50), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (50), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (50), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (50), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (50), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (50), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (50), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (51), $\sigma_r^{(11)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (52), $\sigma_r^{(1)}$	9,89136E-13	3,47167E-19	0,026720404	-9,69149E-13	-9,68866E-13	-1,03185E-12	
Equação (52), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	9,93999E-13	9,9371E-13	1,00605E-12	
Equação (52), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (52), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (52), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (52), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (52), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (52), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (52), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (52), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(1)}$	-9,18864E-13	0	0	9,90699E-17	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	-1,0161E-16	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (53), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0	
Equação (54), Sum i=1 a N=11	3,62903E-06	1,59034E-11	1622111,235	1,27419E-06	1,27395E-06	1,26638E-06	

B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-2,80427E-06	1,76754E+11	0	0	0	0	0	0
2	3,41234E-06	-1,25696E+11	-2	-1,999529007	1,677147927	0	0	0
0	0	0	2	1,999531306	-1,601778384	-2	-3,63201E-06	1,12787E+11
0	0	0	0	0	0	2	3,86039E-06	-1,0145E+11
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,0145E-12	-3,81392E-19	-0,024322586	0	0	0	0	0	0
1,09059E-12	4,98899E-19	0,018593833	-1,06855E-12	-1,06824E-12	-9,35861E-13	0	0	0
0	0	0	1,0934E-12	1,09309E-12	9,15E-13	-1,11595E-12	-5,43364E-19	-0,017072251
0	0	0	0	0	0	1,14131E-12	5,90657E-19	0,015705289
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,42425E-13	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,01311E-12	0	0	1,09231E-16	0	0	0	0	0
0	0	0	-1,11771E-16	0	0	1,03667E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	-1,06023E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,01612E-06	2,316E-11	1112356,47	1,40322E-06	1,40296E-06	1,14992E-06	1,43548E-06	9,98451E-12	285139,7719

B <sub>6</sub>	C <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	B <sub>7</sub>	C <sub>7</sub>	D <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>	C <sub>8</sub>	D <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-1,999533553	1,531377515	0	0	0	0	0	0
2	1,999537901	-1,40381744	-2	-4,3439E-06	82648321566	0	0	0
0	0	0	2	4,59931E-06	-74840231589	-2	-1,999540006	1,345932925
0	0	0	0	0	0	2	1,999542067	-1,291556128
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,11825E-12	-1,11793E-12	-8,94266E-13	0	0	0	0	0	0
1,16795E-12	1,16762E-12	8,5621E-13	-1,19204E-12	-6,94176E-19	-0,013363244	0	0	0
0	0	0	1,2174E-12	7,50629E-19	0,012358232	-1,1928E-12	-1,19246E-12	-8,38371E-13
0	0	0	0	0	0	1,21765E-12	1,21731E-12	8,21261E-13
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,14311E-16	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,19392E-16	0	0	1,10735E-12	0	0	0	0	0
0	0	0	-1,13091E-12	0	0	1,21932E-16	0	0
0	0	0	0	0	0	-1,24472E-16	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,96774E-06	2,9672E-06	2,17509E-06	1,53226E-06	1,27215E-11	223777,5229	1,56451E-06	1,56423E-06	1,03136E-06

B <sub>9</sub>	C <sub>9</sub>	D <sub>9</sub>	B <sub>10</sub>	C <sub>10</sub>	D <sub>10</sub>	B <sub>11</sub>	C <sub>11</sub>	D <sub>11</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-4,86399E-06	67908620496	0	0	0	0	0	0
2	5,71512E-06	-51318962162	-2	-1,999548009	1,146825831	0	0	0
0	0	0	2	1,999549913	-1,103956602	-2	-6,01831E-06	46911991431
0	0	0	0	0	0	2	6,98818E-06	-36188429825
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,24276E-12	-8,10365E-19	-0,011447245	0	0	0	0	0	0
1,31885E-12	1,01046E-18	0,009180392	-1,2922E-12	-1,29184E-12	-7,73878E-13	0	0	0
0	0	0	1,31705E-12	1,31668E-12	7,59276E-13	-1,34421E-12	-1,08453E-18	-0,008553419
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,15447E-12	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,22515E-12	0	0	1,32093E-16	0	0	0	0	0
0	0	0	-1,34633E-16	0	0	1,24871E-12	0	0
4,88709E-06	4,79729E-11	535969,6449	1,69355E-06	1,69325E-06	9,52767E-07	5,27418E-06	6,36571E-11	403682,8918



(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [MPa]
1	0,004572	0	0	38963390,63	1533991757
	0,004699	972507	38287662,06	33116708,55	1303807423
1	0,004699	972507	38287662,06	33116708,55	1303807423
	0,004826	1748451	68836651,82	27894037,91	1098190469
3	0,004826	1748451	68836651,82	27894037,91	1098190469
	0,004953	2357468	92813684,49	23183289,59	912727936,7
2	0,004953	2357467,586	92813684,49	1728734,092	68060397,33
	0,005080	2337733,497	92036751,86	1410079,8	55514952,76
5	0,005080	2337733,497	92036751,86	18794537,54	739942422,7
	0,005207	2688400,473	105842538,3	14689299,99	578318897,4
3	0,005207	2688400,473	105842538,3	14689299,99	578318897,4
	0,005334	2928218,066	115284175,8	10876080,65	428192151,5
7	0,005334	2928218,066	115284175,8	10876080,65	428192151,5
	0,005461	3071068,51	120908209	7301249,995	287450787,2
4	0,005461	3071068,51	120908209	591425,6554	23284474,62
	0,005588	3011874,941	118577753,6	343351,4904	13517775,21
5	0,005588	3011874,941	118577753,6	3896777,59	153416440,6
	0,005715	2995053,918	117915508,6	636626,9656	25064053,77
10	0,005715	2995053,918	117915508,6	106597,9738	4196770,622
	0,005842	2929762,444	115344978,1	-121871,074	-4798073,779
6	0,005842	2929762,444	115344978,1	-121871,074	-4798073,779
	0,005969	2862477,741	112695974,1	-342029,1115	-13465713,05
7	0,005969	2862477,741	112695974,1	-5513051,869	-217049286,2
	0,006096	2657347,605	104619984,5	-8443847,767	-332434951,5
8	0,006096	2657347,605	104619984,5	-558698,6077	-21996008,18
	0,006223	2589581,171	101952014,6	-766521,3094	-30178004,31
14	0,006223	2589581,171	101952014,6	-11290867,14	-444522328,5
	0,006350	2284053,041	89923348,06	-14078202,67	-554259947,7
9	0,006350	2284053,041	89923348,06	-14078202,67	-554259947,7
	0,006477	1936078,66	76223569,28	-16844657,55	-663175493,9
16	0,006477	1936078,66	76223569,28	-16844657,55	-663175493,9
	0,006604	1548389,42	60960213,4	-19602321,68	-771744947,9
10	0,006604	1548389,42	60960213,4	-1390245,823	-54734087,52
	0,006731	1491072,283	58703633,18	-1587521,335	-62500839,95
18	0,006731	1491072,283	58703633,18	-22306802,77	-878220581,5
	0,006858	1025604,47	40378128,74	-24984889,47	-983657065,9
11	0,006858	1025604,47	40378128,74	-24984889,47	-983657065,9
	0,006985	528168,2388	20794025,15	-27686344,5	-1090013563
20	0,006985	528168,2388	20794025,15	-27686344,5	-1090013563
	0,007112	0	0	-30417632,45	-1197544585

(i)	Raio r	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$ [Pa]	(r-a)/t	
1	1	0,004572	0	1674860406	0
		0,004699	41752363	1423637324	0,05
1	2	0,004699	41752363	1423637324	0,05
		0,004826	75000688	1200734638	0,1
3	3	0,004826	75000688	1200734638	0,1
		0,004953	101073717	1000951383	0,15
2	4	0,004953	101073717	74624701,88	0,15
		0,005080	100032658	60611215,37	0,2
5	5	0,005080	100032658	807995062,3	0,2
		0,005207	114949299	634780718,5	0,25
3	6	0,005207	114949299	634780718,5	0,25
		0,005334	125168307	474494199,6	0,3
7	7	0,005334	125168307	474494199,6	0,3
		0,005461	131296020	324710341,1	0,35
4	8	0,005461	131296020	26195998,28	0,35
		0,005588	128552231	15376627,22	0,4
5	9	0,005588	128552231	176274660,2	0,4
		0,005715	127864470	39895341,08	0,45
10	10	0,005715	127864470	5473024,228	0,45
		0,005842	124883086	-4483497,76	0,5
6	11	0,005842	124883086	-4483497,76	0,5
		0,005969	121829263	-14081736,9	0,55
7	12	0,005969	121829263	-228085547,8	0,55
		0,006096	113072993	-350837637,5	0,6
8	13	0,006096	113072993	-23159944,21	0,6
		0,006223	110030939	-32232627,4	0,65
14	14	0,006223	110030939	-475103502,1	0,65
		0,006350	97004590	-592155668,7	0,7
9	15	0,006350	97004590	-592155668,7	0,7
		0,006477	82220640	-708660361,6	0,75
16	16	0,006477	82220640	-708660361,6	0,75
		0,006604	65787483	-825145057,3	0,8
10	17	0,006604	65787483	-58509065,42	0,8
		0,006731	63271410	-67177664,89	0,85
18	18	0,006731	63271410	-943984959	0,85
		0,006858	43497709	-1057549015	0,9
11	19	0,006858	43497709	-1057549015	0,9
		0,006985	22392511	-1172563195	0,95
20	20	0,006985	22392511	-1172563195	0,95
		0,007112	0	-1289312643	1

Anexo D – Tensões a  $\theta = 65^\circ$  e a meio da espessura, retiradas do cálculo numérico em ANSYS 3D, para o provete de Sun e Kelly (1988): *Layup I*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Camada	NÓDE	Cordenadas Cilíndricas			Tensões [Pa] ANSYS						(r-a)/t
		X	Y	Z	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ	
		[m]	[graus]	[m]	Sr	Sθ	SZ	Srθ	SθZ	Srz	
1	135894	4,57E-03	65	1,27E-02	1,43E+07	1,68E+09	2,49E+07	390000	4,82E-01	2,60E-02	0,00
	136119	4,64E-03	65	1,27E-02	2,42E+07	1,51E+09	2,33E+07	779000	3,66E-01	7,62E-02	0,03
	135269	4,70E-03	65	1,27E-02	4,33E+07	1,39E+09	2,45E+07	1610000	3,32E-01	1,03E-01	0,05
2	135269	4,70E-03	65	1,27E-02	4,33E+07	1,39E+09	2,45E+07	1610000	3,32E-01	1,03E-01	0,05
	137037	4,76E-03	65	1,27E-02	6,03E+07	1,28E+09	2,54E+07	2530000	3,01E-01	8,50E-02	0,08
	136612	4,83E-03	65	1,27E-02	7,54E+07	1,17E+09	2,61E+07	3490000	3,49E-01	1,13E-01	0,10
3	136612	4,83E-03	65	1,27E-02	7,54E+07	1,17E+09	2,61E+07	3490000	3,49E-01	1,13E-01	0,10
	137955	4,89E-03	65	1,27E-02	8,87E+07	1,07E+09	2,65E+07	4410000	2,61E-01	9,36E-02	0,13
	137530	4,95E-03	65	1,27E-02	9,67E+07	5,14E+08	6,20E+07	4960000	2,64E-01	5,00E-02	0,15
4	137530	4,95E-03	65	1,27E-02	9,67E+07	5,14E+08	6,20E+07	4960000	2,64E-01	5,00E-02	0,15
	150807	5,02E-03	65	1,27E-02	9,83E+07	6,53E+07	9,50E+07	5020000	2,45E-01	2,32E-02	0,18
	138907	5,08E-03	65	1,27E-02	1,00E+08	4,27E+08	5,75E+07	5110000	2,40E-01	1,98E-02	0,20
5	138907	5,08E-03	65	1,27E-02	1,00E+08	4,27E+08	5,75E+07	5110000	2,40E-01	1,98E-02	0,20
	139332	5,14E-03	65	1,27E-02	1,06E+08	6,98E+08	2,20E+07	5460000	1,96E-01	-1,76E-03	0,23
	138482	5,21E-03	65	1,27E-02	1,13E+08	6,16E+08	2,14E+07	5850000	2,12E-01	-5,33E-02	0,25
6	138482	5,21E-03	65	1,27E-02	1,13E+08	6,16E+08	2,14E+07	5850000	2,12E-01	-5,33E-02	0,25
	140250	5,27E-03	65	1,27E-02	1,18E+08	5,36E+08	2,07E+07	6120000	1,85E-01	-5,68E-02	0,28
	139825	5,33E-03	65	1,27E-02	1,22E+08	4,60E+08	1,99E+07	6320000	1,93E-01	-5,10E-02	0,30
7	139825	5,33E-03	65	1,27E-02	1,22E+08	4,60E+08	1,99E+07	6320000	1,93E-01	-5,10E-02	0,30
	141168	5,40E-03	65	1,27E-02	1,25E+08	3,86E+08	1,89E+07	6450000	1,60E-01	-2,63E-02	0,33
	140743	5,46E-03	65	1,27E-02	1,27E+08	1,69E+08	8,74E+07	6470000	1,36E-01	-4,46E-02	0,35
8	140743	5,46E-03	65	1,27E-02	1,27E+08	1,69E+08	8,74E+07	6470000	1,36E-01	-4,46E-02	0,35
	151266	5,52E-03	65	1,27E-02	1,26E+08	2,07E+07	1,53E+08	6340000	1,56E-01	9,77E-02	0,38
	142120	5,59E-03	65	1,27E-02	1,25E+08	9,18E+07	8,14E+07	6230000	1,22E-01	6,34E-02	0,40
9	142120	5,59E-03	65	1,27E-02	1,25E+08	9,18E+07	8,14E+07	6230000	1,22E-01	6,34E-02	0,40
	142545	5,65E-03	65	1,27E-02	1,25E+08	1,01E+08	1,24E+07	6240000	1,18E-01	-7,23E-02	0,43
	141695	5,72E-03	65	1,27E-02	1,24E+08	2,14E+07	7,45E+07	6220000	1,25E-01	-2,77E-03	0,45
10	141695	5,72E-03	65	1,27E-02	1,24E+08	2,14E+07	7,45E+07	6220000	1,25E-01	-2,77E-03	0,45
	152184	5,78E-03	65	1,27E-02	1,22E+08	6,72E+05	1,34E+08	6090000	1,22E-01	-5,91E-02	0,48
	151759	5,84E-03	65	1,27E-02	1,21E+08	-4220000	1,28E+08	5910000	1,17E-01	-9,06E-02	0,50
11	151759	5,84E-03	65	1,27E-02	1,21E+08	-4220000	1,28E+08	5910000	1,17E-01	-9,06E-02	0,50
	152643	5,91E-03	65	1,27E-02	1,19E+08	-9,02E+06	1,22E+08	5740000	1,15E-01	-1,11E-01	0,53
	143497	5,97E-03	65	1,27E-02	1,17E+08	-1,22E+08	6,04E+07	5630000	1,10E-01	-1,19E-01	0,55
12	143497	5,97E-03	65	1,27E-02	1,17E+08	-1,22E+08	6,04E+07	5630000	1,10E-01	-1,19E-01	0,55
	143922	6,03E-03	65	1,27E-02	1,13E+08	-2,85E+08	1,59E+06	5580000	1,08E-01	-1,56E-01	0,58
	143072	6,10E-03	65	1,27E-02	1,09E+08	-1,80E+08	4,28E+07	5520000	1,12E-01	-1,17E-01	0,60
13	143072	6,10E-03	65	1,27E-02	1,09E+08	-1,80E+08	4,28E+07	5520000	1,12E-01	-1,17E-01	0,60
	153102	6,16E-03	65	1,27E-02	1,07E+08	-2,72E+07	8,17E+07	5390000	1,02E-01	2,35E-02	0,63
	144874	6,22E-03	65	1,27E-02	1,04E+08	-2,51E+08	3,66E+07	5250000	8,12E-02	5,68E-02	0,65
14	144874	6,22E-03	65	1,27E-02	1,04E+08	-2,51E+08	3,66E+07	5250000	8,12E-02	5,68E-02	0,65
	145299	6,29E-03	65	1,27E-02	9,87E+07	-5,17E+08	-6,37E+06	5150000	6,24E-02	4,23E-02	0,68
	144449	6,35E-03	65	1,27E-02	9,20E+07	-5,73E+08	-8,94E+06	5050000	9,32E-02	2,09E-02	0,70
15	144449	6,35E-03	65	1,27E-02	9,20E+07	-5,73E+08	-8,94E+06	5050000	9,32E-02	2,09E-02	0,70
	146217	6,41E-03	65	1,27E-02	8,49E+07	-6,28E+08	-1,16E+07	4920000	4,57E-02	2,31E-02	0,73
	145792	6,48E-03	65	1,27E-02	7,74E+07	-6,83E+08	-1,43E+07	4760000	9,66E-02	8,14E-02	0,75
16	145792	6,48E-03	65	1,27E-02	7,74E+07	-6,83E+08	-1,43E+07	4760000	9,66E-02	8,14E-02	0,75
	147135	6,54E-03	65	1,27E-02	6,95E+07	-7,38E+08	-1,71E+07	4550000	9,81E-02	1,88E-02	0,78
	146710	6,60E-03	65	1,27E-02	6,38E+07	-4,20E+08	-3,72E+07	4350000	7,80E-02	-1,16E-01	0,80
17	146710	6,60E-03	65	1,27E-02	6,38E+07	-4,20E+08	-3,72E+07	4350000	7,80E-02	-1,16E-01	0,80
	153561	6,67E-03	65	1,27E-02	6,15E+07	-6,20E+07	-5,89E+07	4180000	6,40E-02	-1,08E-01	0,83
	148087	6,73E-03	65	1,27E-02	5,74E+07	-4,88E+08	-4,31E+07	3940000	3,49E-02	-4,72E-02	0,85
18	148087	6,73E-03	65	1,27E-02	5,74E+07	-4,88E+08	-4,31E+07	3940000	3,49E-02	-4,72E-02	0,85
	148512	6,79E-03	65	1,27E-02	4,91E+07	-9,50E+08	-2,58E+07	3530000	1,13E-02	2,34E-02	0,88
	147662	6,86E-03	65	1,27E-02	3,94E+07	-1,00E+09	-2,90E+07	3010000	-1,03E-02	1,26E-02	0,90
19	147662	6,86E-03	65	1,27E-02	3,94E+07	-1,00E+09	-2,90E+07	3010000	-1,03E-02	1,26E-02	0,90
	149430	6,92E-03	65	1,27E-02	2,94E+07	-1,06E+09	-3,21E+07	2390000	-2,25E-02	-3,84E-02	0,93

Anexo D

---

	149005	6,99E-03	65	1,27E-02	1,91E+07	-1,11E+09	-3,54E+07	1660000	-3,88E-02	-7,98E-03	0,95
	149005	6,99E-03	65	1,27E-02	1,91E+07	-1,11E+09	-3,54E+07	1660000	-3,88E-02	-7,98E-03	0,95
20	150348	7,05E-03	65	1,27E-02	8,54E+06	-1,17E+09	-3,87E+07	769000	-6,19E-02	4,73E-03	0,98
	149923	7,11E-03	65	1,27E-02	3,19E+06	-1,21E+09	-4,07E+07	308000	-4,36E-02	-6,23E-03	1,00

## Anexo E – Implementação da *Multilayer Theory* para o provete de Sun e Kelly (1988): *Layup J*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Contem os dados, as matrizes dos coeficientes das constantes arbitrárias, vectores de carga e vectores das constantes arbitrárias, para os dois casos de carga, forças e momentos, nos extremos do elemento curvo.

<b>Layup J</b>			
Empilhamento: [90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>3</sub> ]	→	N	= 9

<b>Geometria</b>		<b>Material: Hercules AS4/3501-6 graphite/epoxy prepreg</b>			
e [m]	= 6,71E-02	<b>espessura da lâmina [m]</b>		= 1,91E-04	
a [m]	= 4,57E-03	<b>número total de camadas</b>		= 24	
h [m]	= 0,0254	<b>espessura total da lâmina [m]</b>		= 4,57E-03	
		<b>E<sub>L</sub> [Pa]</b>	= 5,58E+10	<b>v<sub>LT</sub></b>	= 0,290
		<b>E<sub>T</sub> [Pa]</b>	= 1,57E+10	<b>v<sub>TL</sub></b>	= 0,08173
		<b>E<sub>Z</sub> [Pa]</b>	= 1,57E+10	<b>G<sub>rθ</sub> [Pa]</b>	= 7,31E+09
		<b>90°</b>		<b>0°</b>	
		<b>E<sub>r</sub> [Pa]</b>	= 1,57E+10	<b>E<sub>r</sub> [Pa]</b>	= 1,57E+10
		<b>E<sub>θ</sub> [Pa]</b>	= 5,58E+10	<b>E<sub>θ</sub> [Pa]</b>	= 1,57E+10
		<b>v<sub>rθ</sub></b>	= 0,290	<b>v<sub>rθ</sub></b>	= 0,290
		<b>v<sub>θr</sub></b>	= 0,082	<b>v<sub>θr</sub></b>	= 0,082
		<b>G<sub>rθ</sub> [Pa]</b>	= 7,31E+09	<b>G<sub>rθ</sub> [Pa]</b>	= 7,31E+09

<b>1 inch [m]</b>	= 2,54E-02
<b>1 lb-force [N]</b>	= 4,44822162
<b>graus</b>	<b>radianos</b>
90	= 1,570796327
<b>Carga</b>	
<b>P [N]</b>	= 444,822162
<b>Momento</b>	
<b>M [N.m]</b>	= 29,8279949

Camada (i)		a <sub>i</sub> [m]	E <sub>r</sub>	E <sub>θ</sub>	v <sub>rθ</sub>	v <sub>θr</sub>	G <sub>rθ</sub>	β <sub>i</sub>	k (i)	Camada (i)
0		0,00								0
1	90 x 3	0,005144	1,57E+10	5,58E+10	0,290	0,082	7,31E+09	3,2	1,9	1
2	0 x 3	0,005715	1,57E+10	1,57E+10	0,290	0,082	7,31E+09	1,9	1,0	2
3	90 x 2	0,006096	1,57E+10	5,58E+10	0,290	0,082	7,31E+09	3,2	1,9	3
4	0 x 3	0,006668	1,57E+10	1,57E+10	0,290	0,082	7,31E+09	1,9	1,0	4
5	90 x 2	0,007049	1,57E+10	5,58E+10	0,290	0,082	7,31E+09	3,2	1,9	5
6	0 x 3	0,007620	1,57E+10	1,57E+10	0,290	0,082	7,31E+09	1,9	1,0	6
7	90 x 2	0,008001	1,57E+10	5,58E+10	0,290	0,082	7,31E+09	3,2	1,9	7
8	0 x 3	0,008573	1,57E+10	1,57E+10	0,290	0,082	7,31E+09	1,9	1,0	8
9	90 x 3	0,009144	1,57E+10	5,58E+10	0,290	0,082	7,31E+09	3,2	1,9	9

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] = Equação (43), $\sigma_r^{(1)}$	1,14433E-07	-88445379,35	1	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(1)}$	1,66451E-07	-60805125,79	1	-8,94543E-05	39914,47915	-1
Equação (44), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	0,00010916	-32709,04979	1
Equação (44), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (45), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(1)}$	3,00808E-18	0,001277041	-3,27555E-10	-2,3006E-15	-1,44156E-06	3,07878E-10
Equação (46), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	2,8074E-15	1,18133E-06	-3,01723E-10
Equação (46), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(1)}$	1,22336E-17	0,002466974	1,64624E-11	-1,5978E-14	-2,46624E-06	-5,84142E-11
Equação (47), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	1,94978E-14	2,02103E-06	5,84142E-11
Equação (47), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (48), Sum i=1 a N=9	1,63509E-08	-8688168,235	0,117783036	1,04286E-05	-3813,239484	0,105360516

A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	B <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2,32733E-07	43487937,51	-1	0	0	0	0	0	0
2,85778E-07	-35415970,62	1	-0,000123318	28953,78542	-1	0	0	0
0	0	0	0,000146071	-24443,67313	1	-3,8005E-07	26630939,59	-1
0	0	0	0	0	0	4,53544E-07	-22315590,95	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4,20592E-18	-0,000913342	3,21006E-10	0	0	0	0	0	0
5,16453E-18	0,000743813	-3,16995E-10	-3,17152E-15	-1,0457E-06	2,97952E-10	0	0	0
0	0	0	3,75669E-15	8,82813E-07	-2,92717E-10	-6,8682E-18	-0,000559308	3,11425E-10
0	0	0	0	0	0	8,19636E-18	0,000468676	-3,07971E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,71051E-17	-0,001764384	-1,64624E-11	0	0	0	0	0	0
2,10037E-17	0,00143689	1,64624E-11	-2,20266E-14	-1,789E-06	-5,84142E-11	0	0	0
0	0	0	2,60908E-14	1,51033E-06	5,84142E-11	-2,79324E-17	-0,001080465	-1,64624E-11
0	0	0	0	0	0	3,33339E-17	0,000905384	1,64624E-11
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,66734E-08	-2537263,494	0,064538521	1,20415E-05	-2386,830456	0,089612159	2,31012E-08	-1356444,683	0,055569851

A <sub>6</sub>	B <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	B <sub>7</sub>	D <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	B <sub>8</sub>	D <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,000162244	22007,15471	-1	0	0	0	0	0	0
0,000187995	-18992,66544	1	-5,81212E-07	17413770,27	-1	0	0	0
0	0	0	6,78806E-07	-14910145,08	1	-0,000206151	17319,96445	-1
0	0	0	0	0	0	0,000234856	-15202,99048	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4,17262E-15	-7,94815E-07	2,89471E-10	0	0	0	0	0	0
4,83489E-15	6,85943E-07	-2,84916E-10	-1,05036E-17	-0,000365727	3,03126E-10	0	0	0
0	0	0	1,22673E-17	0,000313146	-3,00093E-10	-5,30182E-15	-6,25531E-07	2,82066E-10
0	0	0	0	0	0	6,04009E-15	5,49074E-07	-2,78035E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2,89794E-14	-1,35978E-06	-5,84142E-11	0	0	0	0	0	0
3,3579E-14	1,17352E-06	5,84142E-11	-4,27171E-17	-0,000706508	-1,64624E-11	0	0	0
0	0	0	4,98899E-17	0,000604932	1,64624E-11	-3,68219E-14	-1,07017E-06	-5,84142E-11
0	0	0	0	0	0	4,19493E-14	9,39365E-07	5,84142E-11
1,36279E-05	-1595,320544	0,077961541	3,06767E-08	-786965,1685	0,048790164	1,51917E-05	-1120,339724	0,068992871



(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]
1	0,004572	2,56114E-09	1,00832E-07	1591878,951	62672399,65
	0,004763	58295,01184	2295079,206	1390163,289	54730838,17
2	0,004763	58295,01184	2295079,206	1390163,289	54730838,17
	0,004953	103062,9718	4057597,315	1222736,33	48139225,61
	0,004953	103062,9718	4057597,315	1222736,33	48139225,61
3	0,005144	137377,1292	5408548,395	1082319,394	42610999,75
	0,005144	137377,1292	5408548,395	313084,2245	12326150,57
4	0,005334	137828,8183	5426331,428	263171,2796	10361074
	0,005334	137828,8183	5426331,428	263171,2796	10361074
5	0,005525	136610,4264	5378363,245	217099,8314	8547237,456
	0,005525	136610,4264	5378363,245	217099,8314	8547237,456
6	0,005715	134057,7482	5277864,102	174339,5395	6863761,398
	0,005715	134057,7482	5277864,102	590696,5714	23255770,53
7	0,005906	142745,2369	5619891,217	495213,034	19496576,14
	0,005906	142745,2369	5619891,217	495213,034	19496576,14
8	0,006096	147841,6478	5820537,315	408953,2204	16100520,49
	0,006096	147841,6478	5820537,315	123929,4186	4879110,97
9	0,006287	142209,2848	5598790,741	90481,36324	3562258,395
	0,006287	142209,2848	5598790,741	90481,36324	3562258,395
10	0,006477	136124,809	5359244,447	58883,06015	2318230,715
	0,006477	136124,809	5359244,447	58883,06015	2318230,715
11	0,006668	129688,177	5105833,74	28924,11787	1138744,798
	0,006668	129688,177	5105833,74	75622,39183	2977259,521
12	0,006858	123711,1734	4870518,637	7580,103285	298429,2632
	0,006858	123711,1734	4870518,637	7580,103285	298429,2632
13	0,007049	116438,2815	4584184,311	-57575,27148	-2266742,972
	0,007049	116438,2815	4584184,311	-9391,548223	-369745,993
14	0,007239	109804,1346	4322997,424	-35466,75403	-1396328,899
	0,007239	109804,1346	4322997,424	-35466,75403	-1396328,899
15	0,007430	103027,7848	4056212,001	-60456,44996	-2380175,195
	0,007430	103027,7848	4056212,001	-60456,44996	-2380175,195
16	0,007620	96148,73587	3785383,302	-84465,802	-3325425,276
	0,007620	96148,73587	3785383,302	-319738,964	-12588148,19
17	0,007811	83126,30585	3272689,207	-376394,8009	-14818692,95
	0,007811	83126,30585	3272689,207	-376394,8009	-14818692,95
18	0,008001	69693,61457	2743843,093	-432785,7466	-17038808,92
	0,008001	69693,61457	2743843,093	-117877,6046	-4640850,573
19	0,008192	63519,71834	2500776,313	-140331,8136	-5524874,552
	0,008192	63519,71834	2500776,313	-140331,8136	-5524874,552
20	0,008382	57265,9811	2254566,185	-162042,1831	-6379613,508
	0,008382	57265,9811	2254566,185	-162042,1831	-6379613,508
21	0,008573	50955,05063	2006104,356	-183072,2331	-7207568,233
	0,008573	50955,05063	2006104,356	-660216,1355	-25992761,24
22	0,008763	34008,47107	1338916,184	-712146,1034	-28037248,17
	0,008763	34008,47107	1338916,184	-712146,1034	-28037248,17
23	0,008954	17029,07142	670435,8828	-765014,2048	-30118669,48
	0,008954	17029,07142	670435,8828	-765014,2048	-30118669,48
24	0,009144	-1,16415E-10	-4,58328E-09	-818841,3244	-32237847,42

		B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] =	Equação (49), $\sigma_r^{(1)}$	2	0,02465857	-4944683,943	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(1)}$	2	0,027363804	-3520666,709	-2	-1,999523018	1,890599485
	Equação (50), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	2	1,999533553	-1,531377515
	Equação (50), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (51), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(1)}$	6,39382E-13	4,54704E-15	6,38094E-07	-6,00973E-13	-6,00797E-13	-6,69182E-13
	Equação (52), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	6,67747E-13	6,67555E-13	6,0226E-13
	Equação (52), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(1)}$	-4,70034E-13	0	0	6,54455E-17	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	-7,27172E-17	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (54), Sum i=1 a N=9	5,55241E-06	1,36188E-07	21,78011672	6,20563E-06	6,20448E-06	5,27006E-06

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-0,030034259	2598181,468	0	0	0	0	0	0
2	0,031797187	-2156950,899	-2	-1,999540006	1,345932925	0	0	0
0	0	0	2	1,999548965	-1,125085012	-2	-0,034417908	1665744,376
0	0	0	0	0	0	2	0,036150458	-1419095,621
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-7,10425E-13	-5,54532E-15	-5,23222E-07	0	0	0	0	0	0
7,57787E-13	6,2622E-15	4,63325E-07	-7,12264E-13	-7,12061E-13	-5,64617E-13	0	0	0
0	0	0	7,79039E-13	7,78821E-13	5,16219E-13	-8,28829E-13	-7,4138E-15	-3,91356E-07
0	0	0	0	0	0	8,76191E-13	8,23197E-15	3,52459E-07
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,2226E-13	0	0	0	0	0	0	0	0
-5,57077E-13	0	0	7,7565E-17	0	0	0	0	0
0	0	0	-8,48367E-17	0	0	6,09303E-13	0	0
0	0	0	0	0	0	-6,4412E-13	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,49999E-06	1,31082E-07	10,02833063	7,29434E-06	7,29304E-06	4,4823E-06	5,2258E-06	1,73719E-07	7,564623477

B' <sub>6</sub>	C' <sub>6</sub>	D' <sub>6</sub>	B' <sub>7</sub>	C' <sub>7</sub>	D' <sub>7</sub>	B' <sub>8</sub>	C' <sub>8</sub>	D' <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-1,999554522	1,006738722	0	0	0	0	0	0
2	1,999562317	-0,861387461	-2	-0,038729129	1133368,668	0	0	0
0	0	0	2	0,040435687	-984612,8745	-2	-1,999567195	0,781301913
0	0	0	0	0	0	2	1,999574093	-0,68059843
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8,23555E-13	-8,23327E-13	-4,88314E-13	0	0	0	0	0	0
8,9033E-13	8,90087E-13	4,51689E-13	-9,47233E-13	-9,53424E-15	-3,04317E-07	0	0	0
0	0	0	9,94595E-13	1,04521E-14	2,77594E-07	-9,34846E-13	-9,34593E-13	-4,30179E-13
0	0	0	0	0	0	1,00162E-12	1,00135E-12	4,01499E-13
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,96845E-17	0	0	0	0	0	0	0	0
-9,69563E-17	0	0	6,96346E-13	0	0	0	0	0
0	0	0	-7,31164E-13	0	0	1,01804E-16	0	0
0	0	0	0	0	0	-1,09076E-16	0	0
8,38305E-06	8,38162E-06	3,89952E-06	5,9516E-06	2,21935E-07	5,919952523	9,47176E-06	9,4702E-06	3,4509E-06

$B'_9$	$C'_9$	$D'_9$
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
-2	-0,042978011	806970,3512
2	0,045500701	-669928,3502
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
-1,06564E-12	-1,19027E-14	-2,43762E-07
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
7,8339E-13	0	0
1,0125E-05	4,22043E-07	7,008083378

$[M] =$	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
-29,8279949	

$[B'C'D'] =$	
7210889,316	$B'_1$
-295302614,6	$C'_1$
1,443982746	$D'_1$
51789093222	$B'_2$
-51799200987	$C'_2$
1710750,982	$D'_2$
7210889,327	$B'_3$
-304409817,3	$C'_3$
1,521369275	$D'_3$
51789093219	$B'_4$
-51799158530	$C'_4$
1661167,401	$D'_4$
7210889,327	$B'_5$
-305227220	$C'_5$
1,532563748	$D'_5$
51789093219	$B'_6$
-51799174900	$C'_6$
1687860,069	$D'_6$
7210889,327	$B'_7$
-302509535,5	$C'_7$
1,457134369	$D'_7$
51789093219	$B'_8$
-51799225115	$C'_8$
1792256,817	$D'_8$
7210889,327	$B'_9$
-298230826	$C'_9$
1,271877934	$D'_9$

(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]
1	1	0,004572	0	0	14154840,38
	1	0,004763	525442,4018	20686708,73	12157139,23
2	2	0,004763	525442,4018	20686708,73	12157139,23
	2	0,004953	937947,8339	36927080,08	10376863,76
3	3	0,004953	937947,8339	36927080,08	10376863,76
	3	0,005144	1257393,716	49503689,62	8776368,522
4	4	0,005144	1257393,716	49503689,62	2547172,127
	4	0,005334	1295947,522	51021555,97	2131895,834
5	5	0,005334	1295947,522	51021555,97	2131895,834
	5	0,005525	1318045,082	51891538,67	1746296,987
6	6	0,005525	1318045,082	51891538,67	1746296,987
	6	0,005715	1326261,797	52215031,39	1386903,517
7	7	0,005715	1326261,797	52215031,39	4644990,714
	7	0,005906	1414078,082	55672365,43	3466721,626
8	8	0,005906	1414078,082	55672365,43	3466721,626
	8	0,006096	1460883,937	57515115,65	2369498,088
9	9	0,006096	1460883,937	57515115,65	753522,612
	9	0,006287	1434968,296	56494814,82	460683,5752
10	10	0,006287	1434968,296	56494814,82	460683,5752
	10	0,006477	1402208,937	55205076,27	184204,6691
11	11	0,006477	1402208,937	55205076,27	184204,6691
	11	0,006668	1363636,763	53686486,71	-77496,82311
12	12	0,006668	1363636,763	53686486,71	-558992,6061
	12	0,006858	1297990,786	51101999,45	-1433130,389
13	13	0,006858	1297990,786	51101999,45	-1433130,389
	13	0,007049	1212820,231	47748827,97	-2267271,841
14	14	0,007049	1212820,231	47748827,97	-567778,7841
	14	0,007239	1162959,995	45785826,59	-794167,8717
15	15	0,007239	1162959,995	45785826,59	-794167,8717
	15	0,007430	1109985,682	43700223,72	-1010266,89
16	16	0,007430	1109985,682	43700223,72	-1010266,89
	16	0,007620	1054377,347	41510919,17	-1216919,304
17	17	0,007620	1054377,347	41510919,17	-4537647,862
	17	0,007811	909395,9491	35802990,12	-5238421,793
18	18	0,007811	909395,9491	35802990,12	-5238421,793
	18	0,008001	754884,516	29719862,84	-5918486,51
19	19	0,008001	754884,516	29719862,84	-1623648,11
	19	0,008192	697389,7129	27456287,91	-1809900,597
20	20	0,008192	697389,7129	27456287,91	-1809900,597
	20	0,008382	638357,4604	25132183,48	-1989011,883
21	21	0,008382	638357,4604	25132183,48	-1989011,883
	21	0,008573	578043,2139	22757606,85	-2161489,314
22	22	0,008573	578043,2139	22757606,85	-7790102,172
	22	0,008763	389667,8374	15341253,44	-8382455,186
23	23	0,008763	389667,8374	15341253,44	-8382455,186
	23	0,008954	196822,0543	7748899,774	-8963996,917
24	24	0,008954	196822,0543	7748899,774	-8963996,917
	24	0,009144	1,5134E-09	5,95826E-08	-9535714,912

(i)	Raio r	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$ [Pa]	(r-a)/t
1	0,004572	1,00832E-07	619949580	0
	0,004763	22981787,94	533358367	0,041667
1	0,004763	22981787,94	533358367	0,041667
	0,004953	40984677,39	456677169	0,083333
3	0,004953	40984677,39	456677169	0,083333
	0,005144	54912238,01	388137320	0,125
4	0,005144	54912238,01	112608518	0,125
	0,005334	56447887,39	94293981	0,166667
2	0,005334	56447887,39	94293981	0,166667
	0,005525	57269901,92	77299087	0,208333
6	0,005525	57269901,92	77299087	0,208333
	0,005715	57492895,49	61466262	0,25
7	0,005715	57492895,49	206129421	0,25
	0,005906	61292256,65	155981680	0,291667
3	0,005906	61292256,65	155981680	0,291667
	0,006096	63335652,96	109387847	0,333333
9	0,006096	63335652,96	34545356	0,333333
	0,006287	62093605,56	21699407	0,375
4	0,006287	62093605,56	21699407	0,375
	0,006477	60564320,72	9570383	0,416667
11	0,006477	60564320,72	9570383	0,416667
	0,006668	58792320,45	-1912311	0,458333
12	0,006668	58792320,45	-19030323	0,458333
	0,006858	55972518,09	-56124027	0,5
5	0,006858	55972518,09	-56124027	0,5
	0,007049	52333012,28	-91529414	0,541667
14	0,007049	52333012,28	-22723241	0,541667
	0,007239	50108824,01	-32662781	0,583333
6	0,007239	50108824,01	-32662781	0,583333
	0,007430	47756435,72	-42154462	0,625
16	0,007430	47756435,72	-42154462	0,625
	0,007620	45296302,48	-51235634	0,666667
17	0,007620	45296302,48	-1,91E+08	0,666667
	0,007811	39075679,33	-2,21E+08	0,708333
7	0,007811	39075679,33	-2,21E+08	0,708333
	0,008001	32463705,93	-2,5E+08	0,75
19	0,008001	32463705,93	-68564004	0,75
	0,008192	29957064,22	-76780804	0,791667
8	0,008192	29957064,22	-76780804	0,791667
	0,008382	27386749,66	-84687168	0,833333
21	0,008382	27386749,66	-84687168	0,833333
	0,008573	24763711,2	-92305573	0,875
22	0,008573	24763711,2	-3,33E+08	0,875
	0,008763	16680169,62	-3,58E+08	0,916667
9	0,008763	16680169,62	-3,58E+08	0,916667
	0,008954	8419335,657	-3,83E+08	0,958333
24	0,008954	8419335,657	-3,83E+08	0,958333
	0,009144	5,49994E-08	-4,08E+08	1

Anexo F – Tensões a  $\theta = 65^\circ$  e a meio da espessura, retiradas do cálculo numérico em ANSYS 3D, para o provete de Sun e Kelly (1988): *Layup J*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Camada	NÓD	Cordenadas Cilíndricas			Tensões [Pa] ANSYS						(r-a)/t
		X	Y	Z	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ	
		[m]	[graus]	[m]	Sr	Sθ	SZ	Srθ	SθZ	Srz	
1	162046	4,57E-03	65	1,27E-02	7,45E+06	6,32E+08	4,59E+07	490470	-5,09E-03	-3,72E-03	0,00
	162671	4,67E-03	65	1,27E-02	1,31E+07	5,80E+08	4,29E+07	939440	-9,24E-04	2,32E-03	0,02
	161821	4,76E-03	65	1,27E-02	2,39E+07	5,36E+08	4,15E+07	1844700	1,88E-02	1,72E-03	0,04
2	161821	4,76E-03	65	1,27E-02	2,39E+07	5,36E+08	4,15E+07	1844700	1,88E-02	1,72E-03	0,04
	163589	4,86E-03	65	1,27E-02	3,33E+07	4,95E+08	4,02E+07	2743400	1,56E-02	1,63E-02	0,06
	163164	4,95E-03	65	1,27E-02	4,15E+07	4,57E+08	3,88E+07	3598000	3,22E-02	5,27E-02	0,08
3	163164	4,95E-03	65	1,27E-02	4,15E+07	4,57E+08	3,88E+07	3598000	3,22E-02	5,27E-02	0,08
	164507	5,05E-03	65	1,27E-02	4,87E+07	4,22E+08	3,74E+07	4381000	5,01E-02	2,93E-02	0,10
	164082	5,14E-03	65	1,27E-02	5,34E+07	2,48E+08	4,12E+07	4904900	-2,00E-02	1,45E-02	0,13
4	164082	5,14E-03	65	1,27E-02	5,34E+07	2,48E+08	4,12E+07	4904900	-2,00E-02	1,45E-02	0,13
	175523	5,24E-03	65	1,27E-02	5,50E+07	1,01E+08	4,51E+07	5079900	-1,87E-03	3,09E-02	0,15
	175098	5,33E-03	65	1,27E-02	5,54E+07	9,28E+07	4,32E+07	5103900	-5,55E-03	2,27E-02	0,17
5	175098	5,33E-03	65	1,27E-02	5,54E+07	9,28E+07	4,32E+07	5103900	-5,55E-03	2,27E-02	0,17
	176441	5,43E-03	65	1,27E-02	5,56E+07	8,45E+07	4,13E+07	5104400	-8,40E-04	1,79E-02	0,19
	176016	5,52E-03	65	1,27E-02	5,56E+07	7,65E+07	3,94E+07	5082100	-2,48E-03	2,86E-02	0,21
6	176016	5,52E-03	65	1,27E-02	5,56E+07	7,65E+07	3,94E+07	5082100	-2,48E-03	2,86E-02	0,21
	176900	5,62E-03	65	1,27E-02	5,55E+07	6,87E+07	3,76E+07	5039000	1,16E-03	1,90E-02	0,23
	165459	5,72E-03	65	1,27E-02	5,61E+07	1,38E+08	2,94E+07	5034900	9,78E-03	-4,47E-02	0,25
7	165459	5,72E-03	65	1,27E-02	5,61E+07	1,38E+08	2,94E+07	5034900	9,78E-03	-4,47E-02	0,25
	165884	5,81E-03	65	1,27E-02	5,75E+07	1,88E+08	2,10E+07	5086900	1,54E-03	-3,21E-02	0,27
	165034	5,91E-03	65	1,27E-02	5,91E+07	1,64E+08	1,95E+07	5125000	2,51E-02	6,64E-03	0,29
8	165034	5,91E-03	65	1,27E-02	5,91E+07	1,64E+08	1,95E+07	5125000	2,51E-02	6,64E-03	0,29
	166802	6,00E-03	65	1,27E-02	6,02E+07	1,41E+08	1,80E+07	5115500	7,07E-03	-1,31E-02	0,31
	166377	6,10E-03	65	1,27E-02	6,05E+07	7,62E+07	2,51E+07	5053400	8,78E-03	-1,99E-02	0,33
9	166377	6,10E-03	65	1,27E-02	6,05E+07	7,62E+07	2,51E+07	5053400	8,78E-03	-1,99E-02	0,33
	177818	6,19E-03	65	1,27E-02	6,00E+07	2,86E+07	3,24E+07	4941400	1,01E-02	-2,38E-02	0,35
	177393	6,29E-03	65	1,27E-02	5,92E+07	2,25E+07	3,07E+07	4809900	8,70E-03	-1,19E-02	0,38
10	177393	6,29E-03	65	1,27E-02	5,92E+07	2,25E+07	3,07E+07	4809900	8,70E-03	-1,19E-02	0,38
	178736	6,38E-03	65	1,27E-02	5,84E+07	1,66E+07	2,89E+07	4676200	1,27E-02	6,16E-03	0,40
	178311	6,48E-03	65	1,27E-02	5,75E+07	1,10E+07	2,73E+07	4540200	9,54E-03	1,24E-02	0,42
11	178311	6,48E-03	65	1,27E-02	5,75E+07	1,10E+07	2,73E+07	4540200	9,54E-03	1,24E-02	0,42
	179195	6,57E-03	65	1,27E-02	5,65E+07	5,42E+06	2,56E+07	4402100	1,46E-02	4,60E-02	0,44
	167754	6,67E-03	65	1,27E-02	5,55E+07	-2,80E+06	1,52E+07	4253200	1,54E-02	6,44E-02	0,46
12	167754	6,67E-03	65	1,27E-02	5,55E+07	-2,80E+06	1,52E+07	4253200	1,54E-02	6,44E-02	0,46
	168179	6,76E-03	65	1,27E-02	5,42E+07	-2,37E+07	4,73E+06	4086700	7,93E-03	-2,54E-02	0,48
	167329	6,86E-03	65	1,27E-02	5,28E+07	-4,18E+07	3143900	3912000	1,34E-02	-6,71E-02	0,50
13	167329	6,86E-03	65	1,27E-02	5,28E+07	-4,18E+07	3143900	3912000	1,34E-02	-6,71E-02	0,50
	169097	6,95E-03	65	1,27E-02	5,12E+07	-5,94E+07	1559000	3738600	2,06E-02	-2,14E-02	0,52
	168672	7,05E-03	65	1,27E-02	4,96E+07	-4,82E+07	8,02E+06	3583700	2,06E-02	-8,82E-02	0,54
14	168672	7,05E-03	65	1,27E-02	4,96E+07	-4,82E+07	8,02E+06	3583700	2,06E-02	-8,82E-02	0,54
	180113	7,14E-03	65	1,27E-02	4,84E+07	-2,50E+07	1,47E+07	3450200	3,13E-02	-8,31E-02	0,56
	179688	7,24E-03	65	1,27E-02	4,72E+07	-2,97E+07	1,31E+07	3326700	2,89E-02	-1,08E-02	0,58
15	179688	7,24E-03	65	1,27E-02	4,72E+07	-2,97E+07	1,31E+07	3326700	2,89E-02	-1,08E-02	0,58
	181031	7,33E-03	65	1,27E-02	4,61E+07	-3,43E+07	1,15E+07	3206700	3,29E-02	-3,55E-02	0,60
	180606	7,43E-03	65	1,27E-02	4,49E+07	-3,87E+07	9,98E+06	3089500	3,43E-02	-3,85E-02	0,63
16	180606	7,43E-03	65	1,27E-02	4,49E+07	-3,87E+07	9,98E+06	3089500	3,43E-02	-3,85E-02	0,63
	181490	7,52E-03	65	1,27E-02	4,37E+07	-4,31E+07	8,42E+06	2974300	3,12E-02	-2,55E-02	0,65
	170049	7,62E-03	65	1,27E-02	4,19E+07	-1,11E+08	-6,88E+05	2853800	4,10E-02	9,17E-05	0,67
17	170049	7,62E-03	65	1,27E-02	4,19E+07	-1,11E+08	-6,88E+05	2853800	4,10E-02	9,17E-05	0,67
	170474	7,72E-03	65	1,27E-02	3,93E+07	-1,87E+08	-9,96E+06	2725400	2,92E-02	-6,16E-04	0,69
	169624	7,81E-03	65	1,27E-02	3,63E+07	-2,02E+08	-1,16E+07	2592200	3,97E-02	7,80E-03	0,71
18	169624	7,81E-03	65	1,27E-02	3,63E+07	-2,02E+08	-1,16E+07	2592200	3,97E-02	7,80E-03	0,71
	171392	7,91E-03	65	1,27E-02	3,33E+07	-2,16E+08	-1,32E+07	2455400	5,59E-02	-1,13E-04	0,73
	170967	8,00E-03	65	1,27E-02	3,08E+07	-1,47E+08	-9,69E+06	2326200	3,90E-02	-1,72E-02	0,75

19	170967 8,00E-03	65 1,27E-02 3,08E+07 -1,47E+08	-9,69E+06 2326200	3,90E-02 -1,72E-02	0,75
	182408 8,10E-03	65 1,27E-02 2,92E+07 -6,79E+07	-5,98E+06 2210000	4,97E-02 -8,33E-03	0,77
	181983 8,19E-03	65 1,27E-02 2,80E+07 -7,17E+07	-7,51E+06 2097400	4,83E-02 -2,42E-02	0,79
20	181983 8,19E-03	65 1,27E-02 2,80E+07 -7,17E+07	-7,51E+06 2097400	4,83E-02 -2,42E-02	0,79
	183326 8,29E-03	65 1,27E-02 2,68E+07 -7,55E+07	-9,07E+06 1982900	4,87E-02 -4,37E-02	0,81
	182901 8,38E-03	65 1,27E-02 2,55E+07 -7,91E+07	-1,06E+07 1866100	4,33E-02 -7,20E-02	0,83
21	182901 8,38E-03	65 1,27E-02 2,55E+07 -7,91E+07	-1,06E+07 1866100	4,33E-02 -7,20E-02	0,83
	183785 8,48E-03	65 1,27E-02 2,43E+07 -8,27E+07	-1,22E+07 1746300	4,00E-02 -7,27E-02	0,85
	172344 8,57E-03	65 1,27E-02 2,22E+07 -1,98E+08	-1,80E+07 1594000	3,55E-02 -4,27E-02	0,88
22	172344 8,57E-03	65 1,27E-02 2,22E+07 -1,98E+08	-1,80E+07 1594000	3,55E-02 -4,27E-02	0,88
	172769 8,67E-03	65 1,27E-02 1,88E+07 -3,21E+08	-2,38E+07 1388300	2,26E-02 -1,49E-02	0,90
	171919 8,76E-03	65 1,27E-02 1,50E+07 -3,33E+08	-2,55E+07 1151000	2,10E-03 2,11E-02	0,92
23	171919 8,76E-03	65 1,27E-02 1,50E+07 -3,33E+08	-2,55E+07 1151000	2,10E-03 2,11E-02	0,92
	173687 8,86E-03	65 1,27E-02 1,11E+07 -3,45E+08	-2,72E+07 892980	3,13E-02 3,29E-02	0,94
	173262 8,95E-03	65 1,27E-02 7,18E+06 -3,57E+08	-2,89E+07 606980	5,27E-02 2,02E-02	0,96
24	173262 8,95E-03	65 1,27E-02 7,18E+06 -3,57E+08	-2,89E+07 606980	5,27E-02 2,02E-02	0,96
	174605 9,05E-03	65 1,27E-02 3,24E+06 -3,69E+08	-3,06E+07 286790	6,45E-02 2,70E-02	0,98
	174180 9,14E-03	65 1,27E-02 1,26E+06 -3,80E+08	-3,17E+07 122120	7,49E-02 3,16E-02	1,00

## Anexo G – Implementação da *Multilayer Theory* para o provete de Ko e Jackson (1989)

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Contem os dados, as matrizes dos coeficientes das constantes arbitrárias, vectores de carga e vectores das constantes arbitrárias, para os dois casos de carga, forças e momentos, nos extremos do elemento curvo.

Numerical Example Validation												
Empilhamento: $[0_{25} / (+/-15)_4 / 0_{25}] \rightarrow N = 3$												
$[X]*[ABD]=[P] \rightarrow [ABD]=[X]^{-1}*[P]$												
<b>Geometria</b>					<b>Material</b>							
<b>e [m]</b>	=	0,009525	<b>espessura da lâmina [m]</b>		=	1,51E-04	<b>número total de camadas</b>		=	54		
<b>a [m]</b>	=	0,02159	<b>espessura total da lâmina [m]</b>		=	8,13E-03	<b><math>G_{LT}</math> [Pa]</b>		=	4,14E+09		
<b>h [m]</b>	=	0,0254	<b><math>v_{LT}</math></b>		=	3,30E-01	<b><math>E_L</math> [Pa]</b>		=	1,72E+11		
<b>b [m]</b>	=	0,029724	<b><math>0^\circ</math></b>		<b><math>E_T</math> [Pa]</b>		=	8,27E+09	<b><math>E_r</math> [Pa]</b>		=	8,27E+09
<b>graus</b>	=	<b>radianos</b>	<b><math>E_r</math> [Pa]</b>		=	8,27E+09	<b><math>E_\theta</math> [Pa]</b>		=	4,89E+10		
90	=	1,570796327	<b><math>E_\theta</math> [Pa]</b>		=	1,72E+11	<b><math>v_{r\theta}</math></b>		=	0,016		
			<b><math>v_{\theta r}</math></b>		=	0,330	<b><math>v_{\theta r}</math></b>		=	0,330		
			<b><math>G_{r\theta}</math> [Pa]</b>		=	4,14E+09	<b><math>G_{r\theta}</math> [Pa]</b>		=	4,14E+09		
<b>Carga</b>												
<b>P [N]</b>	=	1										
<b>Momento</b>												
<b>M [N.m]</b>	=	0,009525										
<b>Camada (i)</b>		<b><math>a_i</math> [m]</b>	<b><math>E_r</math></b>	<b><math>E_\theta</math></b>	<b><math>v_{r\theta}</math></b>	<b><math>v_{\theta r}</math></b>	<b><math>G_{r\theta}</math></b>	<b><math>\beta_i</math></b>	<b>k (i)</b>	<b>Camada (i)</b>		
0		0,02159								0		
1	$0^\circ \times 25$	0,025355	8,27E+09	1,72E+11	0,016	0,330	4,14E+09	7,92703125454384	4,56428	1		
2	$(\pm 15^\circ) \times 4$	0,025957	8,27E+09	4,89E+10	0,056	0,330	4,14E+09	4,24975876976097	2,43039	2		
3	$0^\circ \times 25$	0,029722	8,27E+09	1,72E+11	0,016	0,330	4,14E+09	7,92703125454384	4,56428	3		

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

		A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>
[X] =	Equação (43), $\sigma_r^{(1)}$	4,95084E-13	-1,26923E+14	1	0	0	0	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(1)}$	1,77041E-12	-3,54934E+13	1	-7,01487E-07	25745950,35	-1	0	0	0
	Equação (44), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	7,75098E-07	-23300846,29	1	-2,1326E-12	2,94654E+13	-1
	Equação (45), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0	6,2402E-12	-1,00698E+13	1
	Equação (46), $\sigma_r^{(1)}$	2,31757E-23	600,535424	-4,371E-10	-1,40987E-17	-0,000865134	4,19323E-10	0	0	0
	Equação (46), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	1,55782E-17	0,000782972	-4,16644E-10	-2,79171E-23	-498,5424424	4,34307E-10
	Equação (47), $\sigma_r^{(1)}$	8,83003E-23	1494,335133	3,88701E-12	-7,06146E-17	-0,001885792	-1,3709E-11	0	0	0
	Equação (47), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	7,80246E-17	0,001706697	1,3709E-11	-1,06365E-22	-1240,542118	-3,88701E-12
	Equação (48), Sum $i=1$ a $N=9$	1,60883E-13	-1,1534E+13	0,160745705	1,73213E-08	-575351,2601	0,023480783	5,18177E-13	-2,44676E+12	0,135444238

[P]	=	0
		0
		0
		0
		0
		0
		0
		0
		1

[ABD]	=	-1,39106E+12	A <sub>1</sub>
		6,95248E-14	B <sub>1</sub>
		9,513029148	D <sub>1</sub>
		-4190720,964	A <sub>2</sub>
		9,41785E-08	B <sub>2</sub>
		9,947056443	D <sub>2</sub>
		-1,41507E+12	A <sub>3</sub>
		6,74459E-14	B <sub>3</sub>
		9,509488964	D <sub>3</sub>

(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\tau_{r\theta}$	(r-a)/t
1	0,021590	0,000	2987,100	-1,49729E-28	0
	0,021741	19,966	2799,651	-1,22308E-15	0,018518519
2	0,021741	19,966	2799,651	-1,22308E-15	0,018518519
	0,021891	38,274	2622,977	-2,34457E-15	0,037037037
3	0,021891	38,274	2622,977	-2,34457E-15	0,037037037
	0,022042	55,039	2456,233	-3,37156E-15	0,055555556
4	0,022042	55,039	2456,233	-3,37156E-15	0,055555556
	0,022192	70,368	2298,640	-4,31057E-15	0,074074074
5	0,022192	70,368	2298,640	-4,31057E-15	0,074074074
	0,022343	84,358	2149,477	-5,16755E-15	0,092592593
6	0,022343	84,358	2149,477	-5,16755E-15	0,092592593
	0,022494	97,099	2008,076	-5,94802E-15	0,111111111
7	0,022494	97,099	2008,076	-5,94802E-15	0,111111111
	0,022644	108,673	1873,822	-6,65703E-15	0,12962963
8	0,022644	108,673	1873,822	-6,65703E-15	0,12962963
	0,022795	119,157	1746,139	-7,29922E-15	0,148148148
9	0,022795	119,157	1746,139	-7,29922E-15	0,148148148
	0,022945	128,619	1624,497	-7,87887E-15	0,166666667
10	0,022945	128,619	1624,497	-7,87887E-15	0,166666667
	0,023096	137,125	1508,403	-8,39991E-15	0,185185185
11	0,023096	137,125	1508,403	-8,39991E-15	0,185185185
	0,023247	144,733	1397,396	-8,86596E-15	0,203703704
12	0,023247	144,733	1397,396	-8,86596E-15	0,203703704
	0,023397	151,497	1291,050	-9,28033E-15	0,222222222
13	0,023397	151,497	1291,050	-9,28033E-15	0,222222222
	0,023548	157,468	1188,966	-9,6461E-15	0,240740741
14	0,023548	157,468	1188,966	-9,6461E-15	0,240740741
	0,023698	162,692	1090,773	-9,96607E-15	0,259259259
15	0,023698	162,692	1090,773	-9,96607E-15	0,259259259
	0,023849	167,210	996,125	-1,02428E-14	0,277777778
16	0,023849	167,210	996,125	-1,02428E-14	0,277777778
	0,024000	171,061	904,697	-1,04788E-14	0,296296296
17	0,024000	171,061	904,697	-1,04788E-14	0,296296296
	0,024150	174,281	816,185	-1,0676E-14	0,314814815
18	0,024150	174,281	816,185	-1,0676E-14	0,314814815
	0,024301	176,904	730,306	-1,08367E-14	0,333333333
19	0,024301	176,904	730,306	-1,08367E-14	0,333333333
	0,024451	178,958	646,791	-1,09625E-14	0,351851852
20	0,024451	178,958	646,791	-1,09625E-14	0,351851852
	0,024602	180,471	565,390	-1,10552E-14	0,37037037
21	0,024602	180,471	565,390	-1,10552E-14	0,37037037
	0,024753	181,469	485,867	-1,11163E-14	0,388888889
22	0,024753	181,469	485,867	-1,11163E-14	0,388888889
	0,024903	181,974	407,999	-1,11473E-14	0,407407407
23	0,024903	181,974	407,999	-1,11473E-14	0,407407407
	0,025054	182,008	331,576	-1,11494E-14	0,425925926
24	0,025054	182,008	331,576	-1,11494E-14	0,425925926
	0,025204	181,590	256,398	-1,11237E-14	0,444444444
25	0,025204	181,590	256,398	-1,11237E-14	0,444444444
	0,025355	180,738	182,278	-1,10715E-14	0,462962963
26	0,025355	180,738	94,415	-1,10715E-14	0,462962963
	0,025506	179,096	70,758	-1,09709E-14	0,481481481
27	0,025506	179,096	70,758	-1,09709E-14	0,481481481
	0,025656	177,345	47,314	-1,08637E-14	0,5
28	0,025656	177,345	47,314	-1,08637E-14	0,5
	0,025807	175,488	24,068	-1,075E-14	0,518518519
29	0,025807	175,488	24,068	-1,075E-14	0,518518519
	0,025957	173,530	1,005	-1,063E-14	0,537037037

30	0,025957	173,530	-671,496	-1,063E-14	0,537037037
	0,026108	170,517	-716,043	-1,04454E-14	0,555555556
31	0,026108	170,517	-716,043	-1,04454E-14	0,555555556
	0,026259	167,148	-762,043	-1,02391E-14	0,574074074
32	0,026259	167,148	-762,043	-1,02391E-14	0,574074074
	0,026409	163,432	-809,536	-1,00114E-14	0,592592593
33	0,026409	163,432	-809,536	-1,00114E-14	0,592592593
	0,026560	159,375	-858,568	-9,76289E-15	0,611111111
34	0,026560	159,375	-858,568	-9,76289E-15	0,611111111
	0,026710	154,983	-909,183	-9,49385E-15	0,62962963
35	0,026710	154,983	-909,183	-9,49385E-15	0,62962963
	0,026861	150,262	-961,427	-9,20464E-15	0,648148148
36	0,026861	150,262	-961,427	-9,20464E-15	0,648148148
	0,027012	145,215	-1015,347	-8,8955E-15	0,666666667
37	0,027012	145,215	-1015,347	-8,8955E-15	0,666666667
	0,027162	139,847	-1070,989	-8,56668E-15	0,685185185
38	0,027162	139,847	-1070,989	-8,56668E-15	0,685185185
	0,027313	134,161	-1128,404	-8,21834E-15	0,703703704
39	0,027313	134,161	-1128,404	-8,21834E-15	0,703703704
	0,027463	128,158	-1187,641	-7,85062E-15	0,722222222
40	0,027463	128,158	-1187,641	-7,85062E-15	0,722222222
	0,027614	121,840	-1248,751	-7,46363E-15	0,740740741
41	0,027614	121,840	-1248,751	-7,46363E-15	0,740740741
	0,027765	115,209	-1311,786	-7,05742E-15	0,759259259
42	0,027765	115,209	-1311,786	-7,05742E-15	0,759259259
3	0,027915	108,265	-1376,799	-6,63203E-15	0,777777778
43	0,027915	108,265	-1376,799	-6,63203E-15	0,777777778
	0,028066	101,007	-1443,845	-6,18745E-15	0,796296296
44	0,028066	101,007	-1443,845	-6,18745E-15	0,796296296
	0,028216	93,436	-1512,979	-5,72363E-15	0,814814815
45	0,028216	93,436	-1512,979	-5,72363E-15	0,814814815
	0,028367	85,549	-1584,257	-5,24053E-15	0,833333333
46	0,028367	85,549	-1584,257	-5,24053E-15	0,833333333
	0,028518	77,346	-1657,738	-4,73803E-15	0,851851852
47	0,028518	77,346	-1657,738	-4,73803E-15	0,851851852
	0,028668	68,825	-1733,480	-4,21602E-15	0,87037037
48	0,028668	68,825	-1733,480	-4,21602E-15	0,87037037
	0,028819	59,982	-1811,544	-3,67435E-15	0,888888889
49	0,028819	59,982	-1811,544	-3,67435E-15	0,888888889
	0,028969	50,816	-1891,991	-3,11284E-15	0,907407407
50	0,028969	50,816	-1891,991	-3,11284E-15	0,907407407
	0,029120	41,322	-1974,884	-2,5313E-15	0,925925926
51	0,029120	41,322	-1974,884	-2,5313E-15	0,925925926
	0,029271	31,498	-2060,287	-1,9295E-15	0,944444444
52	0,029271	31,498	-2060,287	-1,9295E-15	0,944444444
	0,029421	21,339	-2148,266	-1,3072E-15	0,962962963
53	0,029421	21,339	-2148,266	-1,3072E-15	0,962962963
	0,029572	10,842	-2238,886	-6,64125E-16	0,981481481
54	0,029572	10,842	-2238,886	-6,64125E-16	0,981481481
	0,029722	0,000	-2332,216	-6,96416E-30	1

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

	B' <sub>1</sub>	C' <sub>1</sub>	D' <sub>1</sub>	B' <sub>2</sub>	C' <sub>2</sub>	D' <sub>2</sub>	B' <sub>3</sub>	C' <sub>3</sub>	D' <sub>3</sub>
[X] = Equação (49), $\sigma_r^{(1)}$	2	6,43023E-06	-6616799180	0	0	0	0	0	0
Equação (50), $\sigma_r^{(1)}$	2	1,14039E-05	-2705206923	-2	-0,017886514	426723,8148	0	0	0
Equação (50), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	2	0,018497467	-393699,7858	-2	-1,23994E-05	2373877905
Equação (51), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0	2	2,00937E-05	-1117256193
Equação (52), $\sigma_r^{(1)}$	6,03175E-12	7,1029E-18	0,001947571	-5,78643E-12	-1,94904E-14	-6,111E-07	0	0	0
Equação (52), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	5,92391E-12	2,0635E-14	5,77E-07	-6,17506E-12	-7,90643E-18	-0,00174964
Equação (53), $\sigma_r^{(1)}$	-5,83464E-12	0	0	5,09125E-12	0	0	0	0	0
Equação (53), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	-5,21221E-12	0	0	5,97327E-12	0	0
Equação (54), Sum i=1 a N=9	0,000176748	3,55507E-09	1722565,01	3,09106E-05	6,83362E-07	15,39538564	0,000209634	7,70791E-09	784317,9491

[M]	=	0	[B'C'D']	=	165,5752413	B' <sub>1</sub>
		0			-14540206,02	C' <sub>1</sub>
		0			3,59167E-08	D' <sub>1</sub>
		0			189,7515118	B' <sub>2</sub>
		0			-12824,44094	C' <sub>2</sub>
		0			0,000192032	D' <sub>2</sub>
		0			165,5752413	B' <sub>3</sub>
		0			-14495663,64	C' <sub>3</sub>
		-0,009525			3,5694E-08	D' <sub>3</sub>

(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\tau_{r\theta}$	(r-a)/t
1	0,021590	0,000	989,1213696	0	0
	0,021741	6,671	937,2619295	0	0,018518519
2	0,021741	6,671	937,2619295	0	0,018518519
	0,021891	12,899	887,0401372	0	0,037037037
3	0,021891	12,899	887,0401372	0	0,037037037
	0,022042	18,705	838,3608217	0	0,055555556
4	0,022042	18,705	838,3608217	0	0,055555556
	0,022192	24,106	791,134131	0	0,074074074
5	0,022192	24,106	791,134131	0	0,074074074
	0,022343	29,121	745,275193	0	0,092592593
6	0,022343	29,121	745,275193	0	0,092592593
	0,022494	33,766	700,7038021	0	0,111111111
7	0,022494	33,766	700,7038021	0	0,111111111
	0,022644	38,057	657,3441255	0	0,12962963
8	0,022644	38,057	657,3441255	0	0,12962963
	0,022795	42,008	615,124431	0	0,148148148
9	0,022795	42,008	615,124431	0	0,148148148
	0,022945	45,634	573,9768328	0	0,166666667
10	0,022945	45,634	573,9768328	0	0,166666667
	0,023096	48,948	533,8370548	0	0,185185185
11	0,023096	48,948	533,8370548	0	0,185185185
	0,023247	51,962	494,6442097	0	0,203703704
12	0,023247	51,962	494,6442097	0	0,203703704
	0,023397	54,687	456,3405929	0	0,222222222
13	0,023397	54,687	456,3405929	0	0,222222222
	0,023548	57,136	418,8714906	0	0,240740741
14	0,023548	57,136	418,8714906	0	0,240740741
	0,023698	59,318	382,1849997	0	0,259259259
15	0,023698	59,318	382,1849997	0	0,259259259
	0,023849	61,242	346,2318601	0	0,277777778
16	0,023849	61,242	346,2318601	0	0,277777778
	0,024000	62,920	310,9652982	0	0,296296296
17	0,024000	62,920	310,9652982	0	0,296296296
	0,024150	64,358	276,3408802	0	0,314814815
18	0,024150	64,358	276,3408802	0	0,314814815
	0,024301	65,566	242,3163745	0	0,333333333
19	0,024301	65,566	242,3163745	0	0,333333333
	0,024451	66,552	208,8516241	0	0,351851852
20	0,024451	66,552	208,8516241	0	0,351851852
	0,024602	67,322	175,9084257	0	0,37037037
21	0,024602	67,322	175,9084257	0	0,37037037
	0,024753	67,883	143,4504176	0	0,388888889
22	0,024753	67,883	143,4504176	0	0,388888889
	0,024903	68,243	111,4429739	0	0,407407407
23	0,024903	68,243	111,4429739	0	0,407407407
	0,025054	68,408	79,85310603	0	0,425925926
24	0,025054	68,408	79,85310603	0	0,425925926
	0,025204	68,383	48,64936979	0	0,444444444
25	0,025204	68,383	48,64936979	0	0,444444444
	0,025355	68,174	17,80177844	0	0,462962963
26	0,025355	68,174	21,16598713	0	0,462962963
	0,025506	67,870	12,4183439	0	0,481481481
27	0,025506	67,870	12,4183439	0	0,481481481
	0,025656	67,519	3,762048151	0	0,5
28	0,025656	67,519	3,762048151	0	0,5
	0,025807	67,122	-4,806113706	0	0,518518519
29	0,025807	67,122	-4,806113706	0	0,518518519
	0,025957	66,680	-13,28923511	0	0,537037037

30	0,025957	66,680	-102,4721633	0	0,537037037
	0,026108	65,620	-102,4721633	0	0,555555556
31	0,026108	65,620	-131,8143166	0	0,555555556
	0,026259	64,404	-131,8143166	0	0,574074074
32	0,026259	64,404	-160,9559342	0	0,574074074
	0,026409	63,036	-160,9559342	0	0,592592593
33	0,026409	63,036	-189,9187	0	0,592592593
	0,026560	61,520	-189,9187	0	0,611111111
34	0,026560	61,520	-218,7233761	0	0,611111111
	0,026710	59,859	-218,7233761	0	0,62962963
35	0,026710	59,859	-247,3898525	0	0,62962963
	0,026861	58,056	-247,3898525	0	0,648148148
36	0,026861	58,056	-275,9371935	0	0,648148148
	0,027012	56,115	-275,9371935	0	0,666666667
37	0,027012	56,115	-304,3836818	0	0,666666667
	0,027162	54,037	-304,3836818	0	0,685185185
38	0,027162	54,037	-332,7468594	0	0,685185185
	0,027313	51,827	-332,7468594	0	0,703703704
39	0,027313	51,827	-361,0435669	0	0,703703704
	0,027463	49,485	-361,0435669	0	0,722222222
40	0,027463	49,485	-389,2899798	0	0,722222222
	0,027614	47,015	-389,2899798	0	0,740740741
41	0,027614	47,015	-417,5016437	0	0,740740741
	0,027765	44,419	-417,5016437	0	0,759259259
42	0,027765	44,419	-445,6935062	0	0,759259259
3	0,027915	41,699	-445,6935062	0	0,777777778
	0,027915	41,699	-473,8799485	0	0,777777778
43	0,028066	38,857	-473,8799485	0	0,796296296
	0,028066	38,857	-502,0748139	0	0,796296296
44	0,028216	35,894	-502,0748139	0	0,814814815
	0,028216	35,894	-530,2914354	0	0,814814815
45	0,028367	32,814	-530,2914354	0	0,833333333
	0,028367	32,814	-558,5426618	0	0,833333333
46	0,028518	29,616	-558,5426618	0	0,851851852
	0,028518	29,616	-586,8408822	0	0,851851852
47	0,028668	26,303	-586,8408822	0	0,87037037
	0,028668	26,303	-615,1980489	0	0,87037037
48	0,028819	22,877	-615,1980489	0	0,888888889
	0,028819	22,877	-643,6256996	0	0,888888889
49	0,028969	19,338	-643,6256996	0	0,907407407
	0,028969	19,338	-672,134978	0	0,907407407
50	0,029120	15,688	-672,134978	0	0,925925926
	0,029120	15,688	-700,7366534	0	0,925925926
51	0,029271	11,928	-700,7366534	0	0,944444444
	0,029271	11,928	-729,4411392	0	0,944444444
52	0,029421	8,059	-729,4411392	0	0,962962963
	0,029421	8,059	-758,2585105	0	0,962962963
53	0,029572	4,083	-758,2585105	0	0,981481481
	0,029572	4,083	-787,1985207	0	0,981481481
54	0,029722	0,000	-787,1985207	0	1

(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	(r-a)/t
1	0,021590	0,000	3976,221	0
	0,021741	26,637	3736,913	0,018519
2	0,021741	26,637	3736,913	0,018519
	0,021891	51,174	3510,017	0,037037
3	0,021891	51,174	3510,017	0,037037
	0,022042	73,744	3294,593	0,055556
4	0,022042	73,744	3294,593	0,055556
	0,022192	94,474	3089,774	0,074074
5	0,022192	94,474	3089,774	0,074074
	0,022343	113,479	2894,752	0,092593
6	0,022343	113,479	2894,752	0,092593
	0,022494	130,865	2708,78	0,111111
7	0,022494	130,865	2708,78	0,111111
	0,022644	146,730	2531,166	0,12963
8	0,022644	146,730	2531,166	0,12963
	0,022795	161,165	2361,263	0,148148
9	0,022795	161,165	2361,263	0,148148
	0,022945	174,253	2198,474	0,166667
10	0,022945	174,253	2198,474	0,166667
	0,023096	186,072	2042,24	0,185185
11	0,023096	186,072	2042,24	0,185185
	0,023247	196,694	1892,04	0,203704
12	0,023247	196,694	1892,04	0,203704
	0,023397	206,184	1747,39	0,222222
13	0,023397	206,184	1747,39	0,222222
	0,023548	214,604	1607,837	0,240741
14	0,023548	214,604	1607,837	0,240741
	0,023698	222,009	1472,958	0,259259
15	0,023698	222,009	1472,958	0,259259
	0,023849	228,452	1342,357	0,277778
16	0,023849	228,452	1342,357	0,277778
	0,024000	233,981	1215,662	0,296296
17	0,024000	233,981	1215,662	0,296296
	0,024150	238,640	1092,526	0,314815
18	0,024150	238,640	1092,526	0,314815
	0,024301	242,470	972,6221	0,333333
19	0,024301	242,470	972,6221	0,333333
	0,024451	245,509	855,6427	0,351852
20	0,024451	245,509	855,6427	0,351852
	0,024602	247,793	741,2986	0,37037
21	0,024602	247,793	741,2986	0,37037
	0,024753	249,352	629,3175	0,388889
22	0,024753	249,352	629,3175	0,388889
	0,024903	250,217	519,4419	0,407407
23	0,024903	250,217	519,4419	0,407407
	0,025054	250,416	411,4287	0,425926
24	0,025054	250,416	411,4287	0,425926
	0,025204	249,973	305,0475	0,444444
25	0,025204	249,973	305,0475	0,444444
	0,025355	248,912	200,0802	0,462963

26	0,025355	248,912	115,581	0,462963
	0,025506	246,966	83,17608	0,481481
27	0,025506	246,966	83,17608	0,481481
	0,025656	244,864	51,07621	0,5
28	0,025656	244,864	51,07621	0,5
	0,025807	242,611	19,26214	0,518519
29	0,025807	242,611	19,26214	0,518519
	0,025957	240,211	-12,2846	0,537037
30	0,025957	240,211	-773,968	0,537037
	0,026108	236,137	-818,516	0,555556
31	0,026108	236,137	-847,858	0,555556
	0,026259	231,552	-893,857	0,574074
32	0,026259	231,552	-922,999	0,574074
	0,026409	226,468	-970,492	0,592593
33	0,026409	226,468	-999,455	0,592593
	0,026560	220,895	-1048,49	0,611111
34	0,026560	220,895	-1077,29	0,611111
	0,026710	214,842	-1127,91	0,62963
35	0,026710	214,842	-1156,57	0,62963
	0,026861	208,318	-1208,82	0,648148
36	0,026861	208,318	-1237,36	0,648148
	0,027012	201,330	-1291,28	0,666667
37	0,027012	201,330	-1319,73	0,666667
	0,027162	193,885	-1375,37	0,685185
38	0,027162	193,885	-1403,74	0,685185
	0,027313	185,987	-1461,15	0,703704
39	0,027313	185,987	-1489,45	0,703704
	0,027463	177,643	-1548,68	0,722222
40	0,027463	177,643	-1576,93	0,722222
	0,027614	168,856	-1638,04	0,740741
41	0,027614	168,856	-1666,25	0,740741
	0,027765	159,628	-1729,29	0,759259
42	0,027765	159,628	-1757,48	0,759259
	0,027915	149,964	-1822,49	0,777778
43	0,027915	149,964	-1850,68	0,777778
	0,028066	139,864	-1917,72	0,796296
44	0,028066	139,864	-1945,92	0,796296
	0,028216	129,330	-2015,05	0,814815
45	0,028216	129,330	-2043,27	0,814815
	0,028367	118,363	-2114,55	0,833333
46	0,028367	118,363	-2142,8	0,833333
	0,028518	106,962	-2216,28	0,851852
47	0,028518	106,962	-2244,58	0,851852
	0,028668	95,128	-2320,32	0,87037
48	0,028668	95,128	-2348,68	0,87037
	0,028819	82,859	-2426,74	0,888889
49	0,028819	82,859	-2455,17	0,888889
	0,028969	70,153	-2535,62	0,907407
50	0,028969	70,153	-2564,13	0,907407
	0,029120	57,010	-2647,02	0,925926
51	0,029120	57,010	-2675,62	0,925926
	0,029271	43,426	-2761,02	0,944444
52	0,029271	43,426	-2789,73	0,944444
	0,029421	29,399	-2877,71	0,962963
53	0,029421	29,399	-2906,52	0,962963
	0,029572	14,924	-2997,14	0,981481
54	0,029572	14,924	-3026,08	0,981481
	0,029722	0,000	-3119,41	1

Anexo H – Tensões a  $\theta = 90^\circ$  e a meio da espessura, retiradas do cálculo numérico em ANSYS 3D, para o provete de Ko e Jackson (1989)

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Camada	NODE	Coordenadas [m]			Tensões [N/m <sup>2</sup> ]		Tensões [N/m]		(r-a)/t
		X	Y	Z	SX	SY	SX	SY	
1	14058	2,16E-02	0	1,27E-02	978,24	1,57E+05	24,8473	3,98E+03	0,00
	14523	2,18E-02	0	1,27E-02	1762,3	1,41E+05	44,76242	3,58E+03	0,03
	14538	2,21E-02	0	1,27E-02	3237,5	1,27E+05	82,2325	3,22E+03	0,06
	14553	2,23E-02	0	1,27E-02	4514,7	1,14E+05	114,6734	2,89E+03	0,09
	14568	2,26E-02	0	1,27E-02	5614,3	1,02E+05	142,6032	2,58E+03	0,12
	14583	2,28E-02	0	1,27E-02	6553,8	90582	166,4665	2,30E+03	0,15
	14598	2,31E-02	0	1,27E-02	7348,7	80184	186,657	2,04E+03	0,19
	14613	2,33E-02	0	1,27E-02	8012,4	70448	203,515	1,79E+03	0,22
	14628	2,36E-02	0	1,27E-02	8556,6	61287	217,3376	1,56E+03	0,25
	14643	2,38E-02	0	1,27E-02	8991,9	52621	228,3943	1,34E+03	0,28
	14658	2,41E-02	0	1,27E-02	9327,1	44380	236,9083	1,13E+03	0,31
	14673	2,44E-02	0	1,27E-02	9570,1	36501	243,0805	9,27E+02	0,34
	14688	2,46E-02	0	1,27E-02	9727,9	28928	247,0887	7,35E+02	0,37
	14703	2,49E-02	0	1,27E-02	9806,4	21609	249,0826	5,49E+02	0,40
	14718	2,51E-02	0	1,27E-02	9811	14498	249,1994	3,68E+02	0,43
14508	2,54E-02	0	1,27E-02	9754,9	6086,4	247,7745	1,55E+02	0,46	
2	14508	2,54E-02	0	1,27E-02	9754,9	6086,4	247,7745	1,55E+02	0,46
	29598	2,55E-02	0	1,27E-02	9676	3417,1	245,7704	8,68E+01	0,48
	29613	2,57E-02	0	1,27E-02	9592,3	2226,8	243,6444	5,66E+01	0,50
	29628	2,58E-02	0	1,27E-02	9503	1046,6	241,3762	2,66E+01	0,52
	22218	2,60E-02	0	1,27E-02	9363,9	-4459,4	237,8431	-1,13E+02	0,54
3	22218	2,60E-02	0	1,27E-02	9363,9	-4459,4	237,8431	-1,13E+02	0,54
	22683	2,62E-02	0	1,27E-02	9116,1	-15406	231,5489	-3,91E+02	0,57
	22698	2,65E-02	0	1,27E-02	8783	-22025	223,0882	-5,59E+02	0,60
	22713	2,67E-02	0	1,27E-02	8396,4	-28655	213,2686	-7,28E+02	0,63
	22728	2,70E-02	0	1,27E-02	7957,8	-35323	202,1281	-8,97E+02	0,66
	22743	2,72E-02	0	1,27E-02	7468,6	-42052	189,7024	-1,07E+03	0,69
	22758	2,75E-02	0	1,27E-02	6929,7	-48866	176,0144	-1,24E+03	0,72
	22773	2,77E-02	0	1,27E-02	6342	-55787	161,0868	-1,42E+03	0,75
	22788	2,80E-02	0	1,27E-02	5706,1	-62836	144,9349	-1,60E+03	0,78
	22803	2,82E-02	0	1,27E-02	5022,4	-70033	127,569	-1,78E+03	0,81
	22818	2,85E-02	0	1,27E-02	4290,9	-77400	108,9889	-1,97E+03	0,85
	22833	2,87E-02	0	1,27E-02	3511,6	-84955	89,19464	-2,16E+03	0,88
	22848	2,90E-02	0	1,27E-02	2684,5	-92717	68,1863	-2,36E+03	0,91
	22863	2,92E-02	0	1,27E-02	1809,1	-1,01E+05	45,95114	-2,56E+03	0,94
22878	2,95E-02	0	1,27E-02	885,01	-1,09E+05	22,47925	-2,77E+03	0,97	
22668	2,97E-02	0	1,27E-02	407,8	-1,17E+05	10,35812	-2,98E+03	1,00	

## Anexo I – Implementação da *Multilayer Theory* para o novo provete estudado: *Layup H*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Contem os dados, as matrizes dos coeficientes das constantes arbitrárias, vectores de carga e vectores das constantes arbitrárias, para os dois casos de carga, forças e momentos, nos extremos do elemento curvo.

<b>Layup H</b>										
Empilhamento: [90/0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90] → N = 9										
<b>Geometria</b>			<b>Material: Hercules AS4/3501-6 epoxy prepreg (WWFE)</b>							
e [m]	=	0,01	espessura da lâmina [m]		=	1,27E-04				
a [m]	=	0,02	número total de camadas		=	20				
h [m]	=	0,0254	espessura total da lâmina [m]		=	2,54E-03				
			E <sub>L</sub> [Pa]	=	1,26E+11	v <sub>LT</sub>	=	0,280		
			E <sub>T</sub> [Pa]	=	1,10E+10	v <sub>TL</sub>	=	0,024		
			E <sub>Z</sub> [Pa]	=	1,10E+10	G <sub>rθ</sub> [Pa]	=	6,60E+09		
			<b>90°</b>				<b>0°</b>			
			E <sub>r</sub> [Pa]	=	1,10E+10	E <sub>r</sub> [Pa]	=	1,10E+10		
			E <sub>θ</sub> [Pa]	=	1,26E+11	E <sub>θ</sub> [Pa]	=	1,10E+10		
			v <sub>rθ</sub>	=	0,280	v <sub>rθ</sub>	=	0,280		
			v <sub>θr</sub>	=	0,024	v <sub>θr</sub>	=	0,024		
			G <sub>rθ</sub> [Pa]	=	6,60E+09	G <sub>rθ</sub> [Pa]	=	6,60E+09		
<b>1 inch [m] = 2,54E-02</b>										
<b>1 lb-force [N] = 4,44822162</b>										
<b>graus</b>		<b>radianos</b>								
90		=		1,570796327						
<b>Carga</b>										
P [N]		=		100						
<b>Momento</b>										
M [N.m]		=		1						
Camada (i)		a <sub>i</sub> [m]	E <sub>r</sub>	E <sub>θ</sub>	v <sub>rθ</sub>	v <sub>θr</sub>	G <sub>rθ</sub>	β <sub>i</sub>	k (i)	Camada (i)
0		0,02								0
1	90	0,020127	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	1
2	0 x 3	0,020508	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	2
3	90 x 2	0,020762	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	3
4	0 x 3	0,021143	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	4
5	90 x 2	0,021397	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	5
6	0 x 3	0,021778	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	6
7	90 x 2	0,022032	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	7
8	0 x 3	0,022413	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	8
9	90	0,022540	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	9

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] = Equação (43), $\sigma_r^{(1)}$	1,49185E-08	-1688426793	1	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(1)}$	1,54001E-08	-1635630337	1	-0,001804739	1721,417913	-1
Equação (44), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	0,001865389	-1665,449056	1
Equação (44), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (45), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(1)}$	2,75412E-19	0,029882882	-3,54344E-10	-8,68216E-14	-9,04457E-08	3,4644E-10
Equação (46), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	8,97393E-14	8,75051E-08	-3,44776E-10
Equação (46), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(1)}$	7,30921E-19	0,05236138	7,72457E-12	-4,49249E-13	-1,23155E-07	-8,86921E-11
Equação (47), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	4,64346E-13	1,19151E-07	8,86921E-11
Equação (47), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (48), Sum i=1 a N=9	9,59493E-11	-10519629,25	0,006329924	3,44096E-05	-31,75382446	0,018752857

A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	B <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,69199E-08	1488710721	-1	0	0	0	0	0	0
1,79982E-08	-1399523351	1	-0,001906303	1629,704186	-1	0	0	0
0	0	0	0,001968393	-1578,297581	1	-1,97181E-08	1277450724	-1
0	0	0	0	0	0	2,0936E-08	-1203136781	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,02592E-19	-0,027198668	3,52643E-10	0	0	0	0	0	0
3,21875E-19	0,025569219	-3,51526E-10	-9,17076E-14	-8,5627E-08	3,43685E-10	0	0	0
0	0	0	9,46946E-14	8,2926E-08	-3,42072E-10	-3,52634E-19	-0,023338959	3,49876E-10
0	0	0	0	0	0	3,74415E-19	0,021981247	-3,48793E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8,03055E-19	-0,047658047	-7,72457E-12	0	0	0	0	0	0
8,54232E-19	0,044802895	7,72457E-12	-4,74531E-13	-1,16594E-07	-8,86921E-11	0	0	0
0	0	0	4,89987E-13	1,12916E-07	8,86921E-11	-9,35862E-19	-0,040894988	-7,72457E-12
0	0	0	0	0	0	9,93667E-19	0,038515978	7,72457E-12
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,14841E-10	-17770474,38	0,012309339	3,52267E-05	-29,1654391	0,018184489	2,4267E-10	-14806962,2	0,011941844

A <sub>6</sub>	B <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	B <sub>7</sub>	D <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	B <sub>8</sub>	D <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,002010264	1545,42392	-1	0	0	0	0	0	0
0,002073784	-1498,087628	1	-2,28751E-08	1101146169	-1	0	0	0
0	0	0	2,42459E-08	-1038891974	1	-0,002116605	1467,77997	-1
0	0	0	0	0	0	0,002181545	-1424,087317	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-9,67089E-14	-8,11988E-08	3,41012E-10	0	0	0	0	0	0
9,97647E-14	7,87117E-08	-3,39447E-10	-4,09094E-19	-0,020117884	3,47192E-10	0	0	0
0	0	0	4,33608E-19	0,018980503	-3,4614E-10	-1,01825E-13	-7,71192E-08	3,38418E-10
0	0	0	0	0	0	1,04949E-13	7,48236E-08	-3,36897E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5,0041E-13	-1,10564E-07	-8,86921E-11	0	0	0	0	0	0
5,16221E-13	1,07178E-07	8,86921E-11	-1,0857E-18	-0,035250956	-7,72457E-12	0	0	0
0	0	0	1,15076E-18	0,033258014	7,72457E-12	-5,26881E-13	-1,05009E-07	-8,86921E-11
0	0	0	0	0	0	5,43046E-13	1,01883E-07	8,86921E-11
3,60379E-05	-26,85615498	0,017649561	2,73123E-10	-12404072,41	0,011595656	3,68435E-05	-24,78894321	0,017145206



(i)		Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]
1	1	0,020000	4,65661E-10	1,83331E-08	4411010,243	173661820,6
		0,020127	26573,53113	1046202,013	4040264,215	159065520,3
	2	0,020127	26573,53113	1046202,013	352475,2532	13876978,47
		0,020254	28300,13644	1114178,6	306419,0653	12063742,73
2	3	0,020254	28300,13644	1114178,6	306419,0653	12063742,73
		0,020381	29710,33464	1169698,214	260959,7604	10274006,31
	4	0,020381	29710,33464	1169698,214	260959,7604	10274006,31
		0,020508	30815,5772	1213211,701	216082,2971	8507177,05
3	5	0,020508	30815,5772	1213211,701	2473140,766	97367746,7
		0,020635	44538,88156	1753499,274	2124843,299	83655247,99
	6	0,020635	44538,88156	1753499,274	2124843,299	83655247,99
		0,020762	55906,15067	2201029,554	1782702,276	70185128,98
4	7	0,020762	55906,15067	2201029,554	156507,6734	6161719,424
		0,020889	56046,5966	2206558,921	113590,8759	4472081,728
	8	0,020889	56046,5966	2206558,921	113590,8759	4472081,728
		0,021016	55927,52566	2201871,089	71197,23448	2803040,727
5	9	0,021016	55927,52566	2201871,089	71197,23448	2803040,727
		0,021143	55558,24922	2187332,646	29314,06199	1154096,929
	10	0,021143	55558,24922	2187332,646	322377,2848	12692019,09
		0,021270	55847,67164	2198727,23	-1922,767819	-75699,52043
6	11	0,021270	55847,67164	2198727,23	-1922,767819	-75699,52043
		0,021397	54224,24747	2134812,892	-322421,9528	-12693777,67
	12	0,021397	54224,24747	2134812,892	-26873,92291	-1058028,461
		0,021524	53308,78196	2098770,943	-67335,54527	-2651005,719
7	13	0,021524	53308,78196	2098770,943	-67335,54527	-2651005,719
		0,021651	52174,10584	2054098,655	-107331,2794	-4225640,923
	14	0,021651	52174,10584	2054098,655	-107331,2794	-4225640,923
		0,021778	50827,99459	2001102,149	-146872,0254	-5782363,205
8	15	0,021778	50827,99459	2001102,149	-1699350,219	-66903551,94
		0,021905	39529,30661	1556271,914	-2005640,077	-78962207,77
	16	0,021905	39529,30661	1556271,914	-2005640,077	-78962207,77
		0,022032	26670,50563	1050019,907	-2310051,677	-90946916,43
9	17	0,022032	26670,50563	1050019,907	-200598,398	-7897574,723
		0,022159	25108,78298	988534,7632	-239157,544	-9415651,337
	18	0,022159	25108,78298	988534,7632	-239157,544	-9415651,337
		0,022286	23355,77782	919518,8118	-277295,3977	-10917141,64
9	19	0,022286	23355,77782	919518,8118	-277295,3977	-10917141,64
		0,022413	21418,16664	843234,9072	-315021,4929	-12402420,98
	20	0,022413	21418,16664	843234,9072	-3622494,28	-142617885
		0,022540	6,98492E-10	2,74997E-08	-3915576,152	-154156541,4

		B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] =	Equação (49), $\sigma_r^{(1)}$	2	0,00038378	-68287643,81	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(1)}$	2	0,000389627	-66416731,4	-2	-1,999659434	0,123460861
	Equação (50), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	2	1,999661309	-0,118916021
	Equação (50), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (51), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(1)}$	3,65205E-12	2,08889E-16	3,61239E-05	-3,57058E-12	-3,56979E-12	-2,3142E-13
	Equação (52), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	3,63817E-12	3,63737E-12	2,2712E-13
	Equação (52), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(1)}$	-3,3411E-12	0	0	3,65982E-16	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	-3,7291E-16	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (54), Sum i=1 a N=9	5,09613E-06	3,33898E-09	581,4983889	1,54819E-05	1,54801E-05	9,37943E-07

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-0,000407476	61169532,48	0	0	0	0	0	0
2	0,000419635	-57952738,12	-2	-1,999662539	0,116024137	0	0	0
0	0	0	2	1,999664358	-0,111880167	-2	-0,000438264	53507531,23
0	0	0	0	0	0	2	0,000450946	-50775492,68
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,72118E-12	-2,22594E-16	-3,38997E-05	0	0	0	0	0	0
3,76727E-12	2,32075E-16	3,25148E-05	-3,68323E-12	-3,68242E-12	-2,24342E-13	0	0	0
0	0	0	3,75082E-12	3,75E-12	2,20299E-13	-3,8364E-12	-2,46825E-16	-3,05717E-05
0	0	0	0	0	0	3,88249E-12	2,57018E-16	2,93592E-05
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,40435E-12	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,44651E-12	0	0	3,77529E-16	0	0	0	0	0
0	0	0	-3,84457E-16	0	0	3,50976E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	-3,55192E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,04826E-05	7,34504E-09	1057,485633	1,59658E-05	1,59639E-05	9,09514E-07	1,08052E-05	8,1395E-09	954,2610254

B <sub>6</sub>	C <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	B <sub>7</sub>	C <sub>7</sub>	D <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>	C <sub>8</sub>	D <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-1,999665552	0,109239648	0	0	0	0	0	0
2	1,999667317	-0,105450756	-2	-0,000470363	46990996,54	0	0	0
0	0	0	2	0,000483574	-44659484,97	-2	-1,999668476	0,103033294
0	0	0	0	0	0	2	1,99967019	-0,099560043
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,79588E-12	-3,79505E-12	-2,17683E-13	0	0	0	0	0	0
3,86347E-12	3,86263E-12	2,13875E-13	-3,95162E-12	-2,72859E-16	-2,76548E-05	0	0	0
0	0	0	3,99771E-12	2,83794E-16	2,65892E-05	-3,90853E-12	-3,90768E-12	-2,11409E-13
0	0	0	0	0	0	3,97612E-12	3,97526E-12	2,07815E-13
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,89075E-16	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,96003E-16	0	0	3,61517E-12	0	0	0	0	0
0	0	0	-3,65734E-12	0	0	4,00622E-16	0	0
0	0	0	0	0	0	-4,0755E-16	0	0
1,64497E-05	1,64478E-05	8,82758E-07	1,11277E-05	8,99268E-09	863,7187657	1,69335E-05	1,69316E-05	8,57531E-07



(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]	
1	1	0,020000	0	0	2041323,131	80367052,41
		0,020127	12181,28306	479578,0733	1820277,98	71664487,4
2	2	0,020127	12181,28306	479578,0734	158868,3599	6254659,838
		0,020254	13041,45665	513443,1751	139896,3948	5507732,078
3	3	0,020254	13041,45665	513443,1751	139896,3948	5507732,078
		0,020381	13773,44524	542261,6237	121165,8285	4770308,21
4	4	0,020381	13773,44524	542261,6237	121165,8285	4770308,21
		0,020508	14381,1088	566185,386	102671,3945	4042180,887
5	5	0,020508	14381,1088	566185,3858	1175177,863	46266844,99
		0,020635	20879,22188	822016,6093	965723,073	38020593,43
6	6	0,020635	20879,22188	822016,6093	965723,073	38020593,43
		0,020762	26025,77831	1024636,941	759239,4414	29891316,59
7	7	0,020762	26025,77831	1024636,941	66704,77334	2626172,179
		0,020889	26219,0201	1032244,886	48952,00692	1927244,367
8	8	0,020889	26219,0201	1032244,886	48952,00692	1927244,367
		0,021016	26303,29926	1035562,963	31414,63791	1236796,768
9	9	0,021016	26303,29926	1035562,963	31414,63791	1236796,768
		0,021143	26281,85951	1034718,878	14088,14005	554651,1832
10	10	0,021143	26281,85951	1034718,878	155039,5019	6103917,397
		0,021270	26462,80206	1041842,601	-41472,7963	-1632787,256
11	11	0,021270	26462,80206	1041842,601	-41472,7963	-1632787,256
		0,021397	25482,11663	1003232,938	-235679,7818	-9278731,567
12	12	0,021397	25482,11663	1003232,938	-19959,05208	-785789,4522
		0,021524	25164,56527	990730,916	-36681,44967	-1444151,562
13	13	0,021524	25164,56527	990730,916	-36681,44967	-1444151,562
		0,021651	24753,22042	974536,2371	-53209,80682	-2094874,284
14	14	0,021651	24753,22042	974536,2371	-53209,80682	-2094874,284
		0,021778	24250,84303	954757,5997	-69548,05711	-2738112,485
15	15	0,021778	24250,84303	954757,5998	-804736,9955	-31682558,88
		0,021905	18905,74897	744320,8256	-990308,1432	-38988509,58
16	16	0,021905	18905,74897	744320,8256	-990308,1432	-38988509,58
		0,022032	12557,67809	494396,7754	-1174127,047	-46225474,31
17	17	0,022032	12557,67809	494396,7754	-101980,1145	-4014965,138
		0,022159	11855,72621	466760,8745	-117828,4073	-4638913,673
18	18	0,022159	11855,72621	466760,8745	-117828,4073	-4638913,673
		0,022286	11071,96515	435904,1399	-133500,3073	-5255917,611
19	19	0,022286	11071,96515	435904,1399	-133500,3073	-5255917,611
		0,022413	10208,77526	401920,2859	-148999,2699	-5866112,99
20	20	0,022413	10208,77526	401920,286	-1713392,029	-67456379,09
		0,022540	0	0	-1889682,084	-74396932,45

(i)		Raio r	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$ [Pa]	(r-a)/t
1	1	0,020000	1,83331E-08	254028873	0
		0,020127	1525780,086	230730008	0,05
2	2	0,020127	1525780,086	20131638,3	0,05
		0,020254	1627621,775	17571474,8	0,1
3	3	0,020254	1627621,775	17571474,8	0,1
		0,020381	1711959,838	15044314,5	0,15
4	4	0,020381	1711959,838	15044314,5	0,15
		0,020508	1779397,087	12549357,9	0,2
5	5	0,020508	1779397,087	143634592	0,2
		0,020635	2575515,883	121675841	0,25
6	6	0,020635	2575515,883	121675841	0,25
		0,020762	3225666,495	100076446	0,3
7	7	0,020762	3225666,495	8787891,6	0,3
		0,020889	3238803,807	6399326,09	0,35
8	8	0,020889	3238803,807	6399326,09	0,35
		0,021016	3237434,052	4039837,5	0,4
9	9	0,021016	3237434,052	4039837,5	0,4
		0,021143	3222051,525	1708748,11	0,45
10	10	0,021143	3222051,525	18795936,5	0,45
		0,021270	3240569,831	-1708486,8	0,5
11	11	0,021270	3240569,831	-1708486,8	0,5
		0,021397	3138045,831	-21972509	0,55
12	12	0,021397	3138045,83	-1843817,9	0,55
		0,021524	3089501,859	-4095157,3	0,6
13	13	0,021524	3089501,859	-4095157,3	0,6
		0,021651	3028634,892	-6320515,2	0,65
14	14	0,021651	3028634,892	-6320515,2	0,65
		0,021778	2955859,749	-8520475,7	0,7
15	15	0,021778	2955859,749	-98586111	0,7
		0,021905	2300592,74	-117950717	0,75
16	16	0,021905	2300592,74	-117950717	0,75
		0,022032	1544416,682	-137172391	0,8
17	17	0,022032	1544416,682	-11912540	0,8
		0,022159	1455295,638	-14054565	0,85
18	18	0,022159	1455295,638	-14054565	0,85
		0,022286	1355422,952	-16173059	0,9
19	19	0,022286	1355422,952	-16173059	0,9
		0,022413	1245155,193	-18268534	0,95
20	20	0,022413	1245155,193	-210074264	0,95
		0,022540	2,74997E-08	-228553474	1

Anexo J – Tensões a  $\theta = 90^\circ$  e a meio da espessura, retiradas do cálculo numérico em ANSYS 3D, para o novo provete estudado:  
*Layup H*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Camada	NÓDE	Cordenadas Cilíndricas			Tensões [Pa] ANSYS						Orientação	(r-a)/t
		X	Y	Z	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ		
		[m]	[graus]	[m]	Sr	Sθ	SZ	Srθ	SθZ	Srz		
1	25762	2,00E-02	0	1,27E-02	4,76E+05	2,58E+08	5,76E+06	-384,81	1,86E-02	-1,39E-02	0,00	0,00
	25787	2,01E-02	0	1,27E-02	8,56E+05	2,44E+08	5,48E+06	-693,32	1,48E-02	3,28E-03	90	0,03
	24637	2,01E-02	0	1,27E-02	1,40E+06	1,25E+08	3,70E+06	-1122,5	1,33E-02	1,45E-02	0,05	0,05
2	24637	2,01E-02	0	1,27E-02	1,40E+06	1,25E+08	3,70E+06	-1122,5	1,33E-02	1,45E-02	0,05	0,05
	51187	2,02E-02	0	1,27E-02	1,59E+06	1,88E+07	1,95E+06	-1236	9,88E-03	-7,51E-05	0	0,07
	50062	2,03E-02	0	1,27E-02	1,64E+06	1,76E+07	1,80E+06	-1221	2,64E-03	-7,19E-03	0,10	0,10
3	50062	2,03E-02	0	1,27E-02	1,64E+06	1,76E+07	1,80E+06	-1221	2,64E-03	-7,19E-03	0,10	0,10
	53617	2,03E-02	0	1,27E-02	1,68E+06	1,65E+07	1,65E+06	-1204,1	-5,47E-05	1,39E-02	0	0,12
	52492	2,04E-02	0	1,27E-02	1,72E+06	1,53E+07	1,49E+06	-1185,6	-6,08E-03	1,61E-02	0,15	0,15
4	52492	2,04E-02	0	1,27E-02	1,72E+06	1,53E+07	1,49E+06	-1185,6	-6,08E-03	1,61E-02	0,15	0,15
	54832	2,04E-02	0	1,27E-02	1,75E+06	1,42E+07	1,34E+06	-1165,4	-9,32E-03	2,79E-02	0	0,18
	29407	2,05E-02	0	1,27E-02	1,90E+06	8,19E+07	2,33E+06	-1260,9	-1,73E-02	5,44E-02	0,20	0,20
5	29407	2,05E-02	0	1,27E-02	1,90E+06	8,19E+07	2,33E+06	-1260,9	-1,73E-02	5,44E-02	0,20	0,20
	29432	2,06E-02	0	1,27E-02	2,24E+06	1,37E+08	3,22E+06	-1540,7	-3,53E-02	-1,33E-02	90	0,23
	28282	2,06E-02	0	1,27E-02	2,63E+06	1,24E+08	3,00E+06	-1874,4	-1,96E-02	-5,54E-02	0,25	0,25
6	28282	2,06E-02	0	1,27E-02	2,63E+06	1,24E+08	3,00E+06	-1874,4	-1,96E-02	-5,54E-02	0,25	0,25
	32962	2,07E-02	0	1,27E-02	2,97E+06	1,12E+08	2,76E+06	-2175,5	-2,91E-02	-3,85E-02	90	0,28
	31837	2,08E-02	0	1,27E-02	3,19E+06	5,36E+07	3,11E+06	-2361,6	-2,74E-02	-3,58E-02	0,30	0,30
7	31837	2,08E-02	0	1,27E-02	3,19E+06	5,36E+07	3,11E+06	-2361,6	-2,74E-02	-3,58E-02	0,30	0,30
	57262	2,08E-02	0	1,27E-02	3,25E+06	7,55E+06	3,52E+06	-2387,6	-3,00E-02	-5,79E-02	0	0,33
	56137	2,09E-02	0	1,27E-02	3,25E+06	6,46E+06	3,33E+06	-2349,4	-3,91E-02	-7,80E-03	0,35	0,35
8	56137	2,09E-02	0	1,27E-02	3,25E+06	6,46E+06	3,33E+06	-2349,4	-3,91E-02	-7,80E-03	0,35	0,35
	59692	2,10E-02	0	1,27E-02	3,25E+06	5,38E+06	3,13E+06	-2310	-3,60E-02	5,40E-02	0	0,37
	58567	2,10E-02	0	1,27E-02	3,25E+06	4,30E+06	2,92E+06	-2269,6	-3,00E-02	1,95E-02	0,40	0,40
9	58567	2,10E-02	0	1,27E-02	3,25E+06	4,30E+06	2,92E+06	-2269,6	-3,00E-02	1,95E-02	0,40	0,40
	60907	2,11E-02	0	1,27E-02	3,24E+06	3,24E+06	2,71E+06	-2228,3	-3,52E-02	3,49E-03	0	0,43
	35482	2,11E-02	0	1,27E-02	3,24E+06	1,33E+07	1,64E+06	-2222,2	-3,06E-02	7,19E-03	0,45	0,45
10	35482	2,11E-02	0	1,27E-02	3,24E+06	1,33E+07	1,64E+06	-2222,2	-3,06E-02	7,19E-03	0,45	0,45
	35507	2,12E-02	0	1,27E-02	3,26E+06	1,23E+07	4,80E+05	-2264,8	-3,34E-02	-3,04E-03	90	0,48
	34357	2,13E-02	0	1,27E-02	3,25E+06	2,42E+05	1,96E+05	-2309,9	-3,04E-02	-6,21E-03	0,50	0,50

	34357	2,13E-02	0	1,27E-02	3,25E+06	2,42E+05	1,96E+05	-2309,9	-3,04E-02	-6,21E-03	0,50
11	39037	2,13E-02	0	1,27E-02	3,21E+06	-1,17E+07	-93523	-2328,2	-3,20E-02	-5,54E-03	90 0,52
	37912	2,14E-02	0	1,27E-02	3,16E+06	-1,28E+07	5,98E+05	-2313,9	-3,15E-02	-5,15E-03	0,55
	37912	2,14E-02	0	1,27E-02	3,16E+06	-1,28E+07	5,98E+05	-2313,9	-3,15E-02	-5,15E-03	0,55
12	63337	2,15E-02	0	1,27E-02	3,12E+06	-3,04E+06	1,37E+06	-2274	-2,71E-02	5,06E-02	0 0,58
	62212	2,15E-02	0	1,27E-02	3,09E+06	-4,07E+06	1,12E+06	-2224,6	-4,46E-02	2,00E-02	0,60
	62212	2,15E-02	0	1,27E-02	3,09E+06	-4,07E+06	1,12E+06	-2224,6	-4,46E-02	2,00E-02	0,60
13	65767	2,16E-02	0	1,27E-02	3,06E+06	-5,09E+06	8,66E+05	-2174,4	-2,85E-02	-2,14E-02	0 0,62
	64642	2,17E-02	0	1,27E-02	3,02E+06	-6,10E+06	6,06E+05	-2123,4	-4,23E-02	-1,86E-02	0,65
	64642	2,17E-02	0	1,27E-02	3,02E+06	-6,10E+06	6,06E+05	-2123,4	-4,23E-02	-1,86E-02	0,65
14	66982	2,17E-02	0	1,27E-02	2,99E+06	-7,11E+06	3,41E+05	-2071,7	-2,67E-02	-1,93E-02	0 0,68
	41557	2,18E-02	0	1,27E-02	2,87E+06	-5,11E+07	-1,01E+06	-1983	-3,69E-02	5,61E-03	0,70
	41557	2,18E-02	0	1,27E-02	2,87E+06	-5,11E+07	-1,01E+06	-1983	-3,69E-02	5,61E-03	0,70
15	41582	2,18E-02	0	1,27E-02	2,60E+06	-1,05E+08	-2,42E+06	-1821,9	-3,67E-02	-9,57E-03	90 0,73
	40432	2,19E-02	0	1,27E-02	2,26E+06	-1,17E+08	-2,76E+06	-1616,8	-2,98E-02	-1,89E-03	0,75
	40432	2,19E-02	0	1,27E-02	2,26E+06	-1,17E+08	-2,76E+06	-1616,8	-2,98E-02	-1,89E-03	0,75
16	45112	2,20E-02	0	1,27E-02	1,89E+06	-1,28E+08	-3,09E+06	-1389	-3,82E-02	2,18E-03	90 0,77
	43987	2,20E-02	0	1,27E-02	1,61E+06	-7,55E+07	-3,69E+06	-1202	-3,47E-02	-7,82E-03	0,80
	43987	2,20E-02	0	1,27E-02	1,61E+06	-7,55E+07	-3,69E+06	-1202	-3,47E-02	-7,82E-03	0,80
17	69412	2,21E-02	0	1,27E-02	1,49E+06	-1,31E+07	-4,21E+06	-1109,7	-3,50E-02	-6,64E-03	0 0,83
	68287	2,22E-02	0	1,27E-02	1,44E+06	-1,41E+07	-4,52E+06	-1056,3	-3,35E-02	-1,92E-02	0,85
	68287	2,22E-02	0	1,27E-02	1,44E+06	-1,41E+07	-4,52E+06	-1056,3	-3,35E-02	-1,92E-02	0,85
18	71842	2,22E-02	0	1,27E-02	1,39E+06	-1,51E+07	-4,83E+06	-1002,3	-5,06E-02	2,78E-02	0 0,87
	70717	2,23E-02	0	1,27E-02	1,34E+06	-1,60E+07	-5,15E+06	-947,19	-2,15E-02	5,02E-02	0,90
	70717	2,23E-02	0	1,27E-02	1,34E+06	-1,60E+07	-5,15E+06	-947,19	-2,15E-02	5,02E-02	0,90
19	73057	2,23E-02	0	1,27E-02	1,29E+06	-1,70E+07	-5,48E+06	-891,66	-4,97E-02	-3,77E-02	0 0,93
	47632	2,24E-02	0	1,27E-02	1,06E+06	-1,12E+08	-5,47E+06	-731,69	-3,15E-02	-5,09E-02	0,95
	47632	2,24E-02	0	1,27E-02	1,06E+06	-1,12E+08	-5,47E+06	-731,69	-3,15E-02	-5,09E-02	0,95
20	47657	2,25E-02	0	1,27E-02	5,59E+05	-2,17E+08	-5,47E+06	-387,88	-4,01E-02	-1,62E-02	90 0,98
	46507	2,25E-02	0	1,27E-02	2,49E+05	-2,27E+08	-5,78E+06	-175,65	-4,27E-02	-1,13E-02	1,00

Anexo K – Implementação do critério de rotura de Hashin 3D a toda a zona curva do novo provete. Valores máximos de cada camada: *Layup H*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Layer	Orientação [graus]	HASHIN 3D - Layup H											Carga Crítica [N]
		Valores Máximos											
		FFT	FALHOU?	FFC	FALHOU?	FMT	S22+S33	FALHOU?	FMC	S22+S33	FALHOU?		
1	90	0,02	2,58E+08	não	2,58E+08	não	0,02	1,73E+06	não	0,02	1,73E+06	não	774,66
2	0	0,00	5,21E+06	não	5,21E+06	não	6,85	6,62E+06	SIM!!!!	0,99	6,62E+06	não	38,19
3	0	0,00	4,84E+06	não	4,84E+06	não	0,16	5,80E+06	não	0,07	5,80E+06	não	253,04
4	0	0,00	4,14E+06	não	4,14E+06	não	3,02	5,06E+06	SIM!!!!	0,51	5,06E+06	não	57,53
5	90	0,00	1,37E+08	não	1,37E+08	não	0,01	1,54E+06	não	0,02	1,54E+06	não	895,41
6	90	0,00	1,24E+08	não	1,24E+08	não	0,02	1,67E+06	não	0,02	1,67E+06	não	799,80
7	0	0,00	3,52E+06	não	3,52E+06	não	1,37	3,35E+06	SIM!!!!	0,27	3,35E+06	não	85,35
8	0	0,00	3,33E+06	não	3,33E+06	não	0,04	2,59E+06	não	0,03	2,59E+06	não	515,71
9	0	0,00	2,92E+06	não	2,92E+06	não	0,11	1,85E+06	não	0,05	1,85E+06	não	298,37
10	90	0,00	1,33E+07	não	1,33E+07	não	0,01	1,06E+06	não	0,01	1,06E+06	não	1026,08
11	90	0,00	2,42E+05	não	2,18E+07	não	0,01	8,65E+05	não	0,01	8,65E+05	não	912,36
12	0	0,00	1,94E+06	não	1,94E+06	não	0,11	-3,45E+05	não	0,00	-3,45E+05	não	2381,78
13	0	0,00	2,07E+06	não	2,07E+06	não	0,01	-1,04E+06	não	0,00	-1,04E+06	não	937,58
14	0	0,00	2,27E+06	não	2,33E+06	não	1,27	-1,76E+06	não	0,00	-1,76E+06	não	88,59
15	90	0,00	-1,59E+07	não	1,26E+08	não	0,00	6,58E+04	não	0,01	6,58E+04	não	968,62
16	90	0,00	-2,35E+07	não	1,37E+08	não	0,00	-3,91E+05	não	0,00	-3,91E+05	não	1774,59
17	0	0,00	9,83E+05	não	5,25E+06	não	2,73	-4,32E+06	não	0,03	-4,32E+06	não	599,74
18	0	0,00	1,71E+06	não	6,04E+06	não	0,11	-4,94E+06	não	-0,01	-4,94E+06	não	300,53
19	0	0,00	2,56E+06	não	6,46E+06	não	5,88	-5,61E+06	não	0,20	-5,61E+06	não	221,24
20	90	0,01	-3,49E+07	não	2,35E+08	não	0,01	-1,35E+06	não	0,01	-1,35E+06	não	1329,46
<b>Valor mínimo [N]</b>												<b>38,2</b>	

## Anexo L – Implementação da *Multilayer Theory* para o novo provete estudado: *Layup I*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Contem os dados, as matrizes dos coeficientes das constantes arbitrárias, vectores de carga e vectores das constantes arbitrárias, para os dois casos de carga, forças e momentos, nos extremos do elemento curvo.

<b>Layup I</b>			
Empilhamento: [90 <sub>3</sub> /0/90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> /90/0 <sub>2</sub> /90/0/90 <sub>3</sub> /0/90 <sub>3</sub> ]	→	N	= 11

<b>Geometria</b>		<b>Material: Hercules AS4/3501-6 epoxy prepreg (WWFE)</b>								
e [m]	= 0,01	<b>espessura da lâmina [m]</b>			= 1,27E-04					
a [m]	= 0,02	<b>número total de camadas</b>			= 20					
h [m]	= 0,0254	<b>espessura total da lâmina [m]</b>			= 2,54E-03					
		<b>E<sub>L</sub> [Pa]</b>	= 1,26E+11	<b>v<sub>rθ</sub></b>	= 0,280					
		<b>E<sub>T</sub> [Pa]</b>	= 1,10E+10	<b>v<sub>θr</sub></b>	= 0,024					
		<b>E<sub>Z</sub> [Pa]</b>	= 1,10E+10	<b>G<sub>rθ</sub> [Pa]</b>	= 6,60E+09					
		<b>90°</b>			<b>0°</b>					
		<b>E<sub>r</sub> [Pa]</b>	= 1,10E+10	<b>E<sub>r</sub> [Pa]</b>	= 1,10E+10					
		<b>E<sub>θ</sub> [Pa]</b>	= 1,26E+11	<b>E<sub>θ</sub> [Pa]</b>	= 1,10E+10					
		<b>v<sub>rθ</sub></b>	= 0,280	<b>v<sub>rθ</sub></b>	= 0,280					
		<b>v<sub>θr</sub></b>	= 0,024	<b>v<sub>θr</sub></b>	= 0,024					
		<b>G<sub>rθ</sub> [Pa]</b>	= 6,60E+09	<b>G<sub>rθ</sub> [Pa]</b>	= 6,60E+09					
<b>Carga</b>										
P [N]	= 100									
<b>Momento</b>										
M [N.m]	= 1									
<b>Camada (i)</b>		<b>a<sub>i</sub> [m]</b>	<b>E<sub>r</sub></b>	<b>E<sub>θ</sub></b>	<b>v<sub>rθ</sub></b>	<b>v<sub>θr</sub></b>	<b>G<sub>rθ</sub></b>	<b>β<sub>i</sub></b>	<b>k (i)</b>	<b>Camada (i)</b>
0		0,02								0
1	90 x 3	0,020381	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	1
2	0	0,020508	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	2
3	90 x 3	0,020889	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	3
4	0	0,021016	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	4
5	90	0,021143	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	5
6	0 x 2	0,021397	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	6
7	90	0,021524	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	7
8	0	0,021651	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	8
9	90 x 3	0,022032	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	9
10	0	0,022159	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	10
11	90 x 3	0,022540	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	11

	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] = Equação (43), $\sigma_r^{(1)}$	1,49185E-08	-1688426793	1	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(1)}$	1,64005E-08	-1535855200	1	-0,001845076	1683,784444	-1
Equação (44), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	0,001865389	-1665,449056	1
Equação (44), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (45), $\sigma_r^{(11)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(1)}$	2,93304E-19	0,028059995	-3,53207E-10	-8,87621E-14	-8,84684E-08	3,45327E-10
Equação (46), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	8,97393E-14	8,75051E-08	-3,44776E-10
Equação (46), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(1)}$	7,78405E-19	0,049167282	7,72457E-12	-4,5929E-13	-1,20463E-07	-8,86921E-11
Equação (47), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	4,64346E-13	1,19151E-07	8,86921E-11
Equação (47), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (48), Sum i=1 a N=11	2,95288E-10	-30399703,49	0,018870821	1,15245E-05	-10,4025477	0,00621196

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	B <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,69199E-08	1488710721	-1	0	0	0	0	0	0
1,85576E-08	-1357337682	1	-0,001926904	1612,280628	-1	0	0	0
0	0	0	0,001947601	-1595,147275	1	-1,91308E-08	1316667853	-1
0	0	0	0	0	0	1,97181E-08	-1277450724	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,02592E-19	-0,027198668	3,52643E-10	0	0	0	0	0	0
3,31879E-19	0,024798489	-3,50973E-10	-9,26986E-14	-8,47115E-08	3,43144E-10	0	0	0
0	0	0	9,36943E-14	8,38113E-08	-3,42606E-10	-3,42131E-19	-0,024055454	3,50423E-10
0	0	0	0	0	0	3,52634E-19	0,023338959	-3,49876E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8,03055E-19	-0,047658047	-7,72457E-12	0	0	0	0	0	0
8,80781E-19	0,043452406	7,72457E-12	-4,79659E-13	-1,15347E-07	-8,86921E-11	0	0	0
0	0	0	4,84811E-13	1,14122E-07	8,86921E-11	-9,07987E-19	-0,042150445	-7,72457E-12
0	0	0	0	0	0	9,35862E-19	0,040894988	7,72457E-12
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,26296E-10	-26175917,39	0,018407651	1,17423E-05	-9,720575501	0,006061348	1,1702E-10	-7813965,129	0,006024829

A <sub>6</sub>	B <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	B <sub>7</sub>	D <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	B <sub>8</sub>	D <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,001968393	1578,297581	-1	0	0	0	0	0	0
0,002010264	-1545,42392	1	-2,0936E-08	1203136781	-1	0	0	0
0	0	0	2,15671E-08	-1167928001	1	-0,002031343	1529,387769	-1
0	0	0	0	0	0	0,002052516	-1513,610897	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-9,46946E-14	-8,2926E-08	3,42072E-10	0	0	0	0	0	0
9,67089E-14	8,11988E-08	-3,41012E-10	-3,74415E-19	-0,021981247	3,48793E-10	0	0	0
0	0	0	3,85702E-19	0,021337984	-3,48256E-10	-9,77229E-14	-8,03562E-08	3,40487E-10
0	0	0	0	0	0	9,87415E-14	7,95273E-08	-3,39966E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4,89987E-13	-1,12916E-07	-8,86921E-11	0	0	0	0	0	0
5,0041E-13	1,10564E-07	8,86921E-11	-9,93667E-19	-0,038515978	-7,72457E-12	0	0	0
0	0	0	1,02362E-18	0,037388841	7,72457E-12	-5,05657E-13	-1,09417E-07	-8,86921E-11
0	0	0	0	0	0	5,10927E-13	1,08288E-07	8,86921E-11
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,37554E-05	-18,6508086	0,011941844	1,25755E-10	-7015306,533	0,005917866	1,20127E-05	-8,950978167	0,005883051

A <sub>9</sub>	B <sub>9</sub>	D <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>	B <sub>10</sub>	D <sub>10</sub>	A <sub>11</sub>	B <sub>11</sub>	D <sub>11</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2,22134E-08	1133947695	-1	0	0	0	0	0	0
2,42459E-08	-1038891974	1	-0,002116605	1467,77997	-1	0	0	0
0	0	0	0,002138157	-1452,98499	1	-2,49555E-08	1009350868	-1
0	0	0	0	0	0	2,71847E-08	-926581913,8	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,9726E-19	-0,020717166	3,47722E-10	0	0	0	0	0	0
4,33608E-19	0,018980503	-3,4614E-10	-1,01825E-13	-7,71192E-08	3,38418E-10	0	0	0
0	0	0	1,02861E-13	7,63419E-08	-3,37908E-10	-4,46299E-19	-0,018440788	3,45618E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,0543E-18	-0,03630103	-7,72457E-12	0	0	0	0	0	0
1,15076E-18	0,033258014	7,72457E-12	-5,26881E-13	-1,05009E-07	-8,86921E-11	0	0	0
0	0	0	5,32246E-13	1,03951E-07	8,86921E-11	-1,18444E-18	-0,032312316	-7,72457E-12
4,04967E-10	-18939736,37	0,017444299	1,22276E-05	-8,393903701	0,005747793	4,44167E-10	-16491612,95	0,017047774



(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]
1	0,020000	0	0	2363755,219	93061229,1
	0,020127	14156	557333	2138500,047	84192915,25
1	0,020127	14156	557333	2138500,047	84192915,25
	0,020254	26654	1049388	1918103,608	75515890,06
3	0,020254	26654	1049388	1918103,608	75515890,06
	0,020381	37565	1478933	1702242,244	67017411,19
2	0,020381	37565	1478933	149091,7483	5869753,87
	0,020508	37938	1493618	122084,3188	4806469,246
5	0,020508	37938	1493618	1392052,511	54805216,98
	0,020635	45370	1786218	1183112,22	46579221,26
3	0,020635	45370	1786218	1183112,22	46579221,26
	0,020762	51403	2023738	977764,7459	38494675,04
7	0,020762	51403	2023738	977764,7459	38494675,04
	0,020889	56092	2208340	775748,0733	30541262,73
4	0,020889	56092	2208340	68811,91614	2709130,557
	0,021016	55754	2195021	43332,90008	1706019,688
5	0,021016	55754	2195021	483289,1148	19027130,5
	0,021143	57390	2259434	286755,6715	11289593,37
10	0,021143	57390	2259434	26252,39625	1033558,907
	0,021270	56788	2235764	1394,216744	54890,42301
6	0,021270	56788	2235764	1394,216744	54890,42301
	0,021397	56052	2206757	-23173,00706	-912323,1127
7	0,021397	56052	2206757	-280395,8136	-11039205,26
	0,021524	53184	2093848	-469873,2108	-18498945,31
8	0,021524	53184	2093848	-39739,23933	-1564536,982
	0,021651	52259	2057430	-63784,57404	-2511203,702
14	0,021651	52259	2057430	-745720,9205	-29359091,36
	0,021778	46774	1841505	-931284,0553	-36664726,59
9	0,021778	46774	1841505	-931284,0553	-36664726,59
	0,021905	40316	1587250	-1115495,075	-43917128,93
16	0,021905	40316	1587250	-1115495,075	-43917128,93
	0,022032	32914	1295831	-1298516,464	-51122695,42
10	0,022032	32914	1295831	-112360,5295	-4423642,892
	0,022159	31829	1253117	-135604,2982	-5338751,899
18	0,022159	31829	1253117	-1565119,868	-61618892,42
	0,022286	22062	868565	-1745121,863	-68705585,14
11	0,022286	22062	868565	-1745121,863	-68705585,14
	0,022413	11444	450565	-1924464,028	-75766300,31
20	0,022413	11444	450565	-1924464,028	-75766300,31
	0,022540	0	0	-2103280,054	-82806301,35

		B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] =	Equação (49), $\sigma_r^{(1)}$	2	0,00038378	-68287643,81	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(1)}$	2	0,000401475	-62860083,71	-2	-1,999660687	0,120402678
	Equação (50), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	2	1,999661309	-0,118916021
	Equação (50), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (50), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (51), $\sigma_r^{(11)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(1)}$	3,69814E-12	2,17957E-16	3,46209E-05	-3,61564E-12	-3,61484E-12	-2,28536E-13
	Equação (52), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	3,63817E-12	3,63737E-12	2,27120E-13
	Equação (52), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (52), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(1)}$	-3,38327E-12	0	0	3,70601E-16	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	-3,7291E-16	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (53), $\sigma_r^{(10)}$	0	0	0	0	0	0
	Equação (54), Sum i=1 a N=11	1,53852E-05	1,02345E-08	1707,924351	5,1929E-06	5,19228E-06	3,10697E-07

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-0,000407476	61169532,48	0	0	0	0	0	0
2	0,000425793	-56422298,63	-2	-1,999663149	0,114617594	0	0	0
0	0	0	2	1,999663755	-0,113236474	-2	-0,000432002	54941187,58
0	0	0	0	0	0	2	0,000438264	-53507531,23
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,72118E-12	-2,22594E-16	-3,38997E-05	0	0	0	0	0	0
3,79031E-12	2,36921E-16	3,18498E-05	-3,70576E-12	-3,70495E-12	-2,22978E-13	0	0	0
0	0	0	3,72829E-12	3,72747E-12	2,22E-13	-3,81336E-12	-2,41837E-16	-3,12023E-05
0	0	0	0	0	0	3,8364E-12	2,46825E-16	3,05717E-05
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,40435E-12	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,4676E-12	0	0	3,79838E-16	0	0	0	0	0
0	0	0	-3,82147E-16	0	0	3,48868E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	-3,50976E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,57723E-05	1,11336E-08	1569,980738	5,32193E-06	5,32131E-06	3,03164E-07	5,35419E-06	3,94741E-09	491,868118

B' <sub>6</sub>	C' <sub>6</sub>	D' <sub>6</sub>	B' <sub>7</sub>	C' <sub>7</sub>	D' <sub>7</sub>	B' <sub>8</sub>	C' <sub>8</sub>	D' <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-1,999664358	0,111880167	0	0	0	0	0	0
2	1,999665552	-0,109239648	-2	-0,000450946	50775492,68	0	0	0
0	0	0	2	0,000457365	-49473756,19	-2	-1,999666144	0,107954306
0	0	0	0	0	0	2	1,999666732	-0,106691517
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,75082E-12	-3,75E-12	-2,20299E-13	0	0	0	0	0	0
3,79588E-12	3,79505E-12	2,17683E-13	-3,88249E-12	-2,57018E-16	-2,93592E-05	0	0	0
0	0	0	3,90553E-12	2,62225E-16	2,87764E-05	-3,81841E-12	-3,81758E-12	-2,16399E-13
0	0	0	0	0	0	3,84094E-12	3,8401E-12	2,1513E-13
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,84457E-16	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,89075E-16	0	0	3,55192E-12	0	0	0	0	0
0	0	0	-3,57301E-12	0	0	3,91385E-16	0	0
0	0	0	0	0	0	-3,93694E-16	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,08052E-05	1,08039E-05	5,97282E-07	5,45097E-06	4,19444E-09	462,8989567	5,48322E-06	5,48258E-06	2,94246E-07

B' <sub>9</sub>	C' <sub>9</sub>	D' <sub>9</sub>	B' <sub>10</sub>	C' <sub>10</sub>	D' <sub>10</sub>	B' <sub>11</sub>	C' <sub>11</sub>	D' <sub>11</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-0,000463838	48212758,41	0	0	0	0	0	0
2	0,000483574	-44659484,97	-2	-1,999668476	0,103033294	0	0	0
0	0	0	2	1,999669051	-0,101855619	-2	-0,000490259	43547036,36
0	0	0	0	0	0	2	0,000510635	-40407883,06
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,92858E-12	-2,67505E-16	-2,82084E-05	0	0	0	0	0	0
3,99771E-12	2,83794E-16	2,65892E-05	-3,90853E-12	-3,90768E-12	-2,11409E-13	0	0	0
0	0	0	3,93106E-12	3,93021E-12	2,10197E-13	-4,02075E-12	-2,89376E-16	-2,60763E-05
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,59409E-12	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,65734E-12	0	0	4,00622E-16	0	0	0	0	0
0	0	0	-4,02931E-16	0	0	3,67842E-12	0	0
1,66432E-05	1,33577E-08	1308,524089	5,61226E-06	5,61161E-06	2,8748E-07	1,70303E-05	1,444E-08	1210,43412



(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [MPa]
1	0,020000	0	0	1116172,336	43943792,76
	0,020127	6658	262113,3039	994387,0628	39149096,96
1	0,020127	6658	262113,3039	994387,0628	39149096,96
	0,020254	12474	491120,966	874577,9916	34432204,39
3	0,020254	12474	491120,966	874577,9916	34432204,39
	0,020381	17478	688114,7946	756649,0114	29789331,16
2	0,020381	17478,11578	688114,7946	66288,93679	2609800,661
	0,020508	17748,95439	698777,7318	56158,75775	2210974,715
5	0,020508	17748,95438	698777,7317	640267,4862	25207381,35
	0,020635	21226,43152	835686,2802	525550,7373	20690973,91
3	0,020635	21226,43152	835686,2802	525550,7373	20690973,91
	0,020762	23964,65109	943490,2004	412455,5793	16238408,63
7	0,020762	23964,65109	943490,2004	412455,5793	16238408,63
	0,020889	25986,70934	1023098,793	300901,6379	11846521,18
4	0,020889	25986,70934	1023098,793	26785,32116	1054540,203
	0,021016	25962,48227	1022144,971	17189,25705	676742,4034
5	0,021016	25962,48227	1022144,971	190727,5631	7508959,176
	0,021143	26624,7611	1048218,941	81936,29098	3225838,227
10	0,021143	26624,7611	1048218,941	7728,910434	304287,8124
	0,021270	26483,9252	1042674,22	-1635,317154	-64382,56512
6	0,021270	26483,9252	1042674,22	-1635,317154	-64382,56512
	0,021397	26289,50866	1035020,026	-10889,37948	-428715,7277
7	0,021397	26289,50866	1035020,026	-131749,8304	-5187001,196
	0,021524	25046,65862	986088,9219	-236755,3301	-9321075,989
8	0,021524	25046,65862	986088,9219	-20062,42046	-789859,0734
	0,021651	24755,47621	974625,0476	-29108,5457	-1146005,736
14	0,021651	24755,47621	974625,0476	-340546,8626	-13407356,8
	0,021778	22325,21602	878945,5125	-443252,7262	-17450894,73
9	0,021778	22325,21602	878945,5125	-443252,7262	-17450894,73
	0,021905	19330,62713	761048,3122	-544948,3297	-21454658,65
16	0,021905	19330,62713	761048,3122	-544948,3297	-21454658,65
	0,022032	15787,13435	621540,7225	-645687,9834	-25420786,75
10	0,022032	15787,13435	621540,7225	-55884,2307	-2200166,563
	0,022159	15351,42364	604386,7576	-64571,15677	-2542171,527
18	0,022159	15351,42365	604386,7577	-745318,3148	-29343240,74
	0,022286	10734,88758	422633,3692	-844063,6319	-33230851,65
11	0,022286	10734,88758	422633,3692	-844063,6319	-33230851,65
	0,022413	5613,438182	221001,5032	-942006,7773	-37086881
20	0,022413	5613,438182	221001,5032	-942006,7773	-37086881
	0,022540	0	0	-1039193,557	-40913132,17

(i)	Raio r	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$ [Pa]	(r-a)/t	
	1	0,020000	0	137005021,9	0
		0,020127	819447	123342012,2	0,05
1	2	0,020127	819447	123342012,2	0,05
		0,020254	1540509	109948094,5	0,1
	3	0,020254	1540509	109948094,5	0,1
		0,020381	2167048	96806742,34	0,15
2	4	0,020381	2167048	8479554,531	0,15
		0,020508	2192395	7017443,961	0,2
	5	0,020508	2192395	80012598,33	0,2
		0,020635	2621904	67270195,17	0,25
3	6	0,020635	2621904	67270195,17	0,25
		0,020762	2967228	54733083,67	0,3
	7	0,020762	2967228	54733083,67	0,3
		0,020889	3231439	42387783,91	0,35
4	8	0,020889	3231439	3763670,76	0,35
		0,021016	3217166	2382762,092	0,4
5	9	0,021016	3217166	26536089,68	0,4
		0,021143	3307653	14515431,59	0,45
	10	0,021143	3307653	1337846,72	0,45
6	11	0,021270	3278438	-9492,14211	0,5
		0,021270	3278438	-9492,14211	0,5
	12	0,021397	3241777	-1341038,84	0,55
7	13	0,021397	3241777	-16226206,46	0,55
		0,021524	3079937	-27820021,3	0,6
8	14	0,021524	3079937	-2354396,055	0,6
		0,021651	3032055	-3657209,439	0,65
	15	0,021651	3032055	-42766448,16	0,65
		0,021778	2720451	-54115621,32	0,7
9	16	0,021778	2720451	-54115621,32	0,7
		0,021905	2348298	-65371787,58	0,75
	17	0,021905	2348298	-65371787,58	0,75
		0,022032	1917372	-76543482,17	0,8
10	18	0,022032	1917372	-6623809,455	0,8
		0,022159	1857504	-7880923,426	0,85
	19	0,022159	1857504	-90962133,16	0,85
		0,022286	1291198	-101936436,8	0,9
11	20	0,022286	1291198	-101936436,8	0,9
		0,022413	671566	-112853181,3	0,95
		0,022413	671566	-112853181,3	0,95
		0,022540	0	-123719433,5	1

Anexo M – Tensões a  $\theta = 90^\circ$  e a meio da espessura, retiradas do cálculo numérico em ANSYS 3D, para o novo provete estudado:  
*Layup I*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Camada	NÓDE	Cordenadas Cilíndricas			Tensões [Pa] ANSYS						Orientação	(r-a)/t
		X	Y	Z	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ		
		[m]	[graus]	[m]	Sr	Sθ	SZ	Srθ	SθZ	Srz		
1	25762	2,00E-02	0	1,27E-02	2,57E+05	1,41E+08	3,02E+06	-441,67	8,90E-03	-9,17E-03	0,00	0,00
	25787	2,01E-02	0	1,27E-02	4,64E+05	1,33E+08	2,86E+06	-735,18	7,15E-03	-2,48E-04	90	0,03
	24637	2,01E-02	0	1,27E-02	8,68E+05	1,26E+08	2,75E+06	-1303	5,59E-03	3,87E-03	0,05	0,05
2	24637	2,01E-02	0	1,27E-02	8,68E+05	1,26E+08	2,75E+06	-1303	5,59E-03	3,87E-03	0,05	0,05
	29317	2,02E-02	0	1,27E-02	1,24E+06	1,18E+08	2,64E+06	-1816,8	1,05E-02	8,95E-03	90	0,07
	28192	2,03E-02	0	1,27E-02	1,59E+06	1,11E+08	2,52E+06	-2282,8	8,54E-04	1,56E-02	0,10	0,10
3	28192	2,03E-02	0	1,27E-02	1,59E+06	1,11E+08	2,52E+06	-2282,8	8,54E-04	1,56E-02	0,10	0,10
	31747	2,03E-02	0	1,27E-02	1,92E+06	1,03E+08	2,41E+06	-2706,5	4,17E-03	8,37E-03	90	0,12
	30622	2,04E-02	0	1,27E-02	2,14E+06	5,21E+07	1,98E+06	-2812,3	1,14E-03	9,65E-03	0,15	0,15
4	30622	2,04E-02	0	1,27E-02	2,14E+06	5,21E+07	1,98E+06	-2812,3	1,14E-03	9,65E-03	0,15	0,15
	65767	2,04E-02	0	1,27E-02	2,20E+06	7,73E+06	1,50E+06	-2435,2	5,88E-04	2,80E-02	0	0,18
	34267	2,05E-02	0	1,27E-02	2,28E+06	4,45E+07	1,64E+06	-2133	-2,81E-03	3,68E-02	0,20	0,20
5	34267	2,05E-02	0	1,27E-02	2,28E+06	4,45E+07	1,64E+06	-2133	-2,81E-03	3,68E-02	0,20	0,20
	34292	2,06E-02	0	1,27E-02	2,46E+06	7,46E+07	1,80E+06	-2266,1	-1,20E-02	-2,73E-04	90	0,23
	33142	2,06E-02	0	1,27E-02	2,66E+06	6,75E+07	1,67E+06	-2561,8	-2,05E-03	-2,11E-02	0,25	0,25
6	33142	2,06E-02	0	1,27E-02	2,66E+06	6,75E+07	1,67E+06	-2561,8	-2,05E-03	-2,11E-02	0,25	0,25
	37822	2,07E-02	0	1,27E-02	2,84E+06	6,05E+07	1,53E+06	-2832,9	-7,55E-03	-7,41E-03	90	0,28
	36697	2,08E-02	0	1,27E-02	3,00E+06	5,35E+07	1,39E+06	-3082,4	-4,75E-03	-5,27E-03	0,30	0,30
7	36697	2,08E-02	0	1,27E-02	3,00E+06	5,35E+07	1,39E+06	-3082,4	-4,75E-03	-5,27E-03	0,30	0,30
	40252	2,08E-02	0	1,27E-02	3,13E+06	4,66E+07	1,25E+06	-3312,9	-2,86E-03	6,07E-04	90	0,33
	39127	2,09E-02	0	1,27E-02	3,21E+06	2,16E+07	1,80E+06	-3344,4	-4,94E-03	3,85E-03	0,35	0,35
8	39127	2,09E-02	0	1,27E-02	3,21E+06	2,16E+07	1,80E+06	-3344,4	-4,94E-03	3,85E-03	0,35	0,35
	66982	2,10E-02	0	1,27E-02	3,23E+06	2,91E+06	2,31E+06	-3073,7	-3,89E-03	-9,26E-03	0	0,37
	42772	2,10E-02	0	1,27E-02	3,24E+06	1,43E+07	1,44E+06	-2854,7	-6,35E-03	-3,25E-02	0,40	0,40
9	42772	2,10E-02	0	1,27E-02	3,24E+06	1,43E+07	1,44E+06	-2854,7	-6,35E-03	-3,25E-02	0,40	0,40
	42797	2,11E-02	0	1,27E-02	3,27E+06	1,95E+07	6,09E+05	-2911,7	4,82E-03	-1,52E-02	90	0,43
	41647	2,11E-02	0	1,27E-02	3,29E+06	6,95E+06	1,18E+06	-2933,3	-2,69E-03	3,39E-02	0,45	0,45
10	41647	2,11E-02	0	1,27E-02	3,29E+06	6,95E+06	1,18E+06	-2933,3	-2,69E-03	3,39E-02	0,45	0,45
	69412	2,12E-02	0	1,27E-02	3,28E+06	5,71E+05	1,71E+06	-2724,8	-3,52E-03	4,17E-02	0	0,48
	68287	2,13E-02	0	1,27E-02	3,27E+06	-5597,1	1,50E+06	-2435,4	-8,30E-03	1,76E-02	0,50	0,50

	68287	2,13E-02	0	1,27E-02	3,27E+06	-5597,1	1,50E+06	-2435,4	-8,30E-03	1,76E-02	0	0,50
11	70627	2,13E-02	0	1,27E-02	3,25E+06	-5,79E+05	1,28E+06	-2169,3	-7,30E-03	-4,77E-03	0	0,52
	46417	2,14E-02	0	1,27E-02	3,21E+06	-7,40E+06	4,31E+05	-2021,3	-1,03E-02	-3,06E-03	0	0,55
	46417	2,14E-02	0	1,27E-02	3,21E+06	-7,40E+06	4,31E+05	-2021,3	-1,03E-02	-3,06E-03	0	0,55
12	46442	2,15E-02	0	1,27E-02	3,15E+06	-2,01E+07	-3,84E+05	-2032,7	-8,08E-03	1,56E-02	90	0,58
	45292	2,15E-02	0	1,27E-02	3,09E+06	-1,43E+07	-1,12E+05	-2027,5	-1,57E-02	1,53E-02	0	0,60
	45292	2,15E-02	0	1,27E-02	3,09E+06	-1,43E+07	-1,12E+05	-2027,5	-1,57E-02	1,53E-02	0	0,60
13	71842	2,16E-02	0	1,27E-02	3,05E+06	-2,85E+06	1,27E+05	-1907	-1,48E-02	1,37E-02	0	0,62
	50062	2,17E-02	0	1,27E-02	2,99E+06	-2,14E+07	-4,90E+05	-1798,7	-1,88E-02	1,15E-02	0	0,65
	50062	2,17E-02	0	1,27E-02	2,99E+06	-2,14E+07	-4,90E+05	-1798,7	-1,88E-02	1,15E-02	0	0,65
14	50087	2,17E-02	0	1,27E-02	2,87E+06	-4,57E+07	-1,07E+06	-1766,2	-1,51E-02	3,55E-03	90	0,68
	48937	2,18E-02	0	1,27E-02	2,71E+06	-5,20E+07	-1,26E+06	-1756,2	-1,88E-02	4,91E-03	0	0,70
	48937	2,18E-02	0	1,27E-02	2,71E+06	-5,20E+07	-1,26E+06	-1756,2	-1,88E-02	4,91E-03	0	0,70
15	53617	2,18E-02	0	1,27E-02	2,53E+06	-5,83E+07	-1,45E+06	-1729,7	-1,99E-02	3,51E-03	90	0,73
	52492	2,19E-02	0	1,27E-02	2,34E+06	-6,45E+07	-1,64E+06	-1685,5	-1,71E-02	7,18E-03	0	0,75
	52492	2,19E-02	0	1,27E-02	2,34E+06	-6,45E+07	-1,64E+06	-1685,5	-1,71E-02	7,18E-03	0	0,75
16	56047	2,20E-02	0	1,27E-02	2,13E+06	-7,08E+07	-1,84E+06	-1622,2	-2,22E-02	9,10E-03	90	0,77
	54922	2,20E-02	0	1,27E-02	1,96E+06	-4,17E+07	-2,87E+06	-1560,3	-2,10E-02	1,95E-03	0	0,80
	54922	2,20E-02	0	1,27E-02	1,96E+06	-4,17E+07	-2,87E+06	-1560,3	-2,10E-02	1,95E-03	0	0,80
17	73057	2,21E-02	0	1,27E-02	1,90E+06	-7,28E+06	-3,93E+06	-1544,5	-2,07E-02	2,27E-03	0	0,83
	58567	2,22E-02	0	1,27E-02	1,79E+06	-4,87E+07	-3,27E+06	-1498,5	-2,51E-02	-3,08E-03	0	0,85
	58567	2,22E-02	0	1,27E-02	1,79E+06	-4,87E+07	-3,27E+06	-1498,5	-2,51E-02	-3,08E-03	0	0,85
18	58592	2,22E-02	0	1,27E-02	1,56E+06	-9,54E+07	-2,56E+06	-1339,7	-2,09E-02	-5,87E-03	90	0,87
	57442	2,23E-02	0	1,27E-02	1,27E+06	-1,02E+08	-2,77E+06	-1121	-2,65E-02	-3,61E-04	0	0,90
	57442	2,23E-02	0	1,27E-02	1,27E+06	-1,02E+08	-2,77E+06	-1121	-2,65E-02	-3,61E-04	0	0,90
19	62122	2,23E-02	0	1,27E-02	9,68E+05	-1,08E+08	-2,98E+06	-875,19	-2,99E-02	-1,30E-02	90	0,93
	60997	2,24E-02	0	1,27E-02	6,48E+05	-1,14E+08	-3,20E+06	-599,91	-2,19E-02	-1,12E-02	0	0,95
	60997	2,24E-02	0	1,27E-02	6,48E+05	-1,14E+08	-3,20E+06	-599,91	-2,19E-02	-1,12E-02	0	0,95
20	64552	2,25E-02	0	1,27E-02	3,13E+05	-1,20E+08	-3,41E+06	-292,73	-2,84E-02	-3,53E-04	90	0,98
	63427	2,25E-02	0	1,27E-02	1,41E+05	-1,25E+08	-3,59E+06	-126,47	-3,03E-02	-2,57E-03	0	1,00

Anexo N – Implementação do critério de rotura de Hashin 3D a toda a zona curva do novo provete. Valores máximos de cada camada: *Layup I*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Layer	Orientação [graus]	HASHIN 3D - Layup I											Carga Crítica [N]
		Valores Máximos											
		FFT	FALHOU?	FFC	FALHOU?	FMT	S22+S33	FALHOU?	FMC	S22+S33	FALHOU?		
1	90	0,01	1,41E+08	não	1,41E+08	não	0,01	5,92E+05	não	0,01	5,92E+05	não	1373,81
2	90	0,00	1,26E+08	não	1,26E+08	não	0,01	8,69E+05	não	0,01	8,69E+05	não	1219,80
3	90	0,00	1,11E+08	não	1,11E+08	não	0,02	1,05E+06	não	0,02	1,05E+06	não	749,11
4	0	0,00	9,80E+06	não	9,80E+06	não	1,26	3,15E+06	SIM!!!!	0,26	3,15E+06	não	89,06
5	90	0,00	7,48E+07	não	7,48E+07	não	0,01	1,08E+06	não	0,02	1,08E+06	não	879,54
6	90	0,00	6,78E+07	não	6,78E+07	não	0,01	1,17E+06	não	0,01	1,17E+06	não	1139,18
7	90	0,00	5,38E+07	não	5,38E+07	não	0,01	1,22E+06	não	0,02	1,22E+06	não	1000,90
8	0	0,00	3,19E+06	não	3,19E+06	não	0,26	1,86E+06	não	0,09	1,86E+06	não	196,42
9	90	0,00	1,98E+07	não	1,98E+07	não	0,01	1,13E+06	não	0,01	1,13E+06	não	1067,67
10	0	0,00	1,87E+06	não	1,87E+06	não	0,04	1,10E+06	não	0,03	1,10E+06	não	478,87
11	0	0,00	1,79E+06	não	1,88E+06	não	0,03	7,16E+05	não	0,01	7,16E+05	não	537,38
12	90	0,00	-2,28E+06	não	2,66E+07	não	0,01	9,17E+05	não	0,01	9,17E+05	não	1203,91
13	0	0,00	2,89E+06	não	5,35E+06	não	0,23	-9,54E+04	não	0,00	-9,54E+04	não	1995,05
14	90	0,00	-6,49E+06	não	5,82E+07	não	0,01	7,17E+05	não	0,01	7,17E+05	não	1118,33
15	90	0,00	-1,56E+07	não	7,06E+07	não	0,00	5,36E+05	não	0,01	5,36E+05	não	2067,64
16	90	0,00	-1,26E+07	não	7,69E+07	não	0,02	3,50E+05	não	0,01	3,50E+05	não	748,69
17	0	0,00	5,04E+06	não	1,26E+07	não	1,12	-1,93E+06	não	-0,01	-1,94E+06	não	94,46
18	90	0,00	-1,46E+07	não	1,07E+08	não	0,02	1,10E+05	não	0,01	1,10E+05	não	647,00
19	90	0,00	-3,02E+07	não	1,18E+08	não	0,00	-1,83E+05	não	0,00	-1,83E+05	não	1778,81
20	90	0,00	-3,39E+07	não	1,30E+08	não	0,01	-5,07E+05	não	0,00	-5,07E+05	não	1379,87
<b>Valor mínimo [N]</b>												<b>89,1</b>	

## Anexo O – Implementação da *Multilayer Theory* para o novo provete estudado: *Layup J*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Contem os dados, as matrizes dos coeficientes das constantes arbitrárias, vectores de carga e vectores das constantes arbitrárias, para os dois casos de carga, forças e momentos, nos extremos do elemento curvo.

<b>Layup J</b>																																																																																																																																			
Empilhamento: [90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>3</sub> ] → N = 9																																																																																																																																			
<b>Geometria</b>			<b>Material: Hercules AS4/3501-6 epoxy prepreg (WWFE)</b>																																																																																																																																
e [m]	=	0,01	<b>espessura da lâmina [m]</b>		=		1,27E-04																																																																																																																												
a [m]	=	0,02	<b>número total de camadas</b>		=		24																																																																																																																												
h [m]	=	0,0254	<b>espessura total da lâmina [m]</b>		=		3,05E-03																																																																																																																												
			E <sub>L</sub> [Pa]	=	1,26E+11	v <sub>LT</sub>	=	0,280																																																																																																																											
			E <sub>T</sub> [Pa]	=	1,10E+10	v <sub>TL</sub>	=	0,024																																																																																																																											
			E <sub>Z</sub> [Pa]	=	1,10E+10	G <sub>rθ</sub> [Pa]	=	6,60E+09																																																																																																																											
			<b>90°</b>				<b>0°</b>																																																																																																																												
			E <sub>r</sub> [Pa]	=	1,10E+10	E <sub>r</sub> [Pa]	=	1,10E+10																																																																																																																											
			E <sub>θ</sub> [Pa]	=	1,26E+11	E <sub>θ</sub> [Pa]	=	1,10E+10																																																																																																																											
			v <sub>rθ</sub>	=	0,280	v <sub>rθ</sub>	=	0,280																																																																																																																											
			v <sub>θr</sub>	=	0,024	v <sub>θr</sub>	=	0,024																																																																																																																											
			G <sub>rθ</sub> [Pa]	=	6,60E+09	G <sub>rθ</sub> [Pa]	=	6,60E+09																																																																																																																											
			<b>Carga</b>																																																																																																																																
P [N]	=	100																																																																																																																																	
<b>Momento</b>																																																																																																																																			
M [N.m]	=	1																																																																																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Camada (i)</th> <th></th> <th>a<sub>i</sub> [m]</th> <th>E<sub>r</sub></th> <th>E<sub>θ</sub></th> <th>v<sub>rθ</sub></th> <th>v<sub>θr</sub></th> <th>G<sub>rθ</sub></th> <th>β<sub>i</sub></th> <th>k (i)</th> <th>Camada (i)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td></td> <td>0,02</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>90 x 3</td> <td>0,020381</td> <td>1,10E+10</td> <td>1,26E+11</td> <td>0,280</td> <td>0,024</td> <td>6,60E+09</td> <td>5,0</td> <td>3,4</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0 x 3</td> <td>0,020762</td> <td>1,10E+10</td> <td>1,10E+10</td> <td>0,280</td> <td>0,024</td> <td>6,60E+09</td> <td>1,8</td> <td>1,0</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>90 x 2</td> <td>0,021016</td> <td>1,10E+10</td> <td>1,26E+11</td> <td>0,280</td> <td>0,024</td> <td>6,60E+09</td> <td>5,0</td> <td>3,4</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0 x 3</td> <td>0,021397</td> <td>1,10E+10</td> <td>1,10E+10</td> <td>0,280</td> <td>0,024</td> <td>6,60E+09</td> <td>1,8</td> <td>1,0</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>90 x 2</td> <td>0,021651</td> <td>1,10E+10</td> <td>1,26E+11</td> <td>0,280</td> <td>0,024</td> <td>6,60E+09</td> <td>5,0</td> <td>3,4</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>0 x 3</td> <td>0,022032</td> <td>1,10E+10</td> <td>1,10E+10</td> <td>0,280</td> <td>0,024</td> <td>6,60E+09</td> <td>1,8</td> <td>1,0</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>90 x 2</td> <td>0,022286</td> <td>1,10E+10</td> <td>1,26E+11</td> <td>0,280</td> <td>0,024</td> <td>6,60E+09</td> <td>5,0</td> <td>3,4</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>0 x 3</td> <td>0,022667</td> <td>1,10E+10</td> <td>1,10E+10</td> <td>0,280</td> <td>0,024</td> <td>6,60E+09</td> <td>1,8</td> <td>1,0</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>90 x 3</td> <td>0,023048</td> <td>1,10E+10</td> <td>1,26E+11</td> <td>0,280</td> <td>0,024</td> <td>6,60E+09</td> <td>5,0</td> <td>3,4</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table>											Camada (i)		a <sub>i</sub> [m]	E <sub>r</sub>	E <sub>θ</sub>	v <sub>rθ</sub>	v <sub>θr</sub>	G <sub>rθ</sub>	β <sub>i</sub>	k (i)	Camada (i)	0		0,02								0	1	90 x 3	0,020381	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	1	2	0 x 3	0,020762	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	2	3	90 x 2	0,021016	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	3	4	0 x 3	0,021397	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	4	5	90 x 2	0,021651	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	5	6	0 x 3	0,022032	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	6	7	90 x 2	0,022286	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	7	8	0 x 3	0,022667	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	8	9	90 x 3	0,023048	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	9
Camada (i)		a <sub>i</sub> [m]	E <sub>r</sub>	E <sub>θ</sub>	v <sub>rθ</sub>	v <sub>θr</sub>	G <sub>rθ</sub>	β <sub>i</sub>	k (i)	Camada (i)																																																																																																																									
0		0,02								0																																																																																																																									
1	90 x 3	0,020381	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	1																																																																																																																									
2	0 x 3	0,020762	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	2																																																																																																																									
3	90 x 2	0,021016	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	3																																																																																																																									
4	0 x 3	0,021397	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	4																																																																																																																									
5	90 x 2	0,021651	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	5																																																																																																																									
6	0 x 3	0,022032	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	6																																																																																																																									
7	90 x 2	0,022286	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	7																																																																																																																									
8	0 x 3	0,022667	1,10E+10	1,10E+10	0,280	0,024	6,60E+09	1,8	1,0	8																																																																																																																									
9	90 x 3	0,023048	1,10E+10	1,26E+11	0,280	0,024	6,60E+09	5,0	3,4	9																																																																																																																									

	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] = Equação (43), $\sigma_r^{(1)}$	1,49185E-08	-1688426793	1	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(1)}$	1,64005E-08	-1535855200	1	-0,001845076	1683,784444	-1
Equação (44), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	0,001906303	-1629,704186	1
Equação (44), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (44), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (45), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(1)}$	2,93304E-19	0,028059995	-3,53207E-10	-8,87621E-14	-8,84684E-08	3,45327E-10
Equação (46), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	9,17076E-14	8,5627E-08	-3,43685E-10
Equação (46), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (46), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(1)}$	7,78405E-19	0,049167282	7,72457E-12	-4,5929E-13	-1,20463E-07	-8,86921E-11
Equação (47), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	4,74531E-13	1,16594E-07	8,86921E-11
Equação (47), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (47), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (48), Sum i=1 a N=9	2,95288E-10	-30399703,49	0,018870821	3,47371E-05	-30,68233109	0,018521298

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	B <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,79982E-08	1399523351	-1	0	0	0	0	0	0
1,91308E-08	-1316667853	1	-0,001947601	1595,147275	-1	0	0	0
0	0	0	0,002010264	-1545,42392	1	-2,0936E-08	1203136781	-1
0	0	0	0	0	0	2,22134E-08	-1133947695	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,21875E-19	-0,025569219	3,51526E-10	0	0	0	0	0	0
3,42131E-19	0,024055454	-3,50423E-10	-9,36943E-14	-8,38113E-08	3,42606E-10	0	0	0
0	0	0	9,67089E-14	8,11988E-08	-3,41012E-10	-3,74415E-19	-0,021981247	3,48793E-10
0	0	0	0	0	0	3,9726E-19	0,020717166	-3,47722E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8,54232E-19	-0,044802895	-7,72457E-12	0	0	0	0	0	0
9,07987E-19	0,042150445	7,72457E-12	-4,84811E-13	-1,14122E-07	-8,86921E-11	0	0	0
0	0	0	5,0041E-13	1,10564E-07	8,86921E-11	-9,93667E-19	-0,038515978	-7,72457E-12
0	0	0	0	0	0	1,0543E-18	0,03630103	7,72457E-12
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,25668E-10	-16508856,82	0,01215966	3,55519E-05	-28,21045016	0,017966673	2,54527E-10	-13785840,87	0,011800917

A <sub>6</sub>	B <sub>6</sub>	D <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	B <sub>7</sub>	D <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	B <sub>8</sub>	D <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,002052516	1513,610897	-1	0	0	0	0	0	0
0,002116605	-1467,77997	1	-2,42459E-08	1038891974	-1	0	0	0
0	0	0	2,56817E-08	-980811453,7	1	-0,002159804	1438,42242	-1
0	0	0	0	0	0	0,002225309	-1396,080389	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-9,87415E-14	-7,95273E-08	3,39966E-10	0	0	0	0	0	0
1,01825E-13	7,71192E-08	-3,38418E-10	-4,33608E-19	-0,018980503	3,4614E-10	0	0	0
0	0	0	4,59285E-19	0,017919375	-3,451E-10	-1,03903E-13	-7,55768E-08	3,37401E-10
0	0	0	0	0	0	1,07054E-13	7,3352E-08	-3,35898E-10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5,10927E-13	-1,08288E-07	-8,86921E-11	0	0	0	0	0	0
5,26881E-13	1,05009E-07	8,86921E-11	-1,15076E-18	-0,033258014	-7,72457E-12	0	0	0
0	0	0	1,21891E-18	0,031398685	7,72457E-12	-5,37634E-13	-1,02909E-07	-8,86921E-11
0	0	0	0	0	0	5,5394E-13	9,98797E-08	8,86921E-11
3,63608E-05	-26,00208873	0,017444299	2,86074E-10	-11572472,65	0,011462737	3,71642E-05	-24,02267024	0,016951444



(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]
1	0,020000	3,49246E-10	1,37498E-08	2089313,812	82256449,3
	0,020127	12647,97961	497951,9531	1933103,958	76106455,02
1	0,020127	12647,97961	497951,9531	1933103,958	76106455,02
	0,020254	24094,3727	948597,3502	1780691,633	70105969,82
3	0,020254	24094,3727	948597,3502	1780691,633	70105969,82
	0,020381	34391,88062	1354011,048	1631839,497	64245649,48
4	0,020381	34391,88062	1354011,048	142889,4365	5625568,366
	0,020508	34791,76244	1369754,427	124284,4235	4893087,538
2	0,020508	34791,76244	1369754,427	124284,4235	4893087,538
	0,020635	35070,85858	1380742,464	105915,6127	4169906,012
6	0,020635	35070,85858	1380742,464	105915,6127	4169906,012
	0,020762	35233,53775	1387147,156	87777,14659	3455793,173
7	0,020762	35233,53775	1387147,156	998835,0656	39324215,18
	0,020889	40434,54228	1591911,114	858802,1945	33811110,02
3	0,020889	40434,54228	1591911,114	858802,1945	33811110,02
	0,021016	44705,26798	1760049,92	721189,4302	28393284,65
9	0,021016	44705,26798	1760049,92	63806,68061	2512074,04
	0,021143	44499,78819	1751960,165	46444,05104	1828505,946
4	0,021143	44499,78819	1751960,165	46444,05104	1828505,946
	0,021270	44195,23892	1739970,036	29288,91093	1153106,73
11	0,021270	44195,23892	1739970,036	29288,91093	1153106,73
	0,021397	43795,17836	1724219,62	12336,30663	485681,3634
12	0,021397	43795,17836	1724219,62	130448,5858	5135771,093
	0,021524	43662,03813	1718977,879	-141,2974238	-5562,890702
5	0,021524	43662,03813	1718977,879	-141,2974238	-5562,890702
	0,021651	42771,91505	1683933,664	-129235,5658	-5088014,4
14	0,021651	42771,91505	1683933,664	-10303,46239	-405648,1256
	0,021778	42166,82113	1660111,068	-26691,94042	-1050863,796
6	0,021778	42166,82113	1660111,068	-26691,94042	-1050863,796
	0,021905	41478,01817	1632992,841	-42895,28745	-1688790,845
16	0,021905	41478,01817	1632992,841	-42895,28745	-1688790,845
	0,022032	40708,48244	1602696,159	-58917,7691	-2319597,209
17	0,022032	40708,48244	1602696,159	-686888,755	-27042864,37
	0,022159	35964,12358	1415910,377	-810379,6946	-31904712,39
7	0,022159	35964,12358	1415910,377	-810379,6946	-31904712,39
	0,022286	30601,06898	1204766,495	-933131,63	-36737465,75
19	0,022286	30601,06898	1204766,495	-80589,11623	-3172799,852
	0,022413	29755,62249	1171481,201	-96220,7121	-3788217,012
8	0,022413	29755,62249	1171481,201	-96220,7121	-3788217,012
	0,022540	28837,07308	1135317,838	-111684,6287	-4397032,627
21	0,022540	28837,07308	1135317,838	-111684,6287	-4397032,627
	0,022667	27847,98081	1096377,197	-126984,6046	-4999393,88
22	0,022667	27847,98081	1096377,197	-1465132,465	-57682380,49
	0,022794	19069,11828	750752,6882	-1583409,389	-62338952,33
9	0,022794	19069,11828	750752,6882	-1583409,389	-62338952,33
	0,022921	9782,599297	385141,7046	-1701572,148	-66991029,46
24	0,022921	9782,599297	385141,7046	-1701572,148	-66991029,46
	0,023048	-4,65661E-10	-1,83331E-08	-1819696,449	-71641592,47

	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
[X] = Equação (49), $\sigma_r^{(1)}$	2	0,00038378	-68287643,81	0	0	0
Equação (50), $\sigma_r^{(1)}$	2	0,000401475	-62860083,71	-2	-1,999660687	0,120402678
Equação (50), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	2	1,999662539	-0,116024137
Equação (50), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (50), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (50), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (50), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (50), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (50), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (51), $\sigma_r^{(9)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (52), $\sigma_r^{(1)}$	3,69814E-12	2,17957E-16	3,46209E-05	-3,61564E-12	-3,61484E-12	-2,28536E-13
Equação (52), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	3,68323E-12	3,68242E-12	2,24342E-13
Equação (52), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (52), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (52), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (52), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (52), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (52), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (53), $\sigma_r^{(1)}$	-3,38327E-12	0	0	3,70601E-16	0	0
Equação (53), $\sigma_r^{(2)}$	0	0	0	-3,77529E-16	0	0
Equação (53), $\sigma_r^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (53), $\sigma_r^{(4)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (53), $\sigma_r^{(5)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (53), $\sigma_r^{(6)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (53), $\sigma_r^{(7)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (53), $\sigma_r^{(8)}$	0	0	0	0	0	0
Equação (54), Sum i=1 a N=9	1,53852E-05	1,02345E-08	1707,924351	1,56755E-05	1,56736E-05	9,26361E-07

A numeração destas equações é a mesma numeração adoptada por Ko e Jackson (1989) no seu artigo.

B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-0,000419635	57952738,12	0	0	0	0	0	0
2	0,000432002	-54941187,58	-2	-1,999663755	0,113236474	0	0	0
0	0	0	2	1,999665552	-0,109239648	-2	-0,000450946	50775492,68
0	0	0	0	0	0	2	0,000463838	-48212758,41
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,76727E-12	-2,32075E-16	-3,25148E-05	0	0	0	0	0	0
3,81336E-12	2,41837E-16	3,12023E-05	-3,72829E-12	-3,72747E-12	-2,2163E-13	0	0	0
0	0	0	3,79588E-12	3,79505E-12	2,17683E-13	-3,88249E-12	-2,57018E-16	-2,93592E-05
0	0	0	0	0	0	3,92858E-12	2,67505E-16	2,82084E-05
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,44651E-12	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,48868E-12	0	0	3,82147E-16	0	0	0	0	0
0	0	0	-3,89075E-16	0	0	3,55192E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	-3,59409E-12	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,06116E-05	7,65593E-09	1014,539545	1,61594E-05	1,61575E-05	8,98619E-07	1,09342E-05	8,47359E-09	916,6343113

B' <sub>6</sub>	C' <sub>6</sub>	D' <sub>6</sub>	B' <sub>7</sub>	C' <sub>7</sub>	D' <sub>7</sub>	B' <sub>8</sub>	C' <sub>8</sub>	D' <sub>8</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	-1,999666732	0,106691517	0	0	0	0	0	0
2	1,999668476	-0,103033294	-2	-0,000483574	44659484,97	0	0	0
0	0	0	2	0,000496997	-42468420,18	-2	-1,999669622	0,10069802
0	0	0	0	0	0	2	1,999671317	-0,097341207
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3,84094E-12	-3,8401E-12	-2,1513E-13	0	0	0	0	0	0
3,90853E-12	3,90768E-12	2,11409E-13	-3,99771E-12	-2,83794E-16	-2,65892E-05	0	0	0
0	0	0	4,0438E-12	2,95035E-16	2,55762E-05	-3,95359E-12	-3,95274E-12	-2,09E-13
0	0	0	0	0	0	4,02118E-12	4,02032E-12	2,05486E-13
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,93694E-16	0	0	0	0	0	0	0	0
-4,00622E-16	0	0	3,65734E-12	0	0	0	0	0
0	0	0	-3,6995E-12	0	0	4,05241E-16	0	0
0	0	0	0	0	0	-4,12168E-16	0	0
1,66432E-05	1,66413E-05	8,72491E-07	1,12568E-05	9,35094E-09	830,6247853	1,71271E-05	1,71251E-05	8,47839E-07



(i)	Raio r	$\sigma_r$	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$	$\sigma_\theta$ [Pa]
1	0,020000	0	0	968635,0448	38135237,98
	0,020127	5828,019374	229449,5817	878877,632	34601481,58
2	0,020127	5828,019374	229449,5817	878877,632	34601481,58
	0,020254	11024,95123	434053,198	790642,6252	31127662,41
3	0,020254	11024,95123	434053,198	790642,6252	31127662,41
	0,020381	15611,85086	614639,7976	703857,1671	27710912,09
4	0,020381	15611,85086	614639,7976	61649,48762	2427145,182
	0,020508	15873,82474	624953,7299	54197,16625	2133746,703
5	0,020508	15873,82474	624953,7299	54197,16625	2133746,703
	0,020635	16086,99577	633346,2901	46838,03842	1844017,261
6	0,020635	16086,99577	633346,2901	46838,03842	1844017,261
	0,020762	16252,82342	639874,9377	39570,09988	1557877,948
7	0,020762	16252,82342	639874,9379	450182,3193	17723713,36
	0,020889	18640,18069	733865,3816	367865,0713	14482876,82
8	0,020889	18640,18069	733865,3816	367865,0713	14482876,82
	0,021016	20504,72033	807272,454	286690,1399	11287013,38
9	0,021016	20504,72033	807272,4539	25425,53862	1001005,457
	0,021143	20513,26584	807608,8915	18443,25227	726112,294
10	0,021143	20513,26584	807608,8915	18443,25227	726112,294
	0,021270	20480,26869	806309,7911	11544,27267	454498,924
11	0,021270	20480,26869	806309,7911	11544,27267	454498,924
	0,021397	20406,95792	803423,54	4726,873522	186097,3827
12	0,021397	20406,95791	803423,5399	49056,80801	1931370,394
	0,021524	20347,43496	801080,1165	-28266,9764	-1112873,087
13	0,021524	20347,43496	801080,1165	-28266,9764	-1112873,087
	0,021651	19837,67266	781010,7345	-104702,8789	-4122160,587
14	0,021651	19837,67266	781010,7345	-8677,379934	-341629,1313
	0,021778	19652,14978	773706,6842	-15261,66313	-600852,8792
15	0,021778	19652,14978	773706,6842	-15261,66313	-600852,8792
	0,021905	19430,82266	764993,018	-21770,77814	-857117,2497
16	0,021905	19430,82266	764993,018	-21770,77814	-857117,2497
	0,022032	19174,73941	754911,0003	-28206,22823	-1110481,426
17	0,022032	19174,73941	754911,0003	-328760,1076	-12943311,32
	0,022159	16970,82299	668142,6374	-401854,6763	-15821050,25
18	0,022159	16970,82299	668142,6374	-401854,6763	-15821050,25
	0,022286	14377,42926	566040,5222	-474273,1842	-18672172,61
19	0,022286	14377,42926	566040,5221	-40986,37605	-1613636,852
	0,022413	14045,9896	552991,7167	-47232,39901	-1859543,268
20	0,022413	14045,9896	552991,7167	-47232,39901	-1859543,268
	0,022540	13683,28554	538712,029	-53409,99263	-2102755,615
21	0,022540	13683,28554	538712,029	-53409,99263	-2102755,615
	0,022667	13290,22225	523237,0963	-59520,47973	-2343325,974
22	0,022667	13290,22225	523237,0963	-686800,4882	-27039389,3
	0,022794	9195,712687	362035,9326	-756301,1434	-29775635,57
23	0,022794	9195,712687	362035,9326	-756301,1434	-29775635,57
	0,022921	4762,885292	187515,169	-825302,9426	-32492241,84
24	0,022921	4762,885292	187515,169	-825302,9426	-32492241,84
	0,023048	0	0	-893835,2759	-35190365,19

(i)	Raio r	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$ [Pa]	(r-a)/t	
1	1	0,020000	1,37498E-08	120391687	0
		0,020127	727401,5348	110707937	0,041667
	2	0,020127	727401,5348	110707937	0,041667
2		0,020254	1382650,548	101233632	0,083333
	3	0,020254	1382650,548	101233632	0,083333
		0,020381	1968650,846	91956562	0,125
3		0,020381	1968650,846	8052713,5	0,125
	4	0,020508	1994708,157	7026834,2	0,166667
		0,020508	1994708,157	7026834,2	0,166667
4	5	0,020635	2014088,754	6013923,3	0,208333
		0,020635	2014088,754	6013923,3	0,208333
	6	0,020762	2027022,093	5013671,1	0,25
5		0,020762	2027022,093	57047929	0,25
	7	0,020889	2325776,495	48293987	0,291667
		0,020889	2325776,495	48293987	0,291667
6	8	0,021016	2567322,374	39680298	0,333333
		0,021016	2567322,374	3513079,5	0,333333
	9	0,021143	2559569,056	2554618,2	0,375
7		0,021143	2559569,056	2554618,2	0,375
	10	0,021270	2546279,827	1607605,7	0,416667
		0,021270	2546279,827	1607605,7	0,416667
8	11	0,021397	2527643,16	671778,75	0,458333
		0,021397	2527643,16	7067141,5	0,458333
	12	0,021524	2520057,996	-1118436	0,5
9		0,021524	2520057,996	-1118436	0,5
	13	0,021651	2464944,398	-9210175	0,541667
		0,021651	2464944,398	-747277,3	0,541667
10	14	0,021778	2433817,752	-1651717	0,583333
		0,021778	2433817,752	-1651717	0,583333
	15	0,021905	2397985,859	-2545908	0,625
11		0,021905	2397985,859	-2545908	0,625
	16	0,022032	2357607,159	-3430079	0,666667
		0,022032	2357607,159	-39986176	0,666667
12	17	0,022159	2084053,014	-47725763	0,708333
		0,022159	2084053,014	-47725763	0,708333
	18	0,022286	1770807,017	-55409638	0,75
13		0,022286	1770807,017	-4786437	0,75
	19	0,022413	1724472,917	-5647760	0,791667
		0,022413	1724472,917	-5647760	0,791667
14	20	0,022540	1674029,867	-6499788	0,833333
		0,022540	1674029,867	-6499788	0,833333
	21	0,022667	1619614,293	-7342720	0,875
15		0,022667	1619614,293	-84721770	0,875
	22	0,022794	1112788,621	-92114588	0,916667
		0,022794	1112788,621	-92114588	0,916667
16	23	0,022921	572656,8736	-99483271	0,958333
		0,022921	572656,8736	-99483271	0,958333
	24	0,023048	-1,8333E-08	-1,07E+08	1

Anexo P – Tensões a  $\theta = 90^\circ$  e a meio da espessura, retiradas do cálculo numérico em ANSYS 3D, para o novo provete estudado:  
*Layup J*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Camada	NÓDE	Cordenadas Cilíndricas			Tensões [Pa] ANSYS						Orientação	(r-a)/t
		X	Y	Z	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ		
		[m]	[graus]	[m]	Sr	Sθ	SZ	Srθ	SθZ	Srz		
1	30514	2,00E-02	0	1,27E-02	2,27E+05	1,25E+08	2,57E+06	-245,36	1,77E-02	-7,39E-03	90	0,00
	30539	2,01E-02	0	1,27E-02	4,12E+05	1,18E+08	2,46E+06	-429,88	1,76E-02	-1,51E-03	90	0,02
	29389	2,01E-02	0	1,27E-02	7,72E+05	1,13E+08	2,40E+06	-788,85	1,66E-02	2,46E-04	90	0,04
2	29389	2,01E-02	0	1,27E-02	7,72E+05	1,13E+08	2,40E+06	-788,85	1,66E-02	2,46E-04	90	0,04
	34069	2,02E-02	0	1,27E-02	1,11E+06	1,07E+08	2,33E+06	-1122,6	2,06E-02	2,63E-03	90	0,06
	32944	2,03E-02	0	1,27E-02	1,43E+06	1,02E+08	2,27E+06	-1433,3	1,37E-02	5,98E-03	90	0,08
3	32944	2,03E-02	0	1,27E-02	1,43E+06	1,02E+08	2,27E+06	-1433,3	1,37E-02	5,98E-03	90	0,08
	36499	2,03E-02	0	1,27E-02	1,73E+06	9,63E+07	2,19E+06	-1723	1,66E-02	-1,08E-03	90	0,10
	35374	2,04E-02	0	1,27E-02	1,94E+06	4,92E+07	1,61E+06	-1877,2	1,51E-02	-5,77E-03	90	0,13
4	35374	2,04E-02	0	1,27E-02	1,94E+06	4,92E+07	1,61E+06	-1877,2	1,51E-02	-5,77E-03	90	0,13
	65659	2,04E-02	0	1,27E-02	2,00E+06	7,43E+06	1,04E+06	-1825,6	1,45E-02	-5,24E-03	0	0,15
	64534	2,05E-02	0	1,27E-02	2,02E+06	6,97E+06	9,64E+05	-1693,4	1,40E-02	-8,87E-03	0	0,17
5	64534	2,05E-02	0	1,27E-02	2,02E+06	6,97E+06	9,64E+05	-1693,4	1,40E-02	-8,87E-03	0	0,17
	68089	2,06E-02	0	1,27E-02	2,02E+06	6,51E+06	8,89E+05	-1566,6	1,55E-02	4,03E-03	0	0,19
	66964	2,06E-02	0	1,27E-02	2,03E+06	6,05E+06	8,16E+05	-1445,1	9,91E-03	-1,49E-02	0	0,21
6	66964	2,06E-02	0	1,27E-02	2,03E+06	6,05E+06	8,16E+05	-1445,1	9,91E-03	-1,49E-02	0	0,21
	69304	2,07E-02	0	1,27E-02	2,04E+06	5,60E+06	7,44E+05	-1328,7	1,62E-02	-2,09E-02	0	0,23
	39019	2,08E-02	0	1,27E-02	2,09E+06	3,23E+07	1,04E+06	-1304,7	1,16E-02	2,78E-03	90	0,25
7	39019	2,08E-02	0	1,27E-02	2,09E+06	3,23E+07	1,04E+06	-1304,7	1,16E-02	2,78E-03	90	0,25
	39044	2,08E-02	0	1,27E-02	2,22E+06	5,42E+07	1,29E+06	-1424,9	1,33E-02	-2,28E-03	90	0,27
	37894	2,09E-02	0	1,27E-02	2,36E+06	4,91E+07	1,20E+06	-1595,1	9,00E-03	-4,01E-03	90	0,29
8	37894	2,09E-02	0	1,27E-02	2,36E+06	4,91E+07	1,20E+06	-1595,1	9,00E-03	-4,01E-03	90	0,29
	42574	2,10E-02	0	1,27E-02	2,48E+06	4,40E+07	1,10E+06	-1751,6	9,92E-03	-6,12E-03	90	0,31
	41449	2,10E-02	0	1,27E-02	2,56E+06	2,11E+07	1,31E+06	-1827,5	7,98E-03	-5,75E-03	90	0,33
9	41449	2,10E-02	0	1,27E-02	2,56E+06	2,11E+07	1,31E+06	-1827,5	7,98E-03	-5,75E-03	90	0,33
	71734	2,11E-02	0	1,27E-02	2,58E+06	2,98E+06	1,55E+06	-1784,2	7,30E-03	-1,41E-02	0	0,35
	70609	2,11E-02	0	1,27E-02	2,57E+06	2,55E+06	1,46E+06	-1695,4	6,49E-03	-1,11E-02	0	0,38
10	70609	2,11E-02	0	1,27E-02	2,57E+06	2,55E+06	1,46E+06	-1695,4	6,49E-03	-1,11E-02	0	0,38
	74164	2,12E-02	0	1,27E-02	2,56E+06	2,12E+06	1,38E+06	-1611,3	6,19E-03	-1,54E-03	0	0,40
	73039	2,13E-02	0	1,27E-02	2,55E+06	1,69E+06	1,29E+06	-1532	2,30E-03	-9,08E-03	0	0,42
11	73039	2,13E-02	0	1,27E-02	2,55E+06	1,69E+06	1,29E+06	-1532	2,30E-03	-9,08E-03	0	0,42
	75379	2,13E-02	0	1,27E-02	2,54E+06	1,27E+06	1,21E+06	-1457,2	3,41E-03	-2,14E-02	0	0,44
	45094	2,14E-02	0	1,27E-02	2,54E+06	5,16E+06	7,22E+05	-1429,2	1,38E-03	-1,82E-02	0	0,46
12	45094	2,14E-02	0	1,27E-02	2,54E+06	5,16E+06	7,22E+05	-1429,2	1,38E-03	-1,82E-02	0	0,46
	45119	2,15E-02	0	1,27E-02	2,53E+06	4,64E+06	1,96E+05	-1469,1	3,26E-03	-5,42E-03	90	0,48
	43969	2,15E-02	0	1,27E-02	2,52E+06	-1,46E+05	82560	-1530,1	-2,53E-03	-1,50E-03	90	0,50

	43969	2,15E-02	0	1,27E-02	2,52E+06	-1,46E+05	82560	-1530,1	-2,53E-03	-1,50E-03	0,50
13	48649	2,16E-02	0	1,27E-02	2,50E+06	-4,90E+06	-32504	-1580,6	-1,38E-03	2,52E-03	90 0,52
	47524	2,17E-02	0	1,27E-02	2,47E+06	-5,20E+06	2,92E+05	-1595,4	-7,31E-03	-4,44E-03	0,54
	47524	2,17E-02	0	1,27E-02	2,47E+06	-5,20E+06	2,92E+05	-1595,4	-7,31E-03	-4,44E-03	0,54
14	77809	2,17E-02	0	1,27E-02	2,45E+06	-1,22E+06	6,53E+05	-1564,9	-4,37E-03	-5,20E-03	0 0,56
	76684	2,18E-02	0	1,27E-02	2,43E+06	-1,63E+06	5,53E+05	-1518,4	-9,26E-03	-3,36E-03	0,58
	76684	2,18E-02	0	1,27E-02	2,43E+06	-1,63E+06	5,53E+05	-1518,4	-9,26E-03	-3,36E-03	0,58
15	80239	2,18E-02	0	1,27E-02	2,41E+06	-2,04E+06	4,50E+05	-1476,3	-7,30E-03	-1,08E-02	0 0,60
	79114	2,19E-02	0	1,27E-02	2,39E+06	-2,44E+06	3,44E+05	-1438,3	-9,26E-03	-1,09E-02	0,63
	79114	2,19E-02	0	1,27E-02	2,39E+06	-2,44E+06	3,44E+05	-1438,3	-9,26E-03	-1,09E-02	0,63
16	81454	2,20E-02	0	1,27E-02	2,37E+06	-2,84E+06	2,36E+05	-1404,5	-8,62E-03	-9,55E-03	0 0,65
	51169	2,20E-02	0	1,27E-02	2,32E+06	-2,04E+07	-3,47E+05	-1372,7	-1,14E-02	-6,53E-03	0,67
	51169	2,20E-02	0	1,27E-02	2,32E+06	-2,04E+07	-3,47E+05	-1372,7	-1,14E-02	-6,53E-03	0,67
17	51194	2,21E-02	0	1,27E-02	2,20E+06	-4,20E+07	-9,57E+05	-1333,6	-7,52E-03	-7,48E-03	90 0,69
	50044	2,22E-02	0	1,27E-02	2,06E+06	-4,66E+07	-1,09E+06	-1285,6	-1,58E-02	-1,15E-02	0,71
	50044	2,22E-02	0	1,27E-02	2,06E+06	-4,66E+07	-1,09E+06	-1285,6	-1,58E-02	-1,15E-02	0,71
18	54724	2,22E-02	0	1,27E-02	1,91E+06	-5,11E+07	-1,23E+06	-1227,6	-8,68E-03	-7,84E-03	90 0,73
	53599	2,23E-02	0	1,27E-02	1,79E+06	-3,01E+07	-1,42E+06	-1178,4	-1,25E-02	-8,07E-04	0,75
	53599	2,23E-02	0	1,27E-02	1,79E+06	-3,01E+07	-1,42E+06	-1178,4	-1,25E-02	-8,07E-04	0,75
19	83884	2,23E-02	0	1,27E-02	1,74E+06	-5,23E+06	-1,59E+06	-1159,4	-1,60E-02	-1,09E-02	0 0,77
	82759	2,24E-02	0	1,27E-02	1,72E+06	-5,62E+06	-1,72E+06	-1154,7	-1,44E-02	-1,52E-02	0,79
	82759	2,24E-02	0	1,27E-02	1,72E+06	-5,62E+06	-1,72E+06	-1154,7	-1,44E-02	-1,52E-02	0,79
20	86314	2,25E-02	0	1,27E-02	1,69E+06	-6,00E+06	-1,85E+06	-1153,9	-1,67E-02	-4,67E-03	0 0,81
	85189	2,25E-02	0	1,27E-02	1,66E+06	-6,39E+06	-1,99E+06	-1156,7	-1,74E-02	-7,02E-03	0,83
	85189	2,25E-02	0	1,27E-02	1,66E+06	-6,39E+06	-1,99E+06	-1156,7	-1,74E-02	-7,02E-03	0,83
21	87529	2,26E-02	0	1,27E-02	1,64E+06	-6,77E+06	-2,13E+06	-1163,4	-1,89E-02	-6,77E-03	0 0,85
	57244	2,27E-02	0	1,27E-02	1,54E+06	-4,47E+07	-2,15E+06	-1121,5	-1,72E-02	-2,99E-03	0,88
	57244	2,27E-02	0	1,27E-02	1,54E+06	-4,47E+07	-2,15E+06	-1121,5	-1,72E-02	-2,99E-03	0,88
22	57269	2,27E-02	0	1,27E-02	1,34E+06	-8,64E+07	-2,18E+06	-986,31	-2,27E-02	-8,73E-03	90 0,90
	56119	2,28E-02	0	1,27E-02	1,08E+06	-9,07E+07	-2,33E+06	-807,03	-1,59E-02	-5,59E-03	0,92
	56119	2,28E-02	0	1,27E-02	1,08E+06	-9,07E+07	-2,33E+06	-807,03	-1,59E-02	-5,59E-03	0,92
23	60799	2,29E-02	0	1,27E-02	8,22E+05	-9,50E+07	-2,49E+06	-616,4	-2,43E-02	-3,46E-03	90 0,94
	59674	2,29E-02	0	1,27E-02	5,47E+05	-9,93E+07	-2,65E+06	-413,84	-1,68E-02	-2,23E-03	0,96
	59674	2,29E-02	0	1,27E-02	5,47E+05	-9,93E+07	-2,65E+06	-413,84	-1,68E-02	-2,23E-03	0,96
24	63229	2,30E-02	0	1,27E-02	2,63E+05	-1,04E+08	-2,81E+06	-198,77	-2,37E-02	5,63E-03	90 0,98
	62104	2,30E-02	0	1,27E-02	1,18E+05	-1,08E+08	-2,93E+06	-86,54	-2,21E-02	7,67E-03	1,00

Anexo Q – Implementação do critério de rotura de Hashin 3D a toda a zona curva do novo provete. Valores máximos de cada camada: *Layup J*

Folha de cálculo em *Microsoft Office Excel*.

Layer	Orientação [graus]	HASHIN 3D - Layup J											Carga Crítica [N]
		Valores Máximos											
		FFT	FALHOU?	FFC	FALHOU?	FMT	S22+S33	FALHOU?	FMC	S22+S33	FALHOU?		
1	90	0,00	1,25E+08	não	1,25E+08	não	0,00	5,75E+05	não	0,01	5,75E+05	não	1567,81
2	90	0,00	1,13E+08	não	1,13E+08	não	0,01	8,33E+05	não	0,01	8,33E+05	não	1358,64
3	90	0,00	1,02E+08	não	1,02E+08	não	0,01	1,02E+06	não	0,01	1,02E+06	não	1281,89
4	0	0,00	4,82E+06	não	4,82E+06	não	1,12	2,94E+06	SIM!!!!	0,24	2,94E+06	não	94,42
5	0	0,00	4,49E+06	não	4,49E+06	não	0,03	2,59E+06	não	0,03	2,59E+06	não	550,62
6	0	0,00	3,85E+06	não	3,85E+06	não	0,50	2,30E+06	não	0,14	2,30E+06	não	140,93
7	90	0,00	5,42E+07	não	5,42E+07	não	0,01	9,29E+05	não	0,01	9,29E+05	não	1409,17
8	90	0,00	4,91E+07	não	4,91E+07	não	0,01	9,82E+05	não	0,01	9,82E+05	não	1294,59
9	0	0,00	2,03E+06	não	2,03E+06	não	0,24	1,63E+06	não	0,09	1,63E+06	não	206,20
10	0	0,00	1,75E+06	não	1,75E+06	não	0,01	1,33E+06	não	0,02	1,33E+06	não	984,51
11	0	0,00	1,29E+06	não	1,29E+06	não	0,02	1,04E+06	não	0,02	1,04E+06	não	651,02
12	90	0,00	5,16E+06	não	5,68E+06	não	0,00	7,63E+05	não	0,01	7,63E+05	não	1522,71
13	90	0,00	-1,43E+05	não	1,05E+07	não	0,00	6,91E+05	não	0,01	6,91E+05	não	1709,92
14	0	0,00	1,09E+06	não	1,39E+06	não	0,02	1,80E+05	não	0,00	1,80E+05	não	718,69
15	0	0,00	1,28E+06	não	2,00E+06	não	0,00	-8,70E+04	não	0,00	-8,70E+04	não	1804,47
16	0	0,00	1,38E+06	não	2,31E+06	não	0,21	-3,58E+05	não	0,00	-3,58E+05	não	3548,29
17	90	0,00	-6,31E+06	não	5,24E+07	não	0,00	4,27E+05	não	0,01	4,27E+05	não	1747,86
18	90	0,00	-9,22E+06	não	5,70E+07	não	0,00	2,68E+05	não	0,01	2,68E+05	não	2164,24
19	0	0,00	1,54E+06	não	4,70E+06	não	0,46	-1,32E+06	não	0,00	-1,31E+06	não	148,10
20	0	0,00	2,24E+06	não	5,39E+06	não	0,02	-1,54E+06	não	0,00	-1,54E+06	não	788,29
21	0	0,00	2,80E+06	não	5,74E+06	não	0,96	-1,81E+06	não	0,00	-1,81E+06	não	102,15
22	90	0,00	-1,36E+07	não	9,58E+07	não	0,01	4,09E+04	não	0,01	4,09E+04	não	1403,93
23	90	0,00	-2,75E+07	não	1,04E+08	não	0,00	-2,12E+05	não	0,00	-2,12E+05	não	2158,17
24	90	0,00	-3,01E+07	não	1,12E+08	não	0,00	-4,82E+05	não	0,00	-4,82E+05	não	1692,29
<b>Valor mínimo [N]</b>												<b>94,4</b>	

## Anexo R – Ficheiro de comandos do modelo em ANSYS MEF 3D, para o provete de Sun e Kelly (1988): *Layup H*

**Nota:** o ficheiro de comandos está formatado a duas colunas, contudo ao copiar para um ficheiro *.txt*, deve-se manter uma formatação a uma coluna, necessária para ser carregado pelo *software*.

```

/TITLE, SUN AND KELLY 1988 - Layup H
(VALIDATION)
/PREP7
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição de Parâmetros!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Unidades: metro[m], Newton[N]; Pascal[Pa]
inch=25.4e-3          !1 polgada
lb=4.44822162        !1 libra-força
nPLIES=20            !Número de Camadas
PLYt=0.005*inch     !Espessura de cada
Camada
THICKNESS=nPLIES*PLYt !Espessura Total do
Provete
WIDTHh=inch          !Largura Total do Provete
RADIUSa=0.18*inch    !Raio interno da Zona
Curva
LENGThe=(3*inch)-(RADIUSa+THICKNESS)
!Comprimento das Abas do Provete
P=100*lb              !Carga Aplicada
!!!Estrutura da Malha
np=2                  !Número de divisões em cada camada
!!!Abas Planas
ne=60                 !Número de divisões em cada aba
(eixo X)
nh=26                 !Número de divisões ao longo da
largura (eixo Z)
!!!Semicircunferência
ntheta=18 !Número de divisões ao longo da
semicircunferência
!!!Definição do Tipo de Elemento
ET,1,SOLID64 !Tipo de Elemento Sólido
Anisotrópico
!!!Opções do Tipo de Elemento
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,0
!!! Propriedades do Material Hercules AS4/3501-6
graphite/epoxy prepreg (Sun and Kelly, 1988)
E1=137.9e9 !Módulo de Young Longitudinal
E2=10e9 !Módulo de Young Transversal
E3=10e9 !Módulo de Young Interlaminar
G123=5.24e9 !Módulo de Corte
V12=0.3 !Coeficiente de Poisson
v21=V12*(E2/E1) !Coeficiente de Poisson
v3=0.2 !Coeficiente de Poisson
!Considerado devido ao erro do ANSYS
!!!Sequência de Empilhamento H [90/0(3)/90(2)/0(3)/90]s
!!!Material 1: Orientação da Camada a 90°:
MP,EX,1,E3
MP,EY,1,E1
MP,EZ,1,E2
MP,GXY,1,G123
MP,GYZ,1,G123
MP,GXZ,1,G123
MP,PRXY,1,v3
MP,PRYZ,1,v12
MP,PRXZ,1,v3
!!!Material 2: Orientação da Camada a 0°
MP,EX,2,E3
MP,EY,2,E2
MP,EZ,2,E1
MP,GXY,2,G123
MP,GYZ,2,G123
MP,GXZ,2,G123
MP,PRXY,2,v3
MP,PRYZ,2,v21
MP,PRXZ,2,v3
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Geometria!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Keypoints!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*DO,i,0,nPLIES
K,,-LENGThe,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,0,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,(RADIUSa+i*PLYt),0
K,,(RADIUSa+i*PLYt),-LENGThe
*ENDDO
!!!Keypoint na Origem
K,,0,0,0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Linhas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal
!!!Linhas Horizontais
L,1,2
L,5,6
L,9,10
L,13,14
L,17,18
L,21,22
L,25,26
L,29,30
L,33,34
L,37,38
L,41,42
L,45,46
L,49,50
L,53,54
L,57,58
L,61,62
L,65,66
L,69,70
L,73,74
L,77,78
L,81,82
!!!Linhas Verticais
L,1,5
L,5,9
L,9,13
L,13,17
L,17,21
L,21,25
L,25,29
L,29,33
L,33,37
L,37,41
L,41,45
L,45,49
L,49,53
L,53,57
L,57,61
L,61,65
L,65,69
L,69,73
L,73,77
L,77,81
L,2,6
L,6,10
L,10,14
L,14,18
L,18,22
L,22,26
L,26,30
L,30,34
L,34,38
L,38,42
L,42,46
L,46,50
L,50,54
L,54,58
L,58,62
L,62,66
L,66,70
L,70,74
L,74,78
L,78,82
!!!Aba Vertical
!!!Linhas Horizontais
L,3,7

```

L,7,11	LARC,50,51,85,(RADIUSa+12*PLYt)
L,11,15	LARC,54,55,85,(RADIUSa+13*PLYt)
L,15,19	LARC,58,59,85,(RADIUSa+14*PLYt)
L,19,23	LARC,62,63,85,(RADIUSa+15*PLYt)
L,23,27	LARC,66,67,85,(RADIUSa+16*PLYt)
L,27,31	LARC,70,71,85,(RADIUSa+17*PLYt)
L,31,35	LARC,74,75,85,(RADIUSa+18*PLYt)
L,35,39	LARC,78,79,85,(RADIUSa+19*PLYt)
L,39,43	LARC,82,83,85,(RADIUSa+20*PLYt)
L,43,47	CSYS,0 !Sistema de Coordenadas Cartesiano
L,47,51	!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
L,51,55	!!!Definição de Áreas!!!
L,55,59	!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
L,59,63	!!!Aba Horizontal
L,63,67	AL,22,42,1,2
L,67,71	AL,23,43,2,3
L,71,75	AL,24,44,3,4
L,75,79	AL,25,45,4,5
L,79,83	AL,26,46,5,6
L,4,8	AL,27,47,6,7
L,8,12	AL,28,48,7,8
L,12,16	AL,29,49,8,9
L,16,20	AL,30,50,9,10
L,20,24	AL,31,51,10,11
L,24,28	AL,32,52,11,12
L,28,32	AL,33,53,12,13
L,32,36	AL,34,54,13,14
L,36,40	AL,35,55,14,15
L,40,44	AL,36,56,15,16
L,44,48	AL,37,57,16,17
L,48,52	AL,38,58,17,18
L,52,56	AL,39,59,18,19
L,56,60	AL,40,60,19,20
L,60,64	AL,41,61,20,21
L,64,68	!!!Aba Vertical
L,68,72	AL,62,82,102,103
L,72,76	AL,63,83,103,104
L,76,80	AL,64,84,104,105
L,80,84	AL,65,85,105,106
!!!Linhas Verticais	AL,66,86,106,107
L,3,4	AL,67,87,107,108
L,7,8	AL,68,88,108,109
L,11,12	AL,69,89,109,110
L,15,16	AL,70,90,110,111
L,19,20	AL,71,91,111,112
L,23,24	AL,72,92,112,113
L,27,28	AL,73,93,113,114
L,31,32	AL,74,94,114,115
L,35,36	AL,75,95,115,116
L,39,40	AL,76,96,116,117
L,43,44	AL,77,97,117,118
L,47,48	AL,78,98,118,119
L,51,52	AL,79,99,119,120
L,55,56	AL,80,100,120,121
L,59,60	AL,81,101,121,122
L,63,64	CSYS,1 !Sistema de Coordenadas Cilindrico
L,67,68	!!!Quarto de Circunferência
L,71,72	AL,42,62,123,124
L,75,76	AL,43,63,124,125
L,79,80	AL,44,64,125,126
L,83,84	AL,45,65,126,127
!!!Linhas em Arco	AL,46,66,127,128
CSYS,1 !Sistema de Coordenadas Cilindrico	AL,47,67,128,129
!!!Quarto de Circunferência	AL,48,68,129,130
LARC,2,3,85,(RADIUSa+0*PLYt)	AL,49,69,130,131
LARC,6,7,85,(RADIUSa+1*PLYt)	AL,50,70,131,132
LARC,10,11,85,(RADIUSa+2*PLYt)	AL,51,71,132,133
LARC,14,15,85,(RADIUSa+3*PLYt)	AL,52,72,133,134
LARC,18,19,85,(RADIUSa+4*PLYt)	AL,53,73,134,135
LARC,22,23,85,(RADIUSa+5*PLYt)	AL,54,74,135,136
LARC,26,27,85,(RADIUSa+6*PLYt)	AL,55,75,136,137
LARC,30,31,85,(RADIUSa+7*PLYt)	AL,56,76,137,138
LARC,34,35,85,(RADIUSa+8*PLYt)	AL,57,77,138,139
LARC,38,39,85,(RADIUSa+9*PLYt)	AL,58,78,139,140
LARC,42,43,85,(RADIUSa+10*PLYt)	AL,59,79,140,141
LARC,46,47,85,(RADIUSa+11*PLYt)	AL,60,80,141,142

```

AL,61,81,142,143
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Extrusão!!!
!!!!!!!!!!!!!!
VEXT,ALL,,,0,0,WIDTHh,1,1,1
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição da Malha!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Divisões das Linhas para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleção de Linhas para a Malha
!!!Divisão de cada Camada por "np" Elementos
!!!Linhas Rectas para Z=0
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Y,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Rectas para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Y,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
!!!Divisão das Linhas em "ne" divisões
!!!Linhas rectas para eixo X e Z=0
LSEL,S,LOC,X,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas rectas para eixo X e Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,X,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas rectas para eixo Y e Z=0
LSEL,S,LOC,Y,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas rectas para eixo Y e Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Y,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Divisão das Linhas em "nh" divisões
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh
ALLSEL,ALL
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Divisão das Linhas Curvas em "ntheta" divisões
LSEL,S,LOC,Y,45
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,45
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleção de volumes para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
LOCAL,11,0,0,0,90,,,1,1,
!!!Volumes Planos
!!!Aba Horizontal
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,1
VSEL,A,VOLU,,5,6,1
VSEL,A,VOLU,,10,11,1
VSEL,A,VOLU,,15,16,1
VSEL,A,VOLU,,20
VATT,1,,1,1
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,2,4,1
VSEL,A,VOLU,,7,9,1
VSEL,A,VOLU,,12,14,1
VSEL,A,VOLU,,17,19,1
VATT,2,,1,1
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
LOCAL,12,0,0,0,0,,,1,1,
!!!Aba vertical
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,21
VSEL,A,VOLU,,25,26,1
VSEL,A,VOLU,,30,31,1
VSEL,A,VOLU,,35,36,1
VSEL,A,VOLU,,40
VATT,1,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,22,24,1
VSEL,A,VOLU,,27,29,1
VSEL,A,VOLU,,32,34,1
VSEL,A,VOLU,,37,39,1
VATT,2,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Volumes Curvos

```

```

LOCAL,13,1,0,0,0,,,1,1
!!!Quarto de Circunferência
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,41
VSEL,A,VOLU,,45,46,1
VSEL,A,VOLU,,50,51,1
VSEL,A,VOLU,,55,56,1
VSEL,A,VOLU,,60
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,42,44,1
VSEL,A,VOLU,,47,49,1
VSEL,A,VOLU,,52,54,1
VSEL,A,VOLU,,57,59,1
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!Definição das!!!!!!!!!!!!
!!!!Condições de Fronteira!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aplicação de Forças!!!
!!!e Constrangimentos!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Forças na Aba Superior
NSEL,S,Loc,X,-LENGThe
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDThh/2
D,ALL,,0,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
NSEL,S,Loc,X,-LENGThe
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,0
D,ALL,,0,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
NSEL,S,Loc,X,-LENGThe
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDThh
D,ALL,,0,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
!!!Constrangimentos

```

```

NSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
NSEL,R,LOC,X,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDThh/2
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
NSEL,R,LOC,X,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,0
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
NSEL,R,LOC,X,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDThh
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Solução!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Pós Processamento!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
FINISH
/POST1
RSYS,1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELEÇÃO DOS ELEMENTOS DO MEIO DA
ESPESSURA E LARGURA!!!
!!!!PARA CÁLCULO DAS TENSÕES RADIAIS E
CIRCUNFERENCIAIS!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
!!!SELEÇÃO DOS NÓS PARA Y=25° E A MEIO DA
LARGURA Z
ALLSEL,ALL
CSYS,1
NSEL,S,LOC,Y,(90-25)
NSEL,R,LOC,Z,(WIDThh/2)
!!!COORDENADAS
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD
DSYS,0
!!!TENSÕES
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
PRNSOL,S,COMP
CSYS,0
ALLSEL,ALL

```

## Anexo S – Ficheiro de comandos do modelo em ANSYS MEF 3D, para o provete de Sun e Kelly (1988): *Layup I*

**Nota:** o ficheiro de comandos está formatado a duas colunas, contudo ao copiar para um ficheiro *.txt*, deve-se manter uma formatação a uma coluna, necessária para ser carregado pelo *software*.

```

/TITLE, SUN AND KELLY 1988 - Layup I
(VALIDATION)
/PREP7
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição de Parâmetros!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Unidades: metro[m], Newton[N]; Pascal[Pa]
inch=25.4e-3 !1 polgada
lb=4.44822162 !1 libra-força
nPLIES=20 !Número de Camadas
PLYt=0.005*inch !Espessura de cada Camada
THICKNESS=nPLIES*PLYt !Espessura Total do
Provete
WIDTHh=inch !Largura Total do Provete
RADIUSa=0.18*inch !Raio interno da Zona
Curva
LENGTh=(3*inch)-(RADIUSa+THICKNESS)
!Comprimento das Abas do Provete
P=100*lb !Carga Aplicada
!!!Estrutura da Malha
np=2 !Número de divisões em cada camada
!!!Abas Planas
ne=60 !Número de divisões em cada aba
(eixo X)
nh=26 !Número de divisões ao longo da
largura (eixo Z)
!!!Semicircunferência
ntheta=18 !Número de divisões ao longo da
semicircunferência
!!!Definição do Tipo de Elemento
ET,1,SOLID64 !Tipo de
Elemento Sólido Anisotrópico
!!!Opções do Tipo de Elemento
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,0
!!! Propriedades do Material Hercules AS4/3501-6
graphite/epoxy prepreg (Sun and Kelly, 1988)
E1=137.9e9 !Módulo de Young Longitudinal
E2=10e9 !Módulo de Young Transversal
E3=10e9 !Módulo de Young Interlaminar
G123=5.24e9 !Módulo de Corte
V12=0.3 !Coeficiente de Poisson
v21=V12*(E2/E1) !Coeficiente de Poisson
v3=0.2 !Coeficiente de Poisson
!Considerado devido ao erro do ANSYS
!!!Sequência de Empilhamento I [90(3)/0/90(3)/0/90/0]s
!!!Material 1: Orientação da Camada a 90°:
MP,EX,1,E3
MP,EY,1,E1
MP,EZ,1,E2
MP,GXY,1,G123
MP,GYZ,1,G123
MP,GXZ,1,G123
MP,PRXY,1,v3
MP,PRYZ,1,v12
MP,PRXZ,1,v3
!!!Material 2: Orientação da Camada a 0°
MP,EX,2,E3
MP,EY,2,E2
MP,EZ,2,E1
MP,GXY,2,G123
MP,GYZ,2,G123
MP,GXZ,2,G123
MP,PRXY,2,v3
MP,PRYZ,2,v21
MP,PRXZ,2,v3
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Geometria!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Keypoints!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*DO,i,0,nPLIES
K,,-LENGTh,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,0,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,(RADIUSa+i*PLYt),0
K,,(RADIUSa+i*PLYt),-LENGTh
*ENDDO
!!!Keypoint na Origem
K,,0,0,0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Linhas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal
!!!Linhas Horizontais
L,1,2
L,5,6
L,9,10
L,13,14
L,17,18
L,21,22
L,25,26
L,29,30
L,33,34
L,37,38
L,41,42
L,45,46
L,49,50
L,53,54
L,57,58
L,61,62
L,65,66
L,69,70
L,73,74
L,77,78
L,81,82
!!!Linhas Verticais
L,1,5
L,5,9
L,9,13
L,13,17
L,17,21
L,21,25
L,25,29
L,29,33
L,33,37
L,37,41
L,41,45
L,45,49
L,49,53
L,53,57
L,57,61
L,61,65
L,65,69
L,69,73
L,73,77
L,77,81
L,2,6
L,6,10
L,10,14
L,14,18
L,18,22
L,22,26
L,26,30
L,30,34
L,34,38
L,38,42
L,42,46
L,46,50
L,50,54
L,54,58
L,58,62
L,62,66
L,66,70
L,70,74
L,74,78
L,78,82
!!!Aba Vertical
!!!Linhas Horizontais
L,3,7
L,7,11

```

L,11,15	LARC,54,55,85,(RADIUSa+13*PLYt)
L,15,19	LARC,58,59,85,(RADIUSa+14*PLYt)
L,19,23	LARC,62,63,85,(RADIUSa+15*PLYt)
L,23,27	LARC,66,67,85,(RADIUSa+16*PLYt)
L,27,31	LARC,70,71,85,(RADIUSa+17*PLYt)
L,31,35	LARC,74,75,85,(RADIUSa+18*PLYt)
L,35,39	LARC,78,79,85,(RADIUSa+19*PLYt)
L,39,43	LARC,82,83,85,(RADIUSa+20*PLYt)
L,43,47	CSYS,0 !Sistema de Coordenadas Cartesiano
L,47,51	!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
L,51,55	!!!Definição de Áreas!!!
L,55,59	!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
L,59,63	!!!Aba Horizontal
L,63,67	AL,22,42,1,2
L,67,71	AL,23,43,2,3
L,71,75	AL,24,44,3,4
L,75,79	AL,25,45,4,5
L,79,83	AL,26,46,5,6
L,4,8	AL,27,47,6,7
L,8,12	AL,28,48,7,8
L,12,16	AL,29,49,8,9
L,16,20	AL,30,50,9,10
L,20,24	AL,31,51,10,11
L,24,28	AL,32,52,11,12
L,28,32	AL,33,53,12,13
L,32,36	AL,34,54,13,14
L,36,40	AL,35,55,14,15
L,40,44	AL,36,56,15,16
L,44,48	AL,37,57,16,17
L,48,52	AL,38,58,17,18
L,52,56	AL,39,59,18,19
L,56,60	AL,40,60,19,20
L,60,64	AL,41,61,20,21
L,64,68	!!!Aba Vertical
L,68,72	AL,62,82,102,103
L,72,76	AL,63,83,103,104
L,76,80	AL,64,84,104,105
L,80,84	AL,65,85,105,106
!!!Linhas Verticais	AL,66,86,106,107
L,3,4	AL,67,87,107,108
L,7,8	AL,68,88,108,109
L,11,12	AL,69,89,109,110
L,15,16	AL,70,90,110,111
L,19,20	AL,71,91,111,112
L,23,24	AL,72,92,112,113
L,27,28	AL,73,93,113,114
L,31,32	AL,74,94,114,115
L,35,36	AL,75,95,115,116
L,39,40	AL,76,96,116,117
L,43,44	AL,77,97,117,118
L,47,48	AL,78,98,118,119
L,51,52	AL,79,99,119,120
L,55,56	AL,80,100,120,121
L,59,60	AL,81,101,121,122
L,63,64	CSYS,1 !Sistema de Coordenadas Cilindrico
L,67,68	!!!Quarto de Circunferência
L,71,72	AL,42,62,123,124
L,75,76	AL,43,63,124,125
L,79,80	AL,44,64,125,126
L,83,84	AL,45,65,126,127
!!!Linhas em Arco	AL,46,66,127,128
CSYS,1 !Sistema de Coordenadas Cilindrico	AL,47,67,128,129
!!!Quarto de Circunferência	AL,48,68,129,130
LARC,2,3,85,(RADIUSa+0*PLYt)	AL,49,69,130,131
LARC,6,7,85,(RADIUSa+1*PLYt)	AL,50,70,131,132
LARC,10,11,85,(RADIUSa+2*PLYt)	AL,51,71,132,133
LARC,14,15,85,(RADIUSa+3*PLYt)	AL,52,72,133,134
LARC,18,19,85,(RADIUSa+4*PLYt)	AL,53,73,134,135
LARC,22,23,85,(RADIUSa+5*PLYt)	AL,54,74,135,136
LARC,26,27,85,(RADIUSa+6*PLYt)	AL,55,75,136,137
LARC,30,31,85,(RADIUSa+7*PLYt)	AL,56,76,137,138
LARC,34,35,85,(RADIUSa+8*PLYt)	AL,57,77,138,139
LARC,38,39,85,(RADIUSa+9*PLYt)	AL,58,78,139,140
LARC,42,43,85,(RADIUSa+10*PLYt)	AL,59,79,140,141
LARC,46,47,85,(RADIUSa+11*PLYt)	AL,60,80,141,142
LARC,50,51,85,(RADIUSa+12*PLYt)	AL,61,81,142,143

```

CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Extrusão!!!
!!!!!!!!!!!!!!
VEXT,ALL,,0,0,WIDTHh,1,1,1
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição da Malha!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Divisões das Linhas para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleccção de Linhas para a Malha
!!!Divisão de cada Camada por "np" Elementos
!!!Linhas Rectas para Z=0
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Y,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Rectas para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Y,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
!!!Divisão das Linhas em "ne" divisões
!!!Linhas rectas para eixo X e Z=0
LSEL,S,LOC,X,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas rectas para eixo X e Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,X,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas rectas para eixo Y e Z=0
LSEL,S,LOC,Y,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas rectas para eixo Y e Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Y,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Divisão das Linhas em "nh" divisões
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,nh
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,nh
ALLSEL,ALL
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Divisão das Linhas Curvas em "ntheta" divisões
LSEL,S,LOC,Y,45
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,ntheta
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,45
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,ntheta
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleccção de volumes para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
LOCAL,11,0,0,0,90,,1,1,
!!!Volumes Planos
!!!Aba Horizontal
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,1,3,1
VSEL,A,VOLU,,5,7,1
VSEL,A,VOLU,,9,12,3
VSEL,A,VOLU,,14,16,1
VSEL,A,VOLU,,18,20,1
VATT,1,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,4,8,4
VSEL,A,VOLU,,10,11,1
VSEL,A,VOLU,,13,17,4
VATT,2,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
LOCAL,12,0,0,0,,1,1,
!!!Aba vertical
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,21,23,1
VSEL,A,VOLU,,25,27,1
VSEL,A,VOLU,,29,32,3
VSEL,A,VOLU,,34,36,1
VSEL,A,VOLU,,38,40,1
VATT,1,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,24,28,4
VSEL,A,VOLU,,30,31,1
VSEL,A,VOLU,,33,37,4
VATT,2,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Volumes Curvos
LOCAL,13,1,0,0,,1,1,
!!!Quarto de Circunferência
!!!Camadas a 90° (Material 1)

```

```

VSEL,S,VOLU,,41,43,1
VSEL,A,VOLU,,45,47,1
VSEL,A,VOLU,,49,52,3
VSEL,A,VOLU,,54,56,1
VSEL,A,VOLU,,58,60,1
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,44,48,4
VSEL,A,VOLU,,50,51,1
VSEL,A,VOLU,,53,57,4
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!Definição das!!!!!!!
!!!!!!Condições de Fronteira!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aplicação de Forças!!!
!!!e Constrangimentos!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Forças na Aba Superior
NSEL,S,Loc,X,-LENGThe
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh/2
D,ALL,,0,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
NSEL,S,Loc,X,-LENGThe
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,0
D,ALL,,0,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
NSEL,S,Loc,X,-LENGThe
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
D,ALL,,0,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
!!!Constrangimentos
NSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
NSEL,R,LOC,X,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh/2
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
NSEL,R,LOC,X,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
!!!!!!Solução!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Pós Processamento!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
FINISH
/POST1
RSYS,1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS ELEMENTOS DO MEIO DA
ESPESSURA E LARGURA!!!
!!!!PARA CÁLCULO DAS TENSÕES RADIAIS E
CIRCUNFERENCIAIS!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
!!!SELECÇÃO DOS NÓS PARA Y=25° E A MEIO DA
LARGURA Z
ALLSEL,ALL
CSYS,1
NSEL,S,LOC,Y,(90-25)
NSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
!!!COORDENADAS
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD
DSYS,0
!!!TENSÕES
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
PRNSOL,S,COMP
CSYS,0
ALLSEL,ALL

```

## Anexo T – Ficheiro de comandos do modelo em ANSYS MEF 3D, para o provete de Sun e Kelly (1988): *Layup J*

**Nota:** o ficheiro de comandos está formatado a duas colunas, contudo ao copiar para um ficheiro *.txt*, deve-se manter uma formatação a uma coluna, necessária para ser carregado pelo *software*.

```

/TITLE, SUN AND KELLY 1988 - Layup J
(VALIDATION)
/PREP7
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição de Parâmetros!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Unidades: metro[m], Newton[N]; Pascal[Pa]
inch=25.4e-3 !1 polgada
lb=4.44822162 !1 libra-força
nPLIES=24 !Número de Camadas
PLYt=0.0075*inch !Espessura de cada Camada
THICKNESS=nPLIES*PLYt !Espessura Total do
Provete
WIDTHh=inch !Largura Total do Provete
RADIUSa=0.18*inch !Raio interno da Zona
Curva
LENGTHe=((3*inch)-(RADIUSa+THICKNESS))
!Comprimento das Abas do Provete
P=100*lb !Carga Aplicada
!!!Estrutura da Malha
np=2 !Número de divisões em cada camada
!!!Abas Planas
ne=60 !Número de divisões em cada aba
(eixo X)
nh=26 !Número de divisões ao longo da
largura (eixo Z)
!!!Semicircunferência
ntheta=18 !Número de divisões ao longo da
semicircunferência
!!!Definição do Tipo de Elemento
ET,1,SOLID64 !Tipo de Elemento Sólido
Anisotrópico
!!!Opções do Tipo de Elemento
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,0
!!! Propriedades do Material Ferro S-2/CE9000-9
Fiberglass/epoxy prepreg (Sun and Kelly, 1988)
E1=55.78e9 !Módulo de Young Longitudinal
E2=15.72e9 !Módulo de Young Transversal
E3=15.72e9 !Módulo de Young Interlaminar
G123=7.31e9 !Módulo de Corte
V12=0.29 !Coeficiente de Poisson
v21=V12*(E2/E1) !Coeficiente de Poisson
v3=0.2 !Coeficiente de Poisson
!Considerado devido ao erro do ANSYS
!!!Sequência de Empilhamento J [90(3)/0(3)/90(2)/0(3)/90]s
!!!Material 1: Orientação da Camada a 90°:
MP,EX,1,E3
MP,EY,1,E1
MP,EZ,1,E2
MP,GXY,1,G123
MP,GYZ,1,G123
MP,GXZ,1,G123
MP,PRXY,1,v3
MP,PRYZ,1,v12
MP,PRXZ,1,v3
!!!Material 2: Orientação da Camada a 0°
MP,EX,2,E3
MP,EY,2,E2
MP,EZ,2,E1
MP,GXY,2,G123
MP,GYZ,2,G123
MP,GXZ,2,G123
MP,PRXY,2,v3
MP,PRYZ,2,v21
MP,PRXZ,2,v3
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Geometria!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Keypoints!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*DO,i,0,nPLIES
K,,-LENGTHe,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,0,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,(RADIUSa+i*PLYt),0
K,,(RADIUSa+i*PLYt),-LENGTHe
*ENDDO
!!!Keypoint na Origem
K,,0,0,0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Linhas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal
!!!Linhas Horizontais
L,1,2
L,5,6
L,9,10
L,13,14
L,17,18
L,21,22
L,25,26
L,29,30
L,33,34
L,37,38
L,41,42
L,45,46
L,49,50
L,53,54
L,57,58
L,61,62
L,65,66
L,69,70
L,73,74
L,77,78
L,81,82
L,85,86
L,89,90
L,93,94
L,97,98
!!!Linhas Verticais
L,1,5
L,5,9
L,9,13
L,13,17
L,17,21
L,21,25
L,25,29
L,29,33
L,33,37
L,37,41
L,41,45
L,45,49
L,49,53
L,53,57
L,57,61
L,61,65
L,65,69
L,69,73
L,73,77
L,77,81
L,81,85
L,85,89
L,89,93
L,93,97
L,2,6
L,6,10
L,10,14
L,14,18
L,18,22
L,22,26
L,26,30
L,30,34
L,34,38
L,38,42
L,42,46
L,46,50
L,50,54
L,54,58
L,58,62
L,62,66

```

```

L,66,70
L,70,74
L,74,78
L,78,82
L,82,86
L,86,90
L,90,94
L,94,98
!!!Aba Vertical
!!!Linhas Horizontais
L,3,7
L,7,11
L,11,15
L,15,19
L,19,23
L,23,27
L,27,31
L,31,35
L,35,39
L,39,43
L,43,47
L,47,51
L,51,55
L,55,59
L,59,63
L,63,67
L,67,71
L,71,75
L,75,79
L,79,83
L,83,87
L,87,91
L,91,95
L,95,99
L,4,8
L,8,12
L,12,16
L,16,20
L,20,24
L,24,28
L,28,32
L,32,36
L,36,40
L,40,44
L,44,48
L,48,52
L,52,56
L,56,60
L,60,64
L,64,68
L,68,72
L,72,76
L,76,80
L,80,84
L,84,88
L,88,92
L,92,96
L,96,100
!!!Linhas Verticais
L,3,4
L,7,8
L,11,12
L,15,16
L,19,20
L,23,24
L,27,28
L,31,32
L,35,36
L,39,40
L,43,44
L,47,48
L,51,52
L,55,56
L,59,60
L,63,64
L,67,68
L,71,72
L,75,76
L,79,80
L,83,84
L,87,88
L,91,92
L,95,96
L,99,100
!!!Linhas em Arco
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Quarto de Circunferência
LARC,2,3,101,(RADIUSa+0*PLYt)
LARC,6,7,101,(RADIUSa+1*PLYt)
LARC,10,11,101,(RADIUSa+2*PLYt)
LARC,14,15,101,(RADIUSa+3*PLYt)
LARC,18,19,101,(RADIUSa+4*PLYt)
LARC,22,23,101,(RADIUSa+5*PLYt)
LARC,26,27,101,(RADIUSa+6*PLYt)
LARC,30,31,101,(RADIUSa+7*PLYt)
LARC,34,35,101,(RADIUSa+8*PLYt)
LARC,38,39,101,(RADIUSa+9*PLYt)
LARC,42,43,101,(RADIUSa+10*PLYt)
LARC,46,47,101,(RADIUSa+11*PLYt)
LARC,50,51,101,(RADIUSa+12*PLYt)
LARC,54,55,101,(RADIUSa+13*PLYt)
LARC,58,59,101,(RADIUSa+14*PLYt)
LARC,62,63,101,(RADIUSa+15*PLYt)
LARC,66,67,101,(RADIUSa+16*PLYt)
LARC,70,71,101,(RADIUSa+17*PLYt)
LARC,74,75,101,(RADIUSa+18*PLYt)
LARC,78,79,101,(RADIUSa+19*PLYt)
LARC,82,83,101,(RADIUSa+20*PLYt)
LARC,86,87,101,(RADIUSa+21*PLYt)
LARC,90,91,101,(RADIUSa+22*PLYt)
LARC,94,95,101,(RADIUSa+23*PLYt)
LARC,98,99,101,(RADIUSa+24*PLYt)
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Áreas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal
AL,26,1,2,50
AL,27,2,3,51
AL,28,3,4,52
AL,29,4,5,53
AL,30,5,6,54
AL,31,6,7,55
AL,32,7,8,56
AL,33,8,9,57
AL,34,9,10,58
AL,35,10,11,59
AL,36,11,12,60
AL,37,12,13,61
AL,38,13,14,62
AL,39,14,15,63
AL,40,15,16,64
AL,41,16,17,65
AL,42,17,18,66
AL,43,18,19,67
AL,44,19,20,68
AL,45,20,21,69
AL,46,21,22,70
AL,47,22,23,71
AL,48,23,24,72
AL,49,24,25,73
!!!Aba Vertical
AL,74,122,123,98
AL,75,123,124,99
AL,76,124,125,100
AL,77,125,126,101
AL,78,126,127,102
AL,79,127,128,103
AL,80,128,129,104
AL,81,129,130,105
AL,82,130,131,106
AL,83,131,132,107

```

```

AL,84,132,133,108
AL,85,133,134,109
AL,86,134,135,110
AL,87,135,136,111
AL,88,136,137,112
AL,89,137,138,113
AL,90,138,139,114
AL,91,139,140,115
AL,92,140,141,116
AL,93,141,142,117
AL,94,142,143,118
AL,95,143,144,119
AL,96,144,145,120
AL,97,145,146,121
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Quarto de Circunferência
AL,74,50,147,148
AL,75,51,148,149
AL,76,52,149,150
AL,77,53,150,151
AL,78,54,151,152
AL,79,55,152,153
AL,80,56,153,154
AL,81,57,154,155
AL,82,58,155,156
AL,83,59,156,157
AL,84,60,157,158
AL,85,61,158,159
AL,86,62,159,160
AL,87,63,160,161
AL,88,64,161,162
AL,89,65,162,163
AL,90,66,163,164
AL,91,67,164,165
AL,92,68,165,166
AL,93,69,166,167
AL,94,70,167,168
AL,95,71,168,169
AL,96,72,169,170
AL,97,73,170,171
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Extrusão!!!
!!!!!!!!!!!!!!
VEXT,ALL,,0,0,WIDTHh,1,1,1
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!Definição da Malha!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!Divisões das Linhas para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleção de Linhas para a Malha
!!!!Divisão de cada Camada por "np" Elementos
!!!!Linhas Rectas para Z=0
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Y,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
!!!!Linhas Rectas para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Y,0,(RADIUSa+THICKNESS)
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
!!!Divisão das Linhas em "ne" divisões
!!!Linhas rectas para eixo X e Z=0
LSEL,S,LOC,X,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas rectas para eixo X e Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,X,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas rectas para eixo Y e Z=0
LSEL,S,LOC,Y,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas rectas para eixo Y e Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Y,(-LENGThe/2)
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Divisão das Linhas em "nh" divisões
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,nh
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,nh
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,nh
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,nh
ALLSEL,ALL
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Divisão das Linhas Curvas em "ntheta" divisões
LSEL,S,LOC,Y,45
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,ntheta
ALLSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Y,45
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,ntheta
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleção de volumes para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
LOCAL,11,0,0,0,90,,1,1,
!!!Volumes Planos
!!!Aba Horizontal
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,1,3,1
VSEL,A,VOLU,,7,8,1
VSEL,A,VOLU,,12,13,1
VSEL,A,VOLU,,17,18,1
VSEL,A,VOLU,,22,24,1

```

```

VATT,1,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,4,6,1
VSEL,A,VOLU,,9,11,1
VSEL,A,VOLU,,14,16,1
VSEL,A,VOLU,,19,21,1
VATT,2,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
LOCAL,12,0,0,0,0,,,1,1,
!!!Aba vertical
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,25,27,1
VSEL,A,VOLU,,31,32,1
VSEL,A,VOLU,,36,37,1
VSEL,A,VOLU,,41,42,1
VSEL,A,VOLU,,46,48,1
VATT,1,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,28,30,1
VSEL,A,VOLU,,33,35,1
VSEL,A,VOLU,,38,40,1
VSEL,A,VOLU,,43,45,1
VATT,2,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Volumes Curvos
LOCAL,13,1,0,0,0,,,1,1,
!!!Quarto de Circunferência
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,49,51,1
VSEL,A,VOLU,,55,56,1
VSEL,A,VOLU,,60,61,1
VSEL,A,VOLU,,65,66,1
VSEL,A,VOLU,,70,72,1
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,52,54,1
VSEL,A,VOLU,,57,59,1
VSEL,A,VOLU,,62,64,1
VSEL,A,VOLU,,67,69,1
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!Definição das!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Condições de Fronteira!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aplicação de Forças!!!
!!!e Constrangimentos!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Forças na Aba Superior
NSEL,S,Loc,X,-LENGThe
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh/2
D,ALL,,0,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,,ALL
NSEL,S,Loc,X,-LENGThe
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
D,ALL,,0,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,,ALL
!!!Constrangimentos
NSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
NSEL,R,LOC,X,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh/2
D,ALL,ALL,0
NSEL,,ALL
NSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
NSEL,R,LOC,X,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
D,ALL,ALL,0
NSEL,,ALL
NSEL,S,LOC,Y,-LENGThe
NSEL,R,LOC,X,(RADIUSa+(THICKNESS/2))
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
D,ALL,ALL,0
NSEL,,ALL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!Solução!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Pós Processamento!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
FINISH
/POST1
RSYS,1

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS ELEMENTOS DO MEIO DA
ESPESSURA E LARGURA!!!
!!!!!!PARA CÁLCULO DAS TENSÕES RADIAIS E
CIRCUNFERENCIAIS!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
!!!SELECÇÃO DOS NÓS PARA Y=25° E A MEIO DA
LARGURA Z
ALLSEL,ALL
CSYS,1
NSEL,S,LOC,Y,(90-25)
NSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
!!!COORDENADAS
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD
DSYS,0
!!!TENSÕES
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
PRNSOL,S,COMP
CSYS,0
ALLSEL,ALL

```

## Anexo U – Ficheiro de comandos do modelo em ANSYS MEF 3D, para o provete de Ko e Jackson (1988)

**Nota:** o ficheiro de comandos está formatado a duas colunas, contudo ao copiar para um ficheiro *.txt*, deve-se manter uma formatação a uma coluna, necessária para ser carregado pelo *software*.

```

/TITLE, PROVETE SEMICIRCULAR - Ko & Jackson
1989 (VALIDATION)
/PREP7
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição de Parâmetros!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Unidades: metro[m], Newton[N]; Pascal[Pa]
cm=1/100      !1 centimetro
nPLIES=54      !Número de Camadas
PLYt=0.01506*cm      !Espessura de cada
Camada
THICKNESS=nPLIES*PLYt      !Espessura Total do
Provete
WIDTHh=2.54*cm      !Largura Total do Provete
LENGTh=0.9525*cm      !Comprimento do Braço do
Provete (Horizontal)
RADIUSa=2.159*cm      !Raio Interno da Zona Curva
P=1      !Carga Aplicada
!!!Estrutura da Malha
n13=25      !Número de divisões nas cadas camadas 1 e 3
n2=4      !Número de divisões na cada camada 2
!!Abas Planas
ne=10      !Número de divisões em cada aba (eixo X)
nh=16      !Número de divisões ao longo da largura (eixo Z)
!!!Semicircunferência
ntheta=30      !Número de divisões ao longo da
semicircunferência
!!!Definição do Tipo de Elemento
ET,1,SOLID64      !Tipo de Elemento Sólido
Anisotrópico
!!!Opções do Tipo de Elemento
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,0
!!!Sequência de Empilhamento: [0(25)/+15/-
15(2)/+15/0(25)]
!!!Material 1: Orientação da Camada a 0°:
MP,EX,1,0.8274e10      !Dado
MP,EY,1,17.2369e10      !Dado
MP,EZ,1,0.8274e10      !Dado
MP,GXY,1,0.4137e10      !Dado
MP,GYZ,1,0.4137e10      !Dado
MP,GXZ,1,0.4137e10      !Dado
MP,PRXY,1,0.01584      !Dado
MP,PRYZ,1,0.09      !Dado
MP,PRXZ,1,0.09      !Dado
!!!Material 2: Orientação da Camada a +/-15°
MP,EX,2,0.8274e10      !Dado
MP,EY,2,4.8873e10      !Dado
MP,EZ,2,4.8873e10      !Dado
MP,GXY,2,0.4137e10      !Dado
MP,GYZ,2,0.4137e10      !Dado
MP,GXZ,2,0.4137e10      !Dado
MP,PRXY,2,0.05590      !Dado
MP,PRYZ,2,0.09      !Dado
MP,PRXZ,2,0.09      !Dado
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Geometria!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Keypoints!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!3 Camadas
K,1,-LENGTh,(RADIUSa+0*PLYt)
K,2,0,(RADIUSa+0*PLYt)
K,3,(RADIUSa+0*PLYt),0
K,4,0,-(RADIUSa+0*PLYt)
K,5,-LENGTh,-(RADIUSa+0*PLYt)
K,6,-LENGTh,(RADIUSa+25*PLYt)
K,7,0,(RADIUSa+25*PLYt)
K,8,(RADIUSa+25*PLYt),0
K,9,0,-(RADIUSa+25*PLYt)
K,10,-LENGTh,-(RADIUSa+25*PLYt)
K,11,-LENGTh,(RADIUSa+29*PLYt)
K,12,0,(RADIUSa+29*PLYt)
K,13,(RADIUSa+29*PLYt),0
K,14,0,-(RADIUSa+29*PLYt)
K,15,-LENGTh,-(RADIUSa+29*PLYt)
K,16,-LENGTh,(RADIUSa+54*PLYt)
K,17,0,(RADIUSa+54*PLYt)
K,18,(RADIUSa+54*PLYt),0
K,19,0,-(RADIUSa+54*PLYt)
K,20,-LENGTh,-(RADIUSa+54*PLYt)
!!!Keypoint na Origem
K,21,0,0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Linhas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal Superior
!!!Linhas Horizontais
L,1,2
L,6,7
L,11,12
L,16,17
!!!Linhas Verticais
L,1,6
L,6,11
L,11,16
L,2,7
L,7,12
L,12,17
!!!Aba Horizontal Inferior
!!!Linhas Horizontais
L,4,5
L,9,10
L,14,15
L,19,20
!!!Linhas Verticais
L,4,9
L,9,14
L,14,19
L,5,10
L,10,15
L,15,20
!!!Linhas em Arco
CSYS,1      !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Semicircunferência Parte Superior
LARC,2,3,21,(RADIUSa+0*PLYt)
LARC,7,8,21,(RADIUSa+25*PLYt)
LARC,12,13,21,(RADIUSa+29*PLYt)
LARC,17,18,21,(RADIUSa+54*PLYt)
!!!Semicircunferência Parte Inferior
LARC,4,3,21,(RADIUSa+0*PLYt)
LARC,9,8,21,(RADIUSa+25*PLYt)
LARC,14,13,21,(RADIUSa+29*PLYt)
LARC,19,18,21,(RADIUSa+54*PLYt)
CSYS,0      !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!Linhas Horizontais a Y=0
L,3,8
L,8,13
L,13,18
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Áreas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal Superior
AL,1,2,5,8
AL,2,3,6,9
AL,3,4,7,10
!!!Aba Horizontal Inferior
AL,11,12,15,18
AL,12,13,16,19
AL,13,14,17,20
CSYS,1      !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Semicircunferência Parte Superior
AL,21,22,8,29
AL,22,23,9,30
AL,23,24,10,31
!!!Semicircunferência Parte Inferior
AL,25,26,29,15
AL,26,27,30,16
AL,27,28,31,17
CSYS,0      !Sistema de Coordenadas Cartesiano

```

```

!!!!!!!!!!!!!!
!!!Extrusão!!!
!!!!!!!!!!!!!!
VEXT,ALL,,,0,0,WIDTHh,1,1,1
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição da Malha!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Divisões das Linhas para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Divisão de cada Camada por "n" Elementos
!!!Camadas 1 e 3
LSEL,S,,,5,7,2
LSEL,A,,,8,10,2
LSEL,A,,,33,35,2
LSEL,A,,,45,47,2
LSEL,A,,,18,20,2
LSEL,A,,,15,17,2
LSEL,A,,,63,65,2
LSEL,A,,,51,53,2
LSEL,A,,,29,31,2
LSEL,A,,,69
LSEL,A,,,76
LESIZE,ALL,,,n13
ALLSEL,ALL
!!!Camada 2
LSEL,S,,,6,9,3
LSEL,A,,,40,42,2
LSEL,A,,,16,19,3
LSEL,A,,,58,60,2
LSEL,A,,,30
LSEL,A,,,73
LESIZE,ALL,,,n2
ALLSEL,ALL
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Semicircunferência Parte Superior para Z=0
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Inferior para Z=0
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),-45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Superior para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Inferior para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),-45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo X, Z=0)
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,X,-(LENGThe/2)
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo X, Z=WIDTHh)
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,X,-(LENGThe/2)
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo Z, X=-LENGThe)
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo Z, X=0)
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh
ALLSEL,ALL

!!!Linhas Horizontais na Semicircunferência (eixo Z, Y=0)
LSEL,S,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh
ALLSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleção de volumes para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Volumes Planos
!!!Aba Superior
LOCAL,11,0,0,0,90,,,1,1,
!!!Camadas a 0° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,1,3,2
VATT,1,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a +/15° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,2
VATT,2,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Aba Inferior
LOCAL,12,0,0,0,0,-90,,,1,1,
!!!Camadas a 0° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,4,6,2
VATT,1,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a +/15° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,5
VATT,2,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Volumes Curvos
LOCAL,13,1,0,0,0,,,1,1,
!!!Semicircunferência Superior
!!!Camadas a 0° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,7,9,2
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a +/15° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,8
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Inferior
!!!Camadas a 0° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,10,12,2
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a +/15° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,11
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição das!!!!!!

```

```

!!!!Condições de Fronteira!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aplicação de Forças!!!
!!!e Constrangimentos!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Forças na Aba Superior
NSEL,S,Loc,X,-LENGThE
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+THICKNESS)
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh/2
D,ALL,,0,,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
NSEL,S,Loc,X,-LENGThE
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+THICKNESS)
NSEL,R,LOC,Z,0
D,ALL,,0,,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
NSEL,S,Loc,X,-LENGThE
NSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa+THICKNESS)
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
D,ALL,,0,,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
!!!Constrangimentos
NSEL,S,LOC,X,-LENGThE
NSEL,R,LOC,Y,-(RADIUSa+THICKNESS)
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh/2
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-LENGThE
NSEL,R,LOC,Y,-(RADIUSa+THICKNESS)
NSEL,R,LOC,Z,0
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,-LENGThE
NSEL,R,LOC,Y,-(RADIUSa+THICKNESS)
NSEL,R,LOC,Z,WIDTHh

D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Solução!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Pós Processamento!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
FINISH
/POST1
RSYS,1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS ELEMENTOS DO MEIO DA
ESPESSURA E LARGURA!!!
!!!!PARA CÁLCULO DAS TENSÕES RADIAIS E
CIRCUNFERÊNCIAIS!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS NÓS PARA Y=0° E A MEIO DA
LARGURA Z
ALLSEL,ALL
CSYS,1
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
CSYS,0
!!!COORDENADAS
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
!!!TENSÕES
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP

```

## Anexo V – Ficheiro de comandos do modelo em ANSYS MEF 3D, para o novo provete: *Layup H*

**Nota:** o ficheiro de comandos está formatado a duas colunas, contudo ao copiar para um ficheiro *.txt*, deve-se manter uma formatação a uma coluna, necessária para ser carregado pelo *software*.

```

/TITLE, Layup H [90/0(3)/90(2)/0(3)/90]s
/PREP7
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição de Parâmetros!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Unidades: metro[m], Newton[N]; Pascal[Pa]
inch=25.4e-3          !1 polegada
!lb=4.44822162        !1 libra-força
nPLIES=20             !Número de Camadas
PLYt=0.005*inch      !Espessura de cada Camada
THICKNESS=nPLIES*PLYt !Espessura Total do
Provete
WIDTHh=inch          !Largura Total do Provete
RADIUSa=0.020        !Raio interno da Zona
Curva
LENGTHe=0.010       !Comprimento das Abas do
Provete
P=100                !Carga Aplicada
!!!Estrutura da Malha
np=2                 !Número de divisões em cada camada
!!!Abas Planas
ne=10                !Número de divisões em cada aba
(eixo X)
nh=26                !Número de divisões ao longo da largura (eixo Z)
!!!Semicircunferência
ntheta=45            !Número de divisões ao longo da
semicircunferência
!!!Definição do Tipo de Elemento
ET,1,SOLID64        !Tipo de Elemento Sólido
Anisotrópico
!!!Opções do Tipo de Elemento
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,0
!!! Propriedades do Material Hercules AS4/3501-6 epoxy
prepreg (WWFE)
E1=126.3e9          !Módulo de Young Longitudinal
E2=11e9             !Módulo de Young Transversal
E3=11e9             !Módulo de Young Interlaminar
G123=6.6e9          !Módulo de Corte
V12=0.28            !Coeficiente de Poisson
v21=V12*(E2/E1)    !Coeficiente de Poisson
v3=0.2              !Coeficiente de Poisson
!Considerado devido ao erro do ANSYS
!!!Sequência de Empilhamento H [90/0(3)/90(2)/0(3)/90]s
!!!Material 1: Orientação da Camada a 90°:
MP,EX,1,E3
MP,EY,1,E1
MP,EZ,1,E2
MP,GXY,1,G123
MP,GYZ,1,G123
MP,GXZ,1,G123
MP,PRXY,1,v3
MP,PRYZ,1,v12
MP,PRXZ,1,v3
!!!Material 2: Orientação da Camada a 0°
MP,EX,2,E3
MP,EY,2,E2
MP,EZ,2,E1
MP,GXY,2,G123
MP,GYZ,2,G123
MP,GXZ,2,G123
MP,PRXY,2,v3
MP,PRYZ,2,v21
MP,PRXZ,2,v3
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Geometria!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Keypoints!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*DO,i,0,nPLIES
K,,,-LENGTHe,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,0,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,(RADIUSa+i*PLYt),0
K,,0,-(RADIUSa+i*PLYt)
K,,,-LENGTHe,-(RADIUSa+i*PLYt)
*ENDDO
!!!Keypoint na Origem
K,,0,0,0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Linhas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal Superior
!!!Linhas Horizontais
L,1,2
L,6,7
L,11,12
L,16,17
L,21,22
L,26,27
L,31,32
L,36,37
L,41,42
L,46,47
L,51,52
L,56,57
L,61,62
L,66,67
L,71,72
L,76,77
L,81,82
L,86,87
L,91,92
L,96,97
L,101,102
!!!Linhas Verticais
L,1,6
L,6,11
L,11,16
L,16,21
L,21,26
L,26,31
L,31,36
L,36,41
L,41,46
L,46,51
L,51,56
L,56,61
L,61,66
L,66,71
L,71,76
L,76,81
L,81,86
L,86,91
L,91,96
L,96,101
L,2,7
L,7,12
L,12,17
L,17,22
L,22,27
L,27,32
L,32,37
L,37,42
L,42,47
L,47,52
L,52,57
L,57,62
L,62,67
L,67,72
L,72,77
L,77,82
L,82,87
L,87,92
L,92,97
L,97,102
!!!Aba Horizontal Inferior
!!!Linhas Horizontais
L,5,4
L,10,9
L,15,14

```

L,20,19  
 L,25,24  
 L,30,29  
 L,35,34  
 L,40,39  
 L,45,44  
 L,50,49  
 L,55,54  
 L,60,59  
 L,65,64  
 L,70,69  
 L,75,74  
 L,80,79  
 L,85,84  
 L,90,89  
 L,95,94  
 L,100,99  
 L,105,104  
 !!!Linhas Verticais  
 L,5,10  
 L,10,15  
 L,15,20  
 L,20,25  
 L,25,30  
 L,30,35  
 L,35,40  
 L,40,45  
 L,45,50  
 L,50,55  
 L,55,60  
 L,60,65  
 L,65,70  
 L,70,75  
 L,75,80  
 L,80,85  
 L,85,90  
 L,90,95  
 L,95,100  
 L,100,105  
 L,4,9  
 L,9,14  
 L,14,19  
 L,19,24  
 L,24,29  
 L,29,34  
 L,34,39  
 L,39,44  
 L,44,49  
 L,49,54  
 L,54,59  
 L,59,64  
 L,64,69  
 L,69,74  
 L,74,79  
 L,79,84  
 L,84,89  
 L,89,94  
 L,94,99  
 L,99,104  
 !!!Linhas em Arco  
 CSYS,1 !Sistema de Coordenadas Cilindrico  
 !!!Semicircunferência Parte Superior  
 LARC,2,3,106,(RADIUSa+0\*PLYt)  
 LARC,7,8,106,(RADIUSa+1\*PLYt)  
 LARC,12,13,106,(RADIUSa+2\*PLYt)  
 LARC,17,18,106,(RADIUSa+3\*PLYt)  
 LARC,22,23,106,(RADIUSa+4\*PLYt)  
 LARC,27,28,106,(RADIUSa+5\*PLYt)  
 LARC,32,33,106,(RADIUSa+6\*PLYt)  
 LARC,37,38,106,(RADIUSa+7\*PLYt)  
 LARC,42,43,106,(RADIUSa+8\*PLYt)  
 LARC,47,48,106,(RADIUSa+9\*PLYt)  
 LARC,52,53,106,(RADIUSa+10\*PLYt)  
 LARC,57,58,106,(RADIUSa+11\*PLYt)  
 LARC,62,63,106,(RADIUSa+12\*PLYt)  
 LARC,67,68,106,(RADIUSa+13\*PLYt)  
 LARC,72,73,106,(RADIUSa+14\*PLYt)  
 LARC,77,78,106,(RADIUSa+15\*PLYt)  
 LARC,82,83,106,(RADIUSa+16\*PLYt)  
 LARC,87,88,106,(RADIUSa+17\*PLYt)  
 LARC,92,93,106,(RADIUSa+18\*PLYt)  
 LARC,97,98,106,(RADIUSa+19\*PLYt)  
 LARC,102,103,106,(RADIUSa+20\*PLYt)  
 !!!Semicircunferência Parte Inferior  
 LARC,3,4,106,(RADIUSa+0\*PLYt)  
 LARC,8,9,106,(RADIUSa+1\*PLYt)  
 LARC,13,14,106,(RADIUSa+2\*PLYt)  
 LARC,18,19,106,(RADIUSa+3\*PLYt)  
 LARC,23,24,106,(RADIUSa+4\*PLYt)  
 LARC,28,29,106,(RADIUSa+5\*PLYt)  
 LARC,33,34,106,(RADIUSa+6\*PLYt)  
 LARC,38,39,106,(RADIUSa+7\*PLYt)  
 LARC,43,44,106,(RADIUSa+8\*PLYt)  
 LARC,48,49,106,(RADIUSa+9\*PLYt)  
 LARC,53,54,106,(RADIUSa+10\*PLYt)  
 LARC,58,59,106,(RADIUSa+11\*PLYt)  
 LARC,63,64,106,(RADIUSa+12\*PLYt)  
 LARC,68,69,106,(RADIUSa+13\*PLYt)  
 LARC,73,74,106,(RADIUSa+14\*PLYt)  
 LARC,78,79,106,(RADIUSa+15\*PLYt)  
 LARC,83,84,106,(RADIUSa+16\*PLYt)  
 LARC,88,89,106,(RADIUSa+17\*PLYt)  
 LARC,93,94,106,(RADIUSa+18\*PLYt)  
 LARC,98,99,106,(RADIUSa+19\*PLYt)  
 LARC,103,104,106,(RADIUSa+20\*PLYt)  
 CSYS,0 !Sistema de Coordenadas Cartesiano  
 !!!Linhas Horizontais a Y=0  
 L,3,8  
 L,8,13  
 L,13,18  
 L,18,23  
 L,23,28  
 L,28,33  
 L,33,38  
 L,38,43  
 L,43,48  
 L,48,53  
 L,53,58  
 L,58,63  
 L,63,68  
 L,68,73  
 L,73,78  
 L,78,83  
 L,83,88  
 L,88,93  
 L,93,98  
 L,98,103  
 !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
 !!!Definição de Áreas!!!  
 !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
 !!!Aba Horizontal Superior  
 AL,1,2,22,42  
 AL,2,3,23,43  
 AL,3,4,24,44  
 AL,4,5,25,45  
 AL,5,6,26,46  
 AL,6,7,27,47  
 AL,7,8,28,48  
 AL,8,9,29,49  
 AL,9,10,30,50  
 AL,10,11,31,51  
 AL,11,12,32,52  
 AL,12,13,33,53  
 AL,13,14,34,54  
 AL,14,15,35,55  
 AL,15,16,36,56  
 AL,16,17,37,57  
 AL,17,18,38,58  
 AL,18,19,39,59  
 AL,19,20,40,60  
 AL,20,21,41,61  
 !!!Aba Horizontal Inferior

```

AL,62,63,83,103
AL,63,64,84,104
AL,64,65,85,105
AL,65,66,86,106
AL,66,67,87,107
AL,67,68,88,108
AL,68,69,89,109
AL,69,70,90,110
AL,70,71,91,111
AL,71,72,92,112
AL,72,73,93,113
AL,73,74,94,114
AL,74,75,95,115
AL,75,76,96,116
AL,76,77,97,117
AL,77,78,98,118
AL,78,79,99,119
AL,79,80,100,120
AL,80,81,101,121
AL,81,82,102,122
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Semicircunferência Parte Superior
AL,42,123,124,165
AL,43,124,125,166
AL,44,125,126,167
AL,45,126,127,168
AL,46,127,128,169
AL,47,128,129,170
AL,48,129,130,171
AL,49,130,131,172
AL,50,131,132,173
AL,51,132,133,174
AL,52,133,134,175
AL,53,134,135,176
AL,54,135,136,177
AL,55,136,137,178
AL,56,137,138,179
AL,57,138,139,180
AL,58,139,140,181
AL,59,140,141,182
AL,60,141,142,183
AL,61,142,143,184
!!!Semicircunferência Parte Inferior
AL,165,144,145,103
AL,166,145,146,104
AL,167,146,147,105
AL,168,147,148,106
AL,169,148,149,107
AL,170,149,150,108
AL,171,150,151,109
AL,172,151,152,110
AL,173,152,153,111
AL,174,153,154,112
AL,175,154,155,113
AL,176,155,156,114
AL,177,156,157,115
AL,178,157,158,116
AL,179,158,159,117
AL,180,159,160,118
AL,181,160,161,119
AL,182,161,162,120
AL,183,162,163,121
AL,184,163,164,122
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Extrusão!!!
!!!!!!!!!!!!!!
VEXT,ALL,,,0,0,WIDTHh,1,1,1
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!Definição da Malha!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Divisões das Linhas para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleção de Linhas para a Malha
!!!Divisão de cada Camada por "np" Elementos

!!!Linhas Rectas para Z=0
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,A,LOC,X,0
LSEL,A,LOC,Y,-0.001,0.001
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Rectas para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,A,LOC,X,0
LSEL,A,LOC,Y,-0.001,0.001
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Semicircunferência Parte Superior para Z=0
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Inferior para Z=0
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),-45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Superior para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Inferior para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),-45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo X, Z=0)
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,X,-(LENGThe/2)
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo X, Z=WIDTHh)
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,X,-(LENGThe/2)
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo Z, X=-LENGThe)
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh          !Para estudo das tensões
!LESIZE,ALL,,,nh,-10,,,,1!Para estudos dos efeitos de
bordo
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo Z, X=0)
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh          !Para estudo das tensões
!LESIZE,ALL,,,nh,-10,,,,1!Para estudos dos efeitos de
bordo
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais na Semicircunferência (eixo Z, Y=0)
LSEL,S,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh          !Para estudo das tensões
!LESIZE,ALL,,,nh,-10,,,,1!Para estudos dos efeitos de
bordo
ALLSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleção de volumes para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Volumes Planos
!!!Aba Superior
LOCAL,1,0,0,0,0,90,,,1,1,
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,1
VSEL,A,VOLU,,5,6,1

```

```

VSEL,A,VOLU,,10,11,1
VSEL,A,VOLU,,15,16,1
VSEL,A,VOLU,,20
VATT,1,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,2,4,1
VSEL,A,VOLU,,7,9,1
VSEL,A,VOLU,,12,14,1
VSEL,A,VOLU,,17,19,1
VATT,2,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Aba Inferior
LOCAL,12,0,0,0,0,-90,,1,1,
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,21
VSEL,A,VOLU,,25,26,1
VSEL,A,VOLU,,30,31,1
VSEL,A,VOLU,,35,36,1
VSEL,A,VOLU,,40
VATT,1,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,22,24,1
VSEL,A,VOLU,,27,29,1
VSEL,A,VOLU,,32,34,1
VSEL,A,VOLU,,37,39,1
VATT,2,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Volumes Curvos
LOCAL,13,1,0,0,0,,1,1,
!!!Semicircunferência Superior
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,41
VSEL,A,VOLU,,45,46,1
VSEL,A,VOLU,,50,51,1
VSEL,A,VOLU,,55,56,1
VSEL,A,VOLU,,60
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,42,44,1
VSEL,A,VOLU,,47,49,1
VSEL,A,VOLU,,52,54,1
VSEL,A,VOLU,,57,59,1

VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Inferior
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,61
VSEL,A,VOLU,,65,66,1
VSEL,A,VOLU,,70,71,1
VSEL,A,VOLU,,75,76,1
VSEL,A,VOLU,,80
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1

VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,62,64,1
VSEL,A,VOLU,,67,69,1
VSEL,A,VOLU,,72,74,1
VSEL,A,VOLU,,77,79,1
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
CSYS,0                !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!Definição das!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Condições de Fronteira!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aplicação de Forças!!!
!!!e Constrangimentos!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Forças na Aba Superior
NSEL,S,NODE,,5750
NSEL,A,NODE,,5360
NSEL,A,NODE,,5393
D,ALL,,0,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
!!!Constrangimentos
NSEL,S,NODE,,17927
NSEL,A,NODE,,17537
NSEL,A,NODE,,17570
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Solução!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Pós Processamento!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
FINISH
/POST1
RSYS,1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS ELEMENTOS DO MEIO DA
ESPESSURA E LARGURA!!!
!!!!!!PARA CÁLCULO DAS TENSÕES RADIAIS E
CIRCUNFERÊNCIAIS!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS NÓS PARA Y=0° E A MEIO DA
LARGURA Z
ALLSEL,ALL
CSYS,1
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
CSYS,0
!!!COORDENADAS
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
!!!TENSÕES
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!LISTAs DOS NÓS E RESPECTIVAS TENSÕES!!!!
!!!!!!PARA TODA A CIRCUNFERÊNCIA!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!ATENÇÃO!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

!!!!O ANSYS SÓ CARREGA 20 TABELAS DE CADA
VEZ!!!!!!
!!!CARREGAR ESTE FICHEIRO DE 10 EM 10
CAMADAS (i)!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!PARA UMA CAMADA i
ALLSEL,ALL
i=1
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=2
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=3
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=4
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=5
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=6
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=7

```

```

NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=8
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=9
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=10
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!APAGAR AS TABELAS MANUALMENTE E!!!!
!!!CARREGAR AS RESTANTES 10 CAMADAS!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
i=11
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=12
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=13
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1

```

NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z  
 DSYS,0  
 NSORT,LOC,X,1,0,,0  
 PRNSOL,S,COMP  
 ALLSEL,ALL  
 i=14  
 NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)\*PLYt),RADIUSa+(i\*PLYt)  
 NSEL,R,LOC,Y,-90,90  
 NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT  
 DSYS,1  
 NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z  
 DSYS,0  
 NSORT,LOC,X,1,0,,0  
 PRNSOL,S,COMP  
 ALLSEL,ALL  
 i=15  
 NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)\*PLYt),RADIUSa+(i\*PLYt)  
 NSEL,R,LOC,Y,-90,90  
 NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT  
 DSYS,1  
 NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z  
 DSYS,0  
 NSORT,LOC,X,1,0,,0  
 PRNSOL,S,COMP  
 ALLSEL,ALL  
 i=16  
 NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)\*PLYt),RADIUSa+(i\*PLYt)  
 NSEL,R,LOC,Y,-90,90  
 NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT  
 DSYS,1  
 NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z  
 DSYS,0  
 NSORT,LOC,X,1,0,,0  
 PRNSOL,S,COMP  
 ALLSEL,ALL  
 i=17  
 NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)\*PLYt),RADIUSa+(i\*PLYt)  
 NSEL,R,LOC,Y,-90,90  
 NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT

DSYS,1  
 NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z  
 DSYS,0  
 NSORT,LOC,X,1,0,,0  
 PRNSOL,S,COMP  
 ALLSEL,ALL  
 i=18  
 NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)\*PLYt),RADIUSa+(i\*PLYt)  
 NSEL,R,LOC,Y,-90,90  
 NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT  
 DSYS,1  
 NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z  
 DSYS,0  
 NSORT,LOC,X,1,0,,0  
 PRNSOL,S,COMP  
 ALLSEL,ALL  
 i=19  
 NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)\*PLYt),RADIUSa+(i\*PLYt)  
 NSEL,R,LOC,Y,-90,90  
 NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT  
 DSYS,1  
 NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z  
 DSYS,0  
 NSORT,LOC,X,1,0,,0  
 PRNSOL,S,COMP  
 ALLSEL,ALL  
 i=20  
 NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)\*PLYt),RADIUSa+(i\*PLYt)  
 NSEL,R,LOC,Y,-90,90  
 NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT  
 DSYS,1  
 NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z  
 DSYS,0  
 NSORT,LOC,X,1,0,,0  
 PRNSOL,S,COMP  
 ALLSEL,ALL  
 i=  
 ALLSEL,ALL  
 CSYS,0

## Anexo W – Ficheiro de comandos do modelo em ANSYS MEF 3D, para o novo provete: *Layup I*

**Nota:** o ficheiro de comandos está formatado a duas colunas, contudo ao copiar para um ficheiro *.txt*, deve-se manter uma formatação a uma coluna, necessária para ser carregado pelo *software*.

```

/TITLE, Layup I [90(3)/0/90(3)/0/90/0]s
/PREP7
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição de Parâmetros!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Unidades: metro[m], Newton[N]; Pascal[Pa]
inch=25.4e-3          !1 polegada
lb=4.44822162        !1 libra-força
nPLIES=20             !Número de Camadas
PLYt=0.005*inch      !Espessura de cada Camada
THICKNESS=nPLIES*PLYt !Espessura Total do
Provete
WIDTHH=inch          !Largura Total do Provete
RADIUSa=0.020        !Raio interno da Zona
Curva
LENGTHe=0.010        !Comprimento das Abas do
Provete
P=100                !Carga Aplicada
!!!Estrutura da Malha
np=2                 !Número de divisões em cada camada
!!!Abas Planas
ne=10                !Número de divisões em cada aba
(eixo X)
nh=26                !Número de divisões ao longo da largura (eixo Z)
!!!Semicircunferência
ntheta=45            !Número de divisões ao longo da
semicircunferência
!!!Definição do Tipo de Elemento
ET,1,SOLID64        !Tipo de Elemento Sólido
Anisotrópico
!!!Opções do Tipo de Elemento
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,0
!!! Propriedades do Material Hercules AS4/3501-6 epoxy
prepreg (WWFE)
E1=126.3e9          !Módulo de Young Longitudinal
E2=11e9             !Módulo de Young Transversal
E3=11e9             !Módulo de Young Interlaminar
G123=6.6e9          !Módulo de Corte
V12=0.28            !Coeficiente de Poisson
v21=V12*(E2/E1)    !Coeficiente de Poisson
v3=0.2              !Coeficiente de Poisson
!Considerado devido ao erro do ANSYS
!!!Sequência de Empilhamento I [90(3)/0/90(3)/0/90/0]s
!!!Material 1: Orientação da Camada a 90°:
MP,EX,1,E3
MP,EY,1,E1
MP,EZ,1,E2
MP,GXY,1,G123
MP,GYZ,1,G123
MP,GXZ,1,G123
MP,PRXY,1,v3
MP,PRYZ,1,v12
MP,PRXZ,1,v3
!!!Material 2: Orientação da Camada a 0°
MP,EX,2,E3
MP,EY,2,E2
MP,EZ,2,E1
MP,GXY,2,G123
MP,GYZ,2,G123
MP,GXZ,2,G123
MP,PRXY,2,v3
MP,PRYZ,2,v21
MP,PRXZ,2,v3
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Geometria!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Keypoints!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*DO,i,0,nPLIES
K,,-LENGTHe,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,0,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,(RADIUSa+i*PLYt),0
K,,0,-(RADIUSa+i*PLYt)
K,,-LENGTHe,-(RADIUSa+i*PLYt)
*ENDDO
!!!Keypoint na Origem
K,,0,0,0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Linhas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal Superior
!!!Linhas Horizontais
L,1,2
L,6,7
L,11,12
L,16,17
L,21,22
L,26,27
L,31,32
L,36,37
L,41,42
L,46,47
L,51,52
L,56,57
L,61,62
L,66,67
L,71,72
L,76,77
L,81,82
L,86,87
L,91,92
L,96,97
L,101,102
!!!Linhas Verticais
L,1,6
L,6,11
L,11,16
L,16,21
L,21,26
L,26,31
L,31,36
L,36,41
L,41,46
L,46,51
L,51,56
L,56,61
L,61,66
L,66,71
L,71,76
L,76,81
L,81,86
L,86,91
L,91,96
L,96,101
L,2,7
L,7,12
L,12,17
L,17,22
L,22,27
L,27,32
L,32,37
L,37,42
L,42,47
L,47,52
L,52,57
L,57,62
L,62,67
L,67,72
L,72,77
L,77,82
L,82,87
L,87,92
L,92,97
L,97,102
!!!Aba Horizontal Inferior
!!!Linhas Horizontais
L,5,4
L,10,9
L,15,14

```

L,20,19  
 L,25,24  
 L,30,29  
 L,35,34  
 L,40,39  
 L,45,44  
 L,50,49  
 L,55,54  
 L,60,59  
 L,65,64  
 L,70,69  
 L,75,74  
 L,80,79  
 L,85,84  
 L,90,89  
 L,95,94  
 L,100,99  
 L,105,104  
 !!!Linhas Verticais  
 L,5,10  
 L,10,15  
 L,15,20  
 L,20,25  
 L,25,30  
 L,30,35  
 L,35,40  
 L,40,45  
 L,45,50  
 L,50,55  
 L,55,60  
 L,60,65  
 L,65,70  
 L,70,75  
 L,75,80  
 L,80,85  
 L,85,90  
 L,90,95  
 L,95,100  
 L,100,105  
 L,4,9  
 L,9,14  
 L,14,19  
 L,19,24  
 L,24,29  
 L,29,34  
 L,34,39  
 L,39,44  
 L,44,49  
 L,49,54  
 L,54,59  
 L,59,64  
 L,64,69  
 L,69,74  
 L,74,79  
 L,79,84  
 L,84,89  
 L,89,94  
 L,94,99  
 L,99,104  
 !!!Linhas em Arco  
 CSYS,1           !Sistema de Coordenadas Cilindrico  
 !!!Semicircunferência Parte Superior  
 LARC,2,3,106,(RADIUSa+0\*PLYt)  
 LARC,7,8,106,(RADIUSa+1\*PLYt)  
 LARC,12,13,106,(RADIUSa+2\*PLYt)  
 LARC,17,18,106,(RADIUSa+3\*PLYt)  
 LARC,22,23,106,(RADIUSa+4\*PLYt)  
 LARC,27,28,106,(RADIUSa+5\*PLYt)  
 LARC,32,33,106,(RADIUSa+6\*PLYt)  
 LARC,37,38,106,(RADIUSa+7\*PLYt)  
 LARC,42,43,106,(RADIUSa+8\*PLYt)  
 LARC,47,48,106,(RADIUSa+9\*PLYt)  
 LARC,52,53,106,(RADIUSa+10\*PLYt)  
 LARC,57,58,106,(RADIUSa+11\*PLYt)  
 LARC,62,63,106,(RADIUSa+12\*PLYt)  
 LARC,67,68,106,(RADIUSa+13\*PLYt)  
 LARC,72,73,106,(RADIUSa+14\*PLYt)  
 LARC,77,78,106,(RADIUSa+15\*PLYt)  
 LARC,82,83,106,(RADIUSa+16\*PLYt)  
 LARC,87,88,106,(RADIUSa+17\*PLYt)  
 LARC,92,93,106,(RADIUSa+18\*PLYt)  
 LARC,97,98,106,(RADIUSa+19\*PLYt)  
 LARC,102,103,106,(RADIUSa+20\*PLYt)  
 !!!Semicircunferência Parte Inferior  
 LARC,3,4,106,(RADIUSa+0\*PLYt)  
 LARC,8,9,106,(RADIUSa+1\*PLYt)  
 LARC,13,14,106,(RADIUSa+2\*PLYt)  
 LARC,18,19,106,(RADIUSa+3\*PLYt)  
 LARC,23,24,106,(RADIUSa+4\*PLYt)  
 LARC,28,29,106,(RADIUSa+5\*PLYt)  
 LARC,33,34,106,(RADIUSa+6\*PLYt)  
 LARC,38,39,106,(RADIUSa+7\*PLYt)  
 LARC,43,44,106,(RADIUSa+8\*PLYt)  
 LARC,48,49,106,(RADIUSa+9\*PLYt)  
 LARC,53,54,106,(RADIUSa+10\*PLYt)  
 LARC,58,59,106,(RADIUSa+11\*PLYt)  
 LARC,63,64,106,(RADIUSa+12\*PLYt)  
 LARC,68,69,106,(RADIUSa+13\*PLYt)  
 LARC,73,74,106,(RADIUSa+14\*PLYt)  
 LARC,78,79,106,(RADIUSa+15\*PLYt)  
 LARC,83,84,106,(RADIUSa+16\*PLYt)  
 LARC,88,89,106,(RADIUSa+17\*PLYt)  
 LARC,93,94,106,(RADIUSa+18\*PLYt)  
 LARC,98,99,106,(RADIUSa+19\*PLYt)  
 LARC,103,104,106,(RADIUSa+20\*PLYt)  
 CSYS,0           !Sistema de Coordenadas Cartesiano  
 !!!Linhas Horizontais a Y=0  
 L,3,8  
 L,8,13  
 L,13,18  
 L,18,23  
 L,23,28  
 L,28,33  
 L,33,38  
 L,38,43  
 L,43,48  
 L,48,53  
 L,53,58  
 L,58,63  
 L,63,68  
 L,68,73  
 L,73,78  
 L,78,83  
 L,83,88  
 L,88,93  
 L,93,98  
 L,98,103  
 !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
 !!!Definição de Áreas!!!  
 !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
 !!!Aba Horizontal Superior  
 AL,1,2,22,42  
 AL,2,3,23,43  
 AL,3,4,24,44  
 AL,4,5,25,45  
 AL,5,6,26,46  
 AL,6,7,27,47  
 AL,7,8,28,48  
 AL,8,9,29,49  
 AL,9,10,30,50  
 AL,10,11,31,51  
 AL,11,12,32,52  
 AL,12,13,33,53  
 AL,13,14,34,54  
 AL,14,15,35,55  
 AL,15,16,36,56  
 AL,16,17,37,57  
 AL,17,18,38,58  
 AL,18,19,39,59  
 AL,19,20,40,60  
 AL,20,21,41,61  
 !!!Aba Horizontal Inferior

```

AL,62,63,83,103
AL,63,64,84,104
AL,64,65,85,105
AL,65,66,86,106
AL,66,67,87,107
AL,67,68,88,108
AL,68,69,89,109
AL,69,70,90,110
AL,70,71,91,111
AL,71,72,92,112
AL,72,73,93,113
AL,73,74,94,114
AL,74,75,95,115
AL,75,76,96,116
AL,76,77,97,117
AL,77,78,98,118
AL,78,79,99,119
AL,79,80,100,120
AL,80,81,101,121
AL,81,82,102,122
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Semicircunferência Parte Superior
AL,42,123,124,165
AL,43,124,125,166
AL,44,125,126,167
AL,45,126,127,168
AL,46,127,128,169
AL,47,128,129,170
AL,48,129,130,171
AL,49,130,131,172
AL,50,131,132,173
AL,51,132,133,174
AL,52,133,134,175
AL,53,134,135,176
AL,54,135,136,177
AL,55,136,137,178
AL,56,137,138,179
AL,57,138,139,180
AL,58,139,140,181
AL,59,140,141,182
AL,60,141,142,183
AL,61,142,143,184
!!!Semicircunferência Parte Inferior
AL,165,144,145,103
AL,166,145,146,104
AL,167,146,147,105
AL,168,147,148,106
AL,169,148,149,107
AL,170,149,150,108
AL,171,150,151,109
AL,172,151,152,110
AL,173,152,153,111
AL,174,153,154,112
AL,175,154,155,113
AL,176,155,156,114
AL,177,156,157,115
AL,178,157,158,116
AL,179,158,159,117
AL,180,159,160,118
AL,181,160,161,119
AL,182,161,162,120
AL,183,162,163,121
AL,184,163,164,122
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Extrusão!!!
!!!!!!!!!!!!!!
VEXT,ALL,,,0,0,WIDTHh,1,1,1
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!Definição da Malha!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Divisões das Linhas para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Seleção de Linhas para a Malha
!!!!Divisão de cada Camada por "np" Elementos

!!!Linhas Rectas para Z=0
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,A,LOC,X,0
LSEL,A,LOC,Y,-0.001,0.001
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Rectas para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,A,LOC,X,0
LSEL,A,LOC,Y,-0.001,0.001
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,,np
ALLSEL,ALL
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Semicircunferência Parte Superior para Z=0
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Inferior para Z=0
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),-45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL

!!!Semicircunferência Parte Superior para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Inferior para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),-45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo X, Z=0)
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,X,-(LENGThe/2)
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo X, Z=WIDTHh)
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,X,-(LENGThe/2)
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo Z, X=-LENGThe)
LSEL,S,LOC,X,-LENGThe
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh          !Para estudo das tensões
!LESIZE,ALL,,,nh,-10,,,1!Para estudos dos efeitos de
bordo
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo Z, X=0)
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh          !Para estudo das tensões
!LESIZE,ALL,,,nh,-10,,,1!Para estudos dos efeitos de
bordo
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais na Semicircunferência (eixo Z, Y=0)
LSEL,S,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh          !Para estudo das tensões
!LESIZE,ALL,,,nh,-10,,,1!Para estudos dos efeitos de
bordo
ALLSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleção de volumes para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Volumes Planos
!!!!Aba Superior
LOCAL,11,0,0,0,90,,,1,1,
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,1,3,1

```

```

VSEL,A,VOLU,,5,7,1
VSEL,A,VOLU,,9,12,3
VSEL,A,VOLU,,14,16,1
VSEL,A,VOLU,,18,20,1
VATT,1,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,4,8,4
VSEL,A,VOLU,,10,11,1
VSEL,A,VOLU,,13,17,4
VATT,2,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Aba Inferior
LOCAL,12,0,0,0,0,-90,,1,1,
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,21,23,1
VSEL,A,VOLU,,25,27,1
VSEL,A,VOLU,,29,32,3
VSEL,A,VOLU,,34,36,1
VSEL,A,VOLU,,38,40,1
VATT,1,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,24,28,4
VSEL,A,VOLU,,30,31,1
VSEL,A,VOLU,,33,37,4
VATT,2,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Volumes Curvos
LOCAL,13,1,0,0,0,,1,1,
!!!Semicircunferência Superior
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,41,43,1
VSEL,A,VOLU,,45,47,1
VSEL,A,VOLU,,49,52,3
VSEL,A,VOLU,,54,56,1
VSEL,A,VOLU,,58,60,1
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,44,48,4
VSEL,A,VOLU,,50,51,1
VSEL,A,VOLU,,53,57,4
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Inferior
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,61,63,1
VSEL,A,VOLU,,65,67,1
VSEL,A,VOLU,,69,72,3
VSEL,A,VOLU,,74,76,1
VSEL,A,VOLU,,78,80,1
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,64,68,4
VSEL,A,VOLU,,70,71,1
VSEL,A,VOLU,,73,77,4
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!Definição das!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Condições de Fronteira!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aplicação de Forças!!!
!!!e Constrangimentos!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Forças na Aba Superior
NSEL,S,NODE,,9611
NSEL,A,NODE,,9507
NSEL,A,NODE,,9529
D,ALL,,0,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
!!!Constrangimentos
NSEL,S,NODE,,21788
NSEL,A,NODE,,21684
NSEL,A,NODE,,21706
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Solução!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Pós Processamento!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
FINISH
/POST1
RSYS,1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS ELEMENTOS DO MEIO DA
ESPESSURA E LARGURA!!!
!!!!!!PARA CÁLCULO DAS TENSÕES RADIAIS E
CIRCUNFERENCIAIS!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS NÓS PARA Y=0° E A MEIO DA
LARGURA Z
ALLSEL,ALL
CSYS,1
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
CSYS,0
!!!COORDENADAS
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
!!!TENSÕES
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!LISTAs DOS NÓS E RESPECTIVAS TENSÕES!!!
!!!!!!PARA TODA A CIRCUNFERÊNCIA!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!ATENÇÃO!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!O ANSYS SÓ CARREGA 20 TABELAS DE CADA
VEZ!!!!!!
!!!!!!CARREGAR ESTE FICHEIRO DE 10 EM 10
CAMADAS (i)!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

CSYS,1
!!!PARA UMA CAMADA i
ALLSEL,ALL
i=1
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=2
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=3
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=4
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=5
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=6
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=7
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=8
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=9
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=10
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!APAGAR AS TABELAS MANUALMENTE E!!!!
!!!CARREGAR AS RESTANTES 10 CAMADAS!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
i=11
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=12
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=13
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=14

```

```

NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=15
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=16
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=17
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0

```

```

NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=18
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=19
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=20
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
i=
ALLSEL,ALL
CSYS,0

```

## Anexo X – Ficheiro de comandos do modelo em ANSYS MEF 3D, para o novo provete: *Layup J*

**Nota:** o ficheiro de comandos está formatado a duas colunas, contudo ao copiar para um ficheiro *.txt*, deve-se manter uma formatação a uma coluna, necessária para ser carregado pelo *software*.

```

/TITLE, Layup J [90(3)/0(3)/90(2)/0(3)/90]s
/PREP7
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição de Parâmetros!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Unidades: metro[m], Newton[N]; Pascal[Pa]
inch=25.4e-3          !1 polegada
lb=4.44822162        !1 libra-força
nPLIES=24             !Número de Camadas
PLYt=0.005*inch      !Espessura de cada Camada
THICKNESS=nPLIES*PLYt !Espessura Total do
Provete
WIDTHh=inch          !Largura Total do Provete
RADIUSa=0.020        !Raio interno da Zona
Curva
LENGTHe=0.010       !Comprimento das Abas do
Provete
P=100                !Carga Aplicada
!!!Estrutura da Malha
np=2                 !Número de divisões em cada camada
!!!Abas Planas
ne=10                !Número de divisões em cada aba
(eixo X)
nh=26                !Número de divisões ao longo da largura (eixo Z)
!!!Semicircunferência
ntheta=45            !Número de divisões ao longo da
semicircunferência
!!!Definição do Tipo de Elemento
ET,1,SOLID64        !Tipo de Elemento Sólido
Anisotrópico
!!!Opções do Tipo de Elemento
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,5,2
KEYOPT,1,6,0
!!! Propriedades do Material Hercules AS4/3501-6 epoxy
prepreg (WWFE)
E1=126.3e9          !Módulo de Young Longitudinal
E2=11e9             !Módulo de Young Transversal
E3=11e9             !Módulo de Young Interlaminar
G123=6.6e9          !Módulo de Corte
V12=0.28            !Coeficiente de Poisson
v21=V12*(E2/E1)    !Coeficiente de Poisson
v3=0.2              !Coeficiente de Poisson
!Considerado devido ao erro do ANSYS
!!!Sequência de Empilhamento J [90(3)/0(3)/90(2)/0(3)/90]s
!!!Material 1: Orientação da Camada a 90°:
MP,EX,1,E3
MP,EY,1,E1
MP,EZ,1,E2
MP,GXY,1,G123
MP,GYZ,1,G123
MP,GXZ,1,G123
MP,PRXY,1,v3
MP,PRYZ,1,v12
MP,PRXZ,1,v3
!!!Material 2: Orientação da Camada a 0°
MP,EX,2,E3
MP,EY,2,E2
MP,EZ,2,E1
MP,GXY,2,G123
MP,GYZ,2,G123
MP,GXZ,2,G123
MP,PRXY,2,v3
MP,PRYZ,2,v21
MP,PRXZ,2,v3
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Geometria!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Keypoints!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
*DO,i,0,nPLIES
K,,-LENGTHe,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,0,(RADIUSa+i*PLYt)
K,,(RADIUSa+i*PLYt),0
K,,0,-(RADIUSa+i*PLYt)
K,,-LENGTHe,-(RADIUSa+i*PLYt)
*ENDDO
!!!Keypoint na Origem
K,,0,0,0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Linhas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal Superior
!!!Linhas Horizontais
L,1,2
L,6,7
L,11,12
L,16,17
L,21,22
L,26,27
L,31,32
L,36,37
L,41,42
L,46,47
L,51,52
L,56,57
L,61,62
L,66,67
L,71,72
L,76,77
L,81,82
L,86,87
L,91,92
L,96,97
L,101,102
L,106,107
L,111,112
L,116,117
L,121,122
!!!Linhas Verticais
L,1,6
L,6,11
L,11,16
L,16,21
L,21,26
L,26,31
L,31,36
L,36,41
L,41,46
L,46,51
L,51,56
L,56,61
L,61,66
L,66,71
L,71,76
L,76,81
L,81,86
L,86,91
L,91,96
L,96,101
L,101,106
L,106,111
L,111,116
L,116,121
L,2,7
L,7,12
L,12,17
L,17,22
L,22,27
L,27,32
L,32,37
L,37,42
L,42,47
L,47,52
L,52,57
L,57,62
L,62,67
L,67,72
L,72,77
L,77,82
L,82,87

```

L,87,92	L,89,94
L,92,97	L,94,99
L,97,102	L,99,104
L,102,107	L,104,109
L,107,112	L,109,114
L,112,117	L,114,119
L,117,122	L,119,124
!!!Aba Horizontal Inferior	!!!Linhas em Arco
!!!Linhas Horizontais	CSYS,1                   !Sistema de Coordenadas Cilindrico
L,5,4	!!!Semicircunferência Parte Superior
L,10,9	LARC,2,3,126,(RADIUSa+0*PLYt)
L,15,14	LARC,7,8,126,(RADIUSa+1*PLYt)
L,20,19	LARC,12,13,126,(RADIUSa+2*PLYt)
L,25,24	LARC,17,18,126,(RADIUSa+3*PLYt)
L,30,29	LARC,22,23,126,(RADIUSa+4*PLYt)
L,35,34	LARC,27,28,126,(RADIUSa+5*PLYt)
L,40,39	LARC,32,33,126,(RADIUSa+6*PLYt)
L,45,44	LARC,37,38,126,(RADIUSa+7*PLYt)
L,50,49	LARC,42,43,126,(RADIUSa+8*PLYt)
L,55,54	LARC,47,48,126,(RADIUSa+9*PLYt)
L,60,59	LARC,52,53,126,(RADIUSa+10*PLYt)
L,65,64	LARC,57,58,126,(RADIUSa+11*PLYt)
L,70,69	LARC,62,63,126,(RADIUSa+12*PLYt)
L,75,74	LARC,67,68,126,(RADIUSa+13*PLYt)
L,80,79	LARC,72,73,126,(RADIUSa+14*PLYt)
L,85,84	LARC,77,78,126,(RADIUSa+15*PLYt)
L,90,89	LARC,82,83,126,(RADIUSa+16*PLYt)
L,95,94	LARC,87,88,126,(RADIUSa+17*PLYt)
L,100,99	LARC,92,93,126,(RADIUSa+18*PLYt)
L,105,104	LARC,97,98,126,(RADIUSa+19*PLYt)
L,110,109	LARC,102,103,126,(RADIUSa+20*PLYt)
L,115,114	LARC,107,108,126,(RADIUSa+21*PLYt)
L,120,119	LARC,112,113,126,(RADIUSa+22*PLYt)
L,125,124	LARC,117,118,126,(RADIUSa+23*PLYt)
!!!Linhas Verticais	LARC,122,123,126,(RADIUSa+24*PLYt)
L,5,10	!!!Semicircunferência Parte Inferior
L,10,15	LARC,3,4,126,(RADIUSa+0*PLYt)
L,15,20	LARC,8,9,126,(RADIUSa+1*PLYt)
L,20,25	LARC,13,14,126,(RADIUSa+2*PLYt)
L,25,30	LARC,18,19,126,(RADIUSa+3*PLYt)
L,30,35	LARC,23,24,126,(RADIUSa+4*PLYt)
L,35,40	LARC,28,29,126,(RADIUSa+5*PLYt)
L,40,45	LARC,33,34,126,(RADIUSa+6*PLYt)
L,45,50	LARC,38,39,126,(RADIUSa+7*PLYt)
L,50,55	LARC,43,44,126,(RADIUSa+8*PLYt)
L,55,60	LARC,48,49,126,(RADIUSa+9*PLYt)
L,60,65	LARC,53,54,126,(RADIUSa+10*PLYt)
L,65,70	LARC,58,59,126,(RADIUSa+11*PLYt)
L,70,75	LARC,63,64,126,(RADIUSa+12*PLYt)
L,75,80	LARC,68,69,126,(RADIUSa+13*PLYt)
L,80,85	LARC,73,74,126,(RADIUSa+14*PLYt)
L,85,90	LARC,78,79,126,(RADIUSa+15*PLYt)
L,90,95	LARC,83,84,126,(RADIUSa+16*PLYt)
L,95,100	LARC,88,89,126,(RADIUSa+17*PLYt)
L,100,105	LARC,93,94,126,(RADIUSa+18*PLYt)
L,105,110	LARC,98,99,126,(RADIUSa+19*PLYt)
L,110,115	LARC,103,104,126,(RADIUSa+20*PLYt)
L,115,120	LARC,108,109,126,(RADIUSa+21*PLYt)
L,120,125	LARC,113,114,126,(RADIUSa+22*PLYt)
L,4,9	LARC,118,119,126,(RADIUSa+23*PLYt)
L,9,14	LARC,123,124,126,(RADIUSa+24*PLYt)
L,14,19	CSYS,0                   !Sistema de Coordenadas Cartesiano
L,19,24	!!!Linhas Horizontais a Y=0
L,24,29	L,3,8
L,29,34	L,8,13
L,34,39	L,13,18
L,39,44	L,18,23
L,44,49	L,23,28
L,49,54	L,28,33
L,54,59	L,33,38
L,59,64	L,38,43
L,64,69	L,43,48
L,69,74	L,48,53
L,74,79	L,53,58
L,79,84	L,58,63
L,84,89	L,63,68

```

L,68,73
L,73,78
L,78,83
L,83,88
L,88,93
L,93,98
L,98,103
L,103,108
L,108,113
L,113,118
L,118,123
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Definição de Áreas!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aba Horizontal Superior
AL,1,2,26,50
AL,2,3,27,51
AL,3,4,28,52
AL,4,5,29,53
AL,5,6,30,54
AL,6,7,31,55
AL,7,8,32,56
AL,8,9,33,57
AL,9,10,34,58
AL,10,11,35,59
AL,11,12,36,60
AL,12,13,37,61
AL,13,14,38,62
AL,14,15,39,63
AL,15,16,40,64
AL,16,17,41,65
AL,17,18,42,66
AL,18,19,43,67
AL,19,20,44,68
AL,20,21,45,69
AL,21,22,46,70
AL,22,23,47,71
AL,23,24,48,72
AL,24,25,49,73
!!!Aba Horizontal Inferior
AL,74,75,99,123
AL,75,76,100,124
AL,76,77,101,125
AL,77,78,102,126
AL,78,79,103,127
AL,79,80,104,128
AL,80,81,105,129
AL,81,82,106,130
AL,82,83,107,131
AL,83,84,108,132
AL,84,85,109,133
AL,85,86,110,134
AL,86,87,111,135
AL,87,88,112,136
AL,88,89,113,137
AL,89,90,114,138
AL,90,91,115,139
AL,91,92,116,140
AL,92,93,117,141
AL,93,94,118,142
AL,94,95,119,143
AL,95,96,120,144
AL,96,97,121,145
AL,97,98,122,146
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Semicircunferência Parte Superior
AL,50,197,147,148
AL,51,198,148,149
AL,52,199,149,150
AL,53,200,150,151
AL,54,201,151,152
AL,55,202,152,153
AL,56,203,153,154
AL,57,204,154,155
AL,58,205,155,156
AL,59,206,156,157
AL,60,207,157,158
AL,61,208,158,159
AL,62,209,159,160
AL,63,210,160,161
AL,64,211,161,162
AL,65,212,162,163
AL,66,213,163,164
AL,67,214,164,165
AL,68,215,165,166
AL,69,216,166,167
AL,70,217,167,168
AL,71,218,168,169
AL,72,219,169,170
AL,73,220,170,171
!!!Semicircunferência Parte Inferior
AL,197,123,172,173
AL,198,124,173,174
AL,199,125,174,175
AL,200,126,175,176
AL,201,127,176,177
AL,202,128,177,178
AL,203,129,178,179
AL,204,130,179,180
AL,205,131,180,181
AL,206,132,181,182
AL,207,133,182,183
AL,208,134,183,184
AL,209,135,184,185
AL,210,136,185,186
AL,211,137,186,187
AL,212,138,187,188
AL,213,139,188,189
AL,214,140,189,190
AL,215,141,190,191
AL,216,142,191,192
AL,217,143,192,193
AL,218,144,193,194
AL,219,145,194,195
AL,220,146,195,196
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Extrusão!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
VEXT,ALL,,0,0,WIDTHh,1,1,1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Definição da Malha!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!Divisões das Linhas para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleccção de Linhas para a Malha
!!!Divisão de cada Camada por "np" Elementos
!!!Linhas Rectas para Z=0
LSEL,S,LOC,X,-LENGTHE
LSEL,A,LOC,X,0
LSEL,A,LOC,Y,-0.001,0.001
LSEL,R,LOC,Z,0
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Rectas para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,X,-LENGTHE
LSEL,A,LOC,X,0
LSEL,A,LOC,Y,-0.001,0.001
LSEL,R,LOC,Z,WIDTHh
LESIZE,ALL,,np
ALLSEL,ALL
CSYS,1          !Sistema de Coordenadas Cilindrico
!!!Semicircunferência Parte Superior para Z=0
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),45
LESIZE,ALL,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Inferior para Z=0
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),-45
LESIZE,ALL,,ntheta

```

```

ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Superior para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Parte Inferior para Z=WIDTHh
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,Y,(RADIUSa/2),-45
LESIZE,ALL,,,ntheta
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo X, Z=0)
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,X,-(LENGTHe/2)
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo X, Z=WIDTHh)
LSEL,S,LOC,Z,WIDTHh
LSEL,R,LOC,X,-(LENGTHe/2)
LESIZE,ALL,,,ne
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo Z, X=-LENGTHe)
LSEL,S,LOC,X,-LENGTHe
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh          !Para estudo das tensões
!LESIZE,ALL,,,nh,-10,,,,!Para estudos dos efeitos de
bordo
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais nas Abas (eixo Z, X=0)
LSEL,S,LOC,X,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh          !Para estudo das tensões
!LESIZE,ALL,,,nh,-10,,,,!Para estudos dos efeitos de
bordo
ALLSEL,ALL
!!!Linhas Horizontais na Semicircunferência (eixo Z, Y=0)
LSEL,S,LOC,Y,0
LSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
LESIZE,ALL,,,nh          !Para estudo das tensões
!LESIZE,ALL,,,nh,-10,,,,!Para estudos dos efeitos de
bordo
ALLSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Seleção de volumes para a Malha!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Volumes Planos
!!!Aba Superior
LOCAL,11,0,0,0,0,90,,,1,1,
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,1,3,1
VSEL,A,VOLU,,7,8,1
VSEL,A,VOLU,,12,13,1
VSEL,A,VOLU,,17,18,1
VSEL,A,VOLU,,22,24,1
VATT,1,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,4,6,1
VSEL,A,VOLU,,9,11,1
VSEL,A,VOLU,,14,16,1
VSEL,A,VOLU,,19,21,1
VATT,2,,1,11
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Aba Inferior
LOCAL,12,0,0,0,0,-90,,,1,1,
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,25,27,1
VSEL,A,VOLU,,31,32,1
VSEL,A,VOLU,,36,37,1

VSEL,A,VOLU,,41,42,1
VSEL,A,VOLU,,46,48,1
VATT,1,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,28,30,1
VSEL,A,VOLU,,33,35,1
VSEL,A,VOLU,,38,40,1
VSEL,A,VOLU,,43,45,1
VATT,2,,1,12
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Volumes Curvos
LOCAL,13,1,0,0,0,,,1,1,
!!!Semicircunferência Superior
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,49,51,1
VSEL,A,VOLU,,55,56,1
VSEL,A,VOLU,,60,61,1
VSEL,A,VOLU,,65,66,1
VSEL,A,VOLU,,70,72,1
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,52,54,1
VSEL,A,VOLU,,57,59,1
VSEL,A,VOLU,,62,64,1
VSEL,A,VOLU,,67,69,1
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Semicircunferência Inferior
!!!Camadas a 90° (Material 1)
VSEL,S,VOLU,,73,75,1
VSEL,A,VOLU,,79,80,1
VSEL,A,VOLU,,84,85,1
VSEL,A,VOLU,,89,90,1
VSEL,A,VOLU,,94,96,1
VATT,1,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
!!!Camadas a 0° (Material 2)
VSEL,S,VOLU,,76,78,1
VSEL,A,VOLU,,81,83,1
VSEL,A,VOLU,,86,88,1
VSEL,A,VOLU,,91,93,1
VATT,2,,1,13
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
VMESH,ALL
ALLSEL,ALL
CSYS,0          !Sistema de Coordenadas Cartesiano
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!Definição das!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!Condições de Fronteira!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Aplicação de Forças!!!
!!!e Constrangimentos!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!Forças na Aba Superior
NSEL,S,NODE,,8126
NSEL,A,NODE,,8022
NSEL,A,NODE,,8044

```

```

D,ALL,,0,,,UX,UZ
F,ALL,FY,(P/3)
NSEL,ALL
!!!Constrangimentos
NSEL,S,NODE,,22679
NSEL,A,NODE,,22575
NSEL,A,NODE,,22597
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Solução!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!Pós Processamento!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
FINISH
/POST1
RSYS,1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS ELEMENTOS DO MEIO DA
ESPESSURA E LARGURA!!!
!!!!PARA CÁLCULO DAS TENSÕES RADIAIS E
CIRCUNFERENCIAIS!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!SELECÇÃO DOS NÓS PARA Y=0º E A MEIO DA
LARGURA Z
ALLSEL,ALL
CSYS,1
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,Z,(WIDTHh/2)
CSYS,0
!!!COORDENADAS
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
!!!TENSÕES
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!LISTAs DOS NÓS E RESPECTIVAS TENSÕES!!!
!!!!!!PARA TODA A CIRCUNFERÊNCIA!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!O ANSYS SÓ CARREGA 20 TABELAS DE CADA
VEZ!!!!!!
!!!!!!CARREGAR ESTE FICHEIRO DE 8 EM 8 CAMADAS
(i)!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
CSYS,1
!!!PARA UMA CAMADA i
ALLSEL,ALL
i=1
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=2
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z

```

```

DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=3
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=4
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=5
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=6
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=7
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=8
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!APAGAR AS TABELAS MANUALMENTE E!!!!
!!!CARREGAR AS SEGUINTEs 8 CAMADAS!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
i=9

```

```

NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=10
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=11
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=12
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=13
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=14
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=15
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL

```

```

i=16
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!APAGAR AS TABELAS MANUALMENTE E!!!!
!!!CARREGAR AS RESTANTES 8 CAMADAS!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ALLSEL,ALL
i=17
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=18
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=19
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=20
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=21
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=22
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1

```

```
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
ALLSEL,ALL
i=23
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
```

```
ALLSEL,ALL
i=24
NSEL,S,LOC,X,RADIUSa+((i-
1)*PLYt),RADIUSa+(i*PLYt)
NSEL,R,LOC,Y,-90,90
NSORT,LOC,X,1,0,,SELECT
DSYS,1
NLIST,ALL,,,COORD,X,Y,Z
DSYS,0
NSORT,LOC,X,1,0,,0
PRNSOL,S,COMP
i=
ALLSEL,ALL
CSYS,0
```