

Jorge Fernando Mimoso Pericão Figueira

# Análise e desenvolvimento de uma estrutura *monocoque* para um veículo de elevada eficiência energética

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica  
na Especialidade de Produção e Projeto

Setembro/2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



• C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Análise e desenvolvimento de uma estrutura *monocoque* para um veículo de elevada eficiência energética**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

**Autor**

**Jorge Fernando Mimoso Pericão Figueira**

**Orientadores**

**Professora Doutora Maria Augusta Neto**

**Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professora Doutora Ana Paula Martins Amaro</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professora Doutora Maria Augusta Neto</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, Setembro, 2014**

À minha mãe.

## Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, as quais não posso deixar de referir e deixar aqui o meu agradecimento.

Gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Maria Augusta Neto, pela confiança que depositou em mim para a aceitação e realização deste desafio, pela paciência, disponibilidade para esclarecer quaisquer dúvidas e pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso e da realização desta dissertação de mestrado.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira, por ter encorajado a passagem do que era apenas uma ideia para o real, através da dissertação de mestrado que se apresenta em seguimento. Agradeço a sua paciência, disponibilidade para esclarecer quaisquer dúvidas e conhecimentos transmitidos ao longo do curso e enquanto membro da equipa Eco Veículo.

Ao meu pai agradeço a paciência que teve em esclarecer-me todas as dúvidas que lhe propunha sobre mecânica, quando eu ainda era criança e que, ao mesmo tempo, me ensinou a realizar com calma qualquer tarefa e ir sempre em busca da perfeição.

À minha mãe agradeço a coragem e apoio que me deu para entrar no curso de Engenharia Mecânica, na escolha do tema desta dissertação e durante todo o processo de realização do curso e dissertação. Agradeço toda a coragem e apoio durante o processo de passagem pela vida, que me possibilitou ser a pessoa que atualmente sou.

Aos meus amigos, cujas convivências e experiências partilhadas me ajudaram ao longo do percurso académico e que mantenho para o resto da vida.

Por último, agradeço à Rita, pelos conselhos, força, paciência e ajuda que foi dando ao longo do tempo. Agradeço a força de vontade, moral e o ombro que me ajudou a ultrapassar fases mais difíceis do curso e da vida.

A todos agradeço por nunca me deixarem desistir.

## Resumo

Esta dissertação tem como objetivo a análise e o desenvolvimento de uma estrutura *monocoque* de elevada eficiência estrutural (relação rigidez/massa) para incorporar o novo protótipo EV03i do projeto Eco Veículo, com vista a participar em competições de alto rendimento energético. Os objetivos deste estudo são a obtenção de uma estrutura *monocoque*, que irá equipar o EV03i, com valor de massa inferior ao atual XC20i, manter ou até aumentar a rigidez estrutural do veículo e manter ou aumentar a acessibilidade a qualquer parte do veículo, quer para a entrada e a saída do piloto, quer para operações de manutenção. Estes objetivos foram assim definidos de modo a que o EV03i atinja níveis de desempenho energético nunca antes atingidos pela equipa na Shell Eco-Marathon que é uma competição, a nível mundial, de veículos automóveis de elevada eficiência energética.

Uma grande parte deste trabalho foi a fase inicial de seleção e estudo dos materiais a utilizar na construção da estrutura. A seleção e o estudo dos materiais ocuparam grande parte do tempo, pois tratava-se de materiais que nunca tinham sido combinados e por isso as suas propriedades mecânicas não eram conhecidas. Foi necessária a aprendizagem e compreensão do fenómeno dos materiais compósitos e materiais ortotrópicos, foram desenvolvidas folhas de cálculo de forma a obter, por via teórica, as propriedades desses materiais. Concluída esta fase, iniciou-se uma fase de testes com vista a adquirir contacto com o *software* que se iria utilizar para realizar as simulações pretendidas, ao mesmo tempo que se consolidavam os conhecimentos adquiridos sobre os materiais na fase anterior.

A última fase consistiu na análise e simulação das estruturas que se tinham definido como objetivo. O resultado final foi uma estrutura *monocoque*, que cumpre todos os requisitos que lhe foram impostos, com uma massa de 5,23 kg.

**Palavras-chave:** Shell Eco-Marathon, EV03i, Elevada eficiência energética, *Monocoque*.

## Abstract

The main objective of the work presented here is the research and development of a *monocoque* frame to embody the new EV03i prototype, aiming to take part in Shell Eco-Marathon high energy efficiency competition. The goals set here are to reduce weight, maintain or increase structural rigidity and maintain or increase cockpit space in the *monocoque* structure to be developed. The goals were set like so to achieve results never achieved before by the team in a Shell Eco-Marathon competition.

The material study and selection was the major time consuming phase in this work as the materials selected were never tested before, therefore the respective mechanical properties were unknown. For this reason a learning stage was necessary to better understand composite and orthotropic materials, spreadsheets were created to obtain such properties with the knowledge gained in this phase. With this stage completed a test phase begun aiming to acquire software dexterity for better flowing computer simulations and at the same time consolidating the previously gained knowledge.

The last stage consisted in research and simulation of the objective structures set earlier. The final result was a *monocoque* structure that fulfilled all the requirements and had a mass of only 5,23 kg.

**Keywords** Shell Eco-Marathon, EV03i, High energy efficiency, *Monocoque*.

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vii
Simbologia e Siglas .....	ix
Simbologia.....	ix
Símbolos Gregos .....	x
Siglas .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE .....	3
2.1. Tipos de chassis utilizados na construção de veículos terrestres.....	3
2.2. Tipos de chassis utilizados nos protótipos que participam na Shell Eco-Marathon6	
2.3. Chassi atual do Eco Veículo XC20i .....	7
2.4. Futuro chassi do EV03i.....	7
3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE PROJETO.....	9
3.1. Regulamento Shell Eco-Marathon.....	9
3.2. Esforços .....	11
3.3. Materiais .....	13
4. FASE DE TESTES.....	27
4.1. Teste 1 – Placa quadrada simplesmente apoiada sob pressão uniforme.....	27
4.2. Teste 2 – Scordelis-Lo, problema padrão de um telhado cilíndrico .....	29
4.3. Teste 3 – Casca cilíndrica trilhada.....	30
4.4. Teste 4 – Placa ortotrópica sob pressão uniforme .....	32
4.5. Teste 5 – Placa multicamadas simplesmente apoiada sob pressão uniforme .....	34
5. ESTUDO E PROJETO DO PROTÓTIPO EV03i.....	36
5.1. Sistema de direção .....	36
5.1.1. Apoio .....	37
5.1.2. Placa da direção .....	39
5.1.3. Reforço da placa de direção.....	43
5.2. Monocoque .....	46
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	51
6.1. Conclusões.....	51
6.2. Sugestões .....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Chassi tipo escada do Toyota Tundra 2007 (John, 2006).....	3
Figura 2 – Tatra T75 chassi tipo coluna dorsal (Markham, 2008).....	4
Figura 3 – Chassi tipo gaiola do Maserati Tipo 61 (Bandershtadter, 2010).....	5
Figura 4 – Sentido esquerda-direita, chassi em gaiola Lamborghini Countach LP-400, portas tipo tesoura Lamborghini Countach 5000 <i>quattrovalvole</i> , portas tipo asa de gaivota Mercedes-Benz 300 SL Gullwing (Baron), (badass, 2013), (Hunter, 1999). .....	5
Figura 5 – Em primeiro plano, chassi <i>monocoque</i> McLaren MP4/1, em segundo plano habitáculo <i>monocoque</i> McLaren MP4-12C (Automotive).....	6
Figura 6 - Nova forma aerodinâmica para o protótipo EV03i (Leitão, 2014).....	8
Figura 7 – Trança de fibras de carbono (Cjp24, 2009).....	15
Figura 8 – Diferentes tipos de constituição de um compósito. Editada de (Dandy, 2007). 15	
Figura 9 – Lâmina básica constituída por fibras longitudinalmente dispostas e ligadas por uma matriz. Editada de (Dandy, 2007).....	17
Figura 10 – Modelo representativo de uma amostra de material em <i>sandwich</i> . Editado de (Industry).....	24
Figura 11 – Representação de uma amostra de compósito com núcleo hexagonal. Editado de (NauticExpo). .....	25
Figura 12 – Formulação em ADINA do problema A27.....	27
Figura 13 – Simulação em ADINA do problema A27.....	28
Figura 14 – Formulação em ADINA do problema A30.....	29
Figura 15 – Simulação em ADINA do problema A30.....	30
Figura 16 – Formulação em ADINA do problema A32.....	31
Figura 17 – Simulação em ADINA do problema A32.....	31
Figura 18 – Formulação em ADINA do problema A39.....	32
Figura 19 – Simulação em ADINA do problema A39.....	33
Figura 20 – Formulação em ADINA do problema A113.....	34
Figura 21 – Simulação em ADINA do problema A113.....	35
Figura 22 – Montagem sistema de direção.....	36
Figura 23 – Montagem do conjunto rótula/apoio superior em CAD.....	37
Figura 24 – Distribuição de tensões no apoio.....	38

Figura 25 – Distribuição de deslocamentos do apoio.....	39
Figura 26 - Placa da direção desenhada em CAD. ....	40
Figura 27 – Formulação em ADINA da placa da direção. ....	40
Figura 28 - Distribuição dos deslocamentos da placa da direção.....	41
Figura 29 - Distribuição de tensões na placa da direção. ....	42
Figura 30 - Sistema de direção desenhado e montado em CAD. ....	43
Figura 31 - Formulação em ADINA do conjunto placa/reforços.....	43
Figura 32 - Distribuição dos deslocamentos no sistema de direção.....	44
Figura 33 - Distribuição de tensões no sistema de direção.....	45
Figura 34 - Zona de separação entre as partes superior/inferior da forma aerodinâmica....	46
Figura 35 - Zonas criadas para aplicação de condições de fronteira e solicitações.....	47
Figura 36 - Formulação em ADINA da <i>monocoque</i> . ....	48
Figura 37 - Distribuição dos deslocamentos na <i>monocoque</i> . ....	48
Figura 38 - Distribuição de tensões na <i>monocoque</i> . ....	49

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das cinco primeiras equipas da classe de gasolina. ....	6
Tabela 2 – Tipo de chassi do protótipo de cada equipa presente na tabela 1. ....	7
Tabela 3 – Esforços, em Newton, transmitidos às rótulas pelas mangas de eixo (Silva, 2014). ....	11
Tabela 4 – Esforços, em Newton, transmitidos às rótulas pelas mangas de eixo na situação mais desfavorável considerando um coeficiente de segurança de 1,5 (Silva, 2014). ....	12
Tabela 5 – Esforços que atuam no CG considerando um coeficiente de segurança de 1,5 (Silva, 2014). ....	12
Tabela 6 – Posição do CG relativamente à origem <i>O</i> (Silva, 2014). ....	12
Tabela 7 – Materiais comuns na construção mecânica e respetiva designação. ....	13
Tabela 8 – Propriedades mecânicas dos materiais descritos na Tabela 7. ....	14
Tabela 9 – Fabricantes de tranças e tecidos de fibra de carbono e respetivos modelos para venda. ....	14
Tabela 10 – Propriedades mecânicas dos materiais descritos na Tabela 9. ....	14
Tabela 11 – Fabricantes de matrizes poliméricas para compósitos e respetivas designações. ....	16
Tabela 12 – Propriedades mecânicas dos materiais descritos na Tabela 11. ....	17
Tabela 13 – Propriedades mecânicas da fibra e matriz escolhida para o compósito. ....	21
Tabela 14 – Propriedades mecânicas do compósito resultante dos materiais da Tabela 13. ....	22
Tabela 15 - Propriedades mecânicas de uma lâmina de tecido/matriz. ....	23
Tabela 16 – Núcleo em ninho de abelha escolhido para constituir o compósito. ....	25
Tabela 17 – Propriedades mecânicas do núcleo da Tabela 16. ....	26
Tabela 18 – Resultados do teste 1 – A27. ....	28
Tabela 19 – Resultados do teste 2 - A30. ....	30
Tabela 20 – Resultados do teste 3 - A32. ....	32
Tabela 21 – Resultados do teste 4 - A39. ....	33
Tabela 22 – Resultados do teste 5 - A113. ....	35
Tabela 23 – Momentos e forças a aplicar ao apoio. ....	37
Tabela 24 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061-T6. ....	38

Tabela 25 - Tensões máximas nas camadas constituintes da placa. ....	41
Tabela 26 - Tensões máximas nas camadas constituintes do conjunto placa/reforços. ....	44
Tabela 27 - Tensões máximas nas camadas constituintes do material. ....	49

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$d$  – diâmetro de uma fibra de carbono [m]

$E$  – Módulo de Elasticidade [Pa]

$E_f$  – Módulo de Elasticidade longitudinal da fibra [Pa]

$E_{fi}$  – Módulo de Elasticidade longitudinal da fibra na direção  $i$  [Pa]

$E_{fii}$  – Módulo de Elasticidade longitudinal da fibra na direção  $i$  [Pa]

$E_{gii}$  – Módulo de Elasticidade longitudinal do material na direção  $i$  [Pa]

$E_i$  – Módulo de Elasticidade longitudinal do material na direção  $i$  [Pa]

$E_{ii}$  – Módulo de Elasticidade longitudinal do material na direção  $i$  [Pa]

$E_m$  – Módulo de Elasticidade longitudinal da matriz [Pa]

$E_{mi}$  – Módulo de Elasticidade longitudinal da matriz na direção  $i$  [Pa]

$\frac{E}{\rho}$  – Índice de rigidez específica [ $\frac{\text{Pa}}{\text{kg/m}^3}$ ]

$g$  – aceleração gravidade [ $\text{m/s}^2$ ]

$G$  – Módulo de Elasticidade transversal [Pa]

$G_{fij}$  – Módulo de Elasticidade transversal da fibra no plano  $ij$  [Pa]

$G_{gij}$  – Módulo de Elasticidade transversal do material no plano  $ij$  [Pa]

$G_{ij}$  – Módulo de Elasticidade transversal do material no plano  $ij$  [Pa]

$G_{mij}$  – Módulo de Elasticidade transversal da matriz no plano  $ij$  [Pa]

$G_{tL}$  – Módulo de Elasticidade transversal da *honeycomb* na direção  $tL$  [Pa]

$G_{tW}$  – Módulo de Elasticidade transversal da *honeycomb* na direção  $tW$  [Pa]

$k_f$  – Percentagem volúmica de fibra de uma lâmina de compósito

$k_m$  – Percentagem volúmica de matriz de uma lâmina de compósito

$n$  – Coeficiente de segurança

$R$  – Raio de uma curva [m]

$s$  – Distância entre fibras de carbono dentro de uma lâmina de compósito [m]

- $S_L^{(+)}$  – Tensão de cedência à tração do material no sentido longitudinal [Pa]  
 $S_{f1}^{(+)}$  – Tensão de cedência à tração de uma fibra no sentido longitudinal [Pa]  
 $S_m^{(+)}$  – Tensão de cedência à tração da matriz [Pa]  
 $S_{mf1}$  – Tensão à tração criada na matriz quando a fibra atinge a sua deformação específica máxima [Pa]  
 $S_T^{(+)}$  – Tensão de cedência à tração do material no sentido transversal [Pa]

## Símbolos Gregos

- $\varepsilon$  – Deformação específica à cedência  
 $\varepsilon_f$  – Deformação específica à cedência da fibra  
 $\varepsilon_{f1}$  – Deformação específica à cedência da fibra  
 $\varepsilon_m$  – Deformação específica à cedência da matriz  
 $\varepsilon_{max}$  – Deformação específica à cedência  
 $\nu$  – Coeficiente de Poisson  
 $\nu_{fij}$  – Coeficiente de Poisson da fibra no plano ij  
 $\nu_{gij}$  – Coeficiente de Poisson do material no plano ij  
 $\nu_{ij}$  – Coeficiente de Poisson do material no plano ij  
 $\nu_{mij}$  – Coeficiente de Poisson da matriz no plano ij  
 $\rho$  – Massa volúmica [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_f$  – Massa volúmica da fibra [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_g$  – Massa volúmica do material [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_m$  – Massa volúmica da matriz [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\sigma_c$  – Tensão de limite elástico do material [Pa]  
 $\sigma_{cL}$  – Tensão de limite elástico da *honeycomb* na direção L [Pa]  
 $\sigma_{cW}$  – Tensão de limite elástico da *honeycomb* na direção W [Pa]  
 $\sigma_f$  – Tensão de limite de fadiga do material [Pa]  
 $\sigma_r$  – Tensão de rotura do material [Pa]  
 $v$  – Razão de volume  
 $v_f$  – Razão de volume da fibra

$v_m$  – Razão de volume da matriz

## **Siglas**

CG – Centro de gravidade

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

CAD – Computer Aided Design

XC20 – Primeiro protótipo da equipa Eco Veículo

XC20i – Segundo protótipo da equipa Eco Veículo

EV03i – Terceiro protótipo da equipa Eco Veículo

## 1. INTRODUÇÃO

A motivação que levou à realização deste trabalho foi a vontade de aumentar o desempenho do protótipo da equipa Eco Veículo na Shell Eco-Marathon Europe. A Shell Eco-Marathon é uma competição, a nível mundial, de veículos automóveis de elevada eficiência energética.

Ao longo da participação da equipa Eco Veículo na Shell Eco-Marathon o desempenho desta equipa não tem parado de aumentar. Esse aumento de desempenho deve-se a estudos que visam o melhoramento da eficiência do motor, a redução de massa de alguns componentes e melhoramentos aerodinâmicos e de atrito de rolamento. A evolução da equipa Eco Veículo passou por dois protótipos, o XC20 e o XC20i, com a diferença sendo, entre um protótipo e outro, a massa do veículo e resistência aerodinâmica e de rolamento pois ambos os protótipos utilizaram o mesmo motor.

Com as últimas participações na Shell Eco-Marathon foi visível uma estabilização no desempenho que o protótipo, XC20i, prestou durante as provas. Dada esta estabilização de desempenho e a entrada de novas regras, que regem a Shell Eco-Marathon, regras estas que praticamente impossibilitam o protótipo mais recente, XC20i, de participar, criou-se a necessidade de produzir um terceiro protótipo. Este terceiro protótipo já irá respeitar todas as novas regras impostas e deverá ter a capacidade de alcançar níveis de desempenho nunca antes alcançados pela equipa e antigos protótipos.

O processo de construção do novo protótipo, EV03i, começou por uma fase que consiste na geração de ideias e posterior verificação de admissibilidade. Dando-se esta fase por completa, iniciou-se a fase de definição de objetivos concretos passíveis de serem realizados. Nesta fase foi definido que para o novo EV03i existir e cumprir as expectativas nele colocadas seria necessário: estudar e criar uma nova forma aerodinâmica com menor arrasto que a anterior (Leitão, 2014), estudar e criar um novo tipo de rodas mais leves e rígidas que as anteriores (Faria, 2014), estudar e criar um novo sistema de transmissão mais eficiente em trabalho e muito mais eficiente em *standby* que o anterior (Figueiredo, 2014), estudar e criar um novo sistema de direção que respeite as novas regras (Silva, 2014), melhorar a eficiência do atual motor (Nunes, 2014) e por fim estudar e criar um

novo chassi que englobe a nova forma aerodinâmica, que englobe o novo sistema de direção e transmissão e englobe as novas rodas.

Tendo sido os diversos objetivos distribuídos a por diferentes alunos, o trabalho presente irá ter como objetivo a análise e desenvolvimento de um chassi que englobe a nova forma aerodinâmica e todos os outros objetivos previamente referidos.

Na fase de geração de ideias, relativamente ao chassi, surgiu como primeira ideia o estudo de um chassi de construção em *monocoque*, essa ideia passou para objetivo pois atualmente o avanço tecnológico está a levar que quase todos o tipo de transportes, aéreos, terrestres e marítimos, utilizem chassis de construção em *monocoque*.

Dentro do objetivo geral de construção da *monocoque* definiram-se dois outros objetivos, a criação da estrutura que servirá de suporte ao novo sistema de direção e da estrutura que servirá de suporte ao novo sistema de transmissão, tudo englobado e fazendo parte do novo chassi que transportará o piloto e suportará as solicitações criadas pelas piores condições de prova possíveis.

O estudo e projeto, da *monocoque* e subsistemas, serão realizados em duas fases, são elas: a criação de uma geometria que cumpra as restrições geométricas exigidas e a posterior análise em elementos finitos dessa geometria assegurando a resistência necessária às solicitações induzidas. Uma fase posterior que necessitará de coordenação entre todas as áreas necessárias à criação do EV03i será a de otimização de todos os componentes criados nas dissertações anteriormente referidas.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. Tipos de chassis utilizados na construção de veículos terrestres

Desde o início da era automóvel o fabrico de veículos assentou em vários métodos de construção de chassis. Destacam-se aqui os mais relevantes: a estrutura tipo escada; coluna dorsal (*back bone*); *monocoque*; gaiola (*bird cage* ou *space frame*).

A estrutura em escada é o tipo de construção mais antigo e mais simples e teve origem na construção de coches e charretes. Como o nome indica, esta estrutura parece-se com uma escada, onde duas vigas são posicionadas segundo o comprimento do veículo e ligadas entre si por barras transversais. Os elementos longitudinais têm a função de suportar os esforços exercidos pela carga em transporte e os esforços longitudinais criados por acelerações e travagens. Os elementos transversais oferecem resistência a esforços laterais e a esforços de torção. A Figura 1 mostra um exemplo de um chassi em escada.

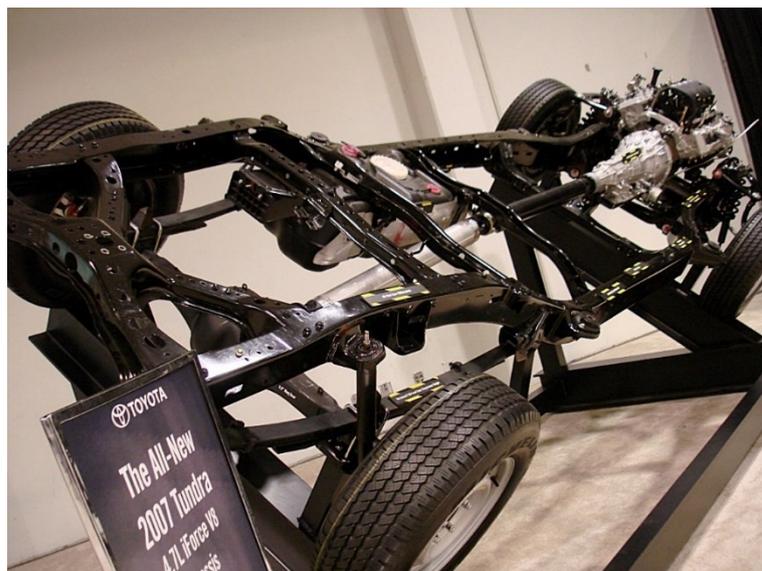


Figura 1 – Chassi tipo escada do Toyota Tundra 2007 (John, 2006).

A estrutura tipo coluna dorsal (*back bone*) baseia-se no elemento estrutural mais antigo, o esqueleto, mais especificamente a coluna vertebral. Este tipo de chassi criado por Hans Ledwinka, criador também da suspensão independente e de travões às quatro rodas, tem como função fazer a conexão entre o eixo dianteiro e traseiro através de um único elemento tubular, providenciar toda a resistência mecânica necessária e fornecer o espaço suficiente para o sistema de transmissão de um veículo com motor dianteiro e tração traseira. Um dos primeiros chassis em coluna dorsal está ilustrado na Figura 2.

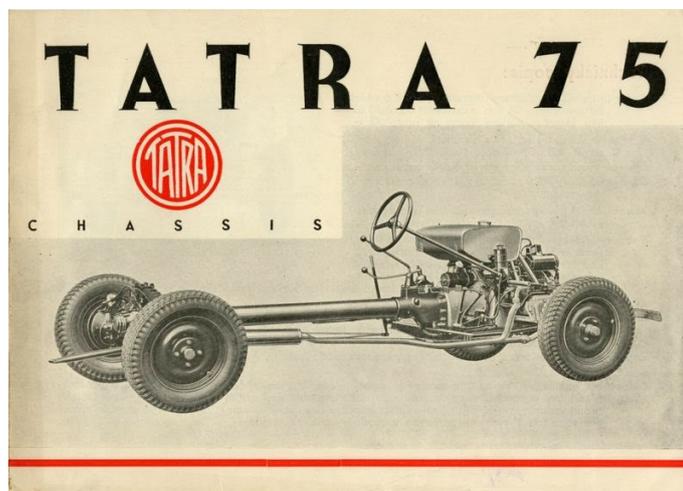
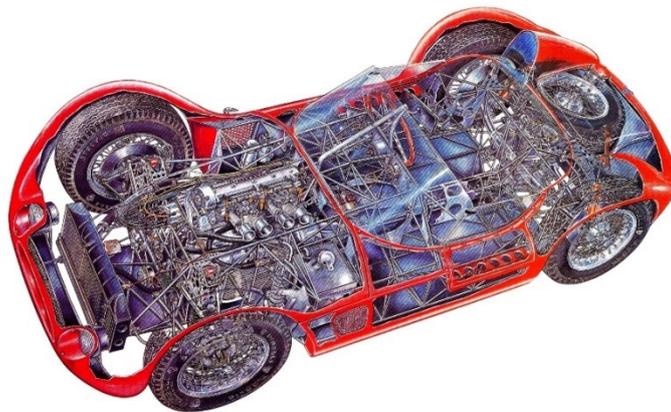


Figura 2 – Tatra T75 chassi tipo coluna dorsal (Markham, 2008).

A estrutura tipo gaiola (*bird cage* ou *space frame*) baseia-se na união de diversos tubos, de secção circular ou quadrada, em diversas direções, sob a forma de treliça, com vista a oferecer resistência mecânica aos esforços que lhe são induzidos. Um dos primeiros exemplos deste tipo de estrutura é o Maserati Tipo 61 de 1960, Figura 3.



**Figura 3 – Chassi tipo gaiola do Maserati Tipo 61 (Bandershtadter, 2010).**

Sendo os pontos fracos desta estrutura a zona de entrada e de saída do habitáculo e carros desportivos de elevadas prestações exigirem estruturas em gaiola capazes de suportar esforços superiores aos dos veículos comuns, surge uma desvantagem que se torna também uma característica do chassi em gaiola – a introdução de uma estrutura reforçada e volumosa na zona inferior das portas, que leva à elevação da entrada para o habitáculo e dá origem a portas em “tesoura” (*scissor doors*) e “asa de gaivota” (*gullwing doors*), exemplificado na Figura 4.



**Figura 4 – Sentido esquerda-direita, chassi em gaiola Lamborghini Countach LP-400, portas tipo tesoura Lamborghini Countach 5000 *quattrovalvole*, portas tipo asa de gaivota Mercedes-Benz 300 SL Gullwing (Baron), (badass, 2013), (Hunter, 1999).**

A estrutura tipo *monocoque*, francês para “única” (mono) e “concha” ou “casco” (coque), isto é, casco-único ou até uni-casco, é um método de construção de chassis onde a estrutura exterior é utilizada como suporte estrutural e desempenha um papel aerodinâmico, o que difere de outros métodos onde uma estrutura interna tem função

estrutural, sendo posteriormente coberta com uma outra estrutura exterior com função aerodinâmica. A Figura 5 mostra dois exemplos de chassis *monocoque*.



Figura 5 – Em primeiro plano, chassi *monocoque* McLaren MP4/1, em segundo plano habitáculo *monocoque* McLaren MP4-12C (Automotive).

## 2.2. Tipos de chassis utilizados nos protótipos que participam na Shell Eco-Marathon

Durante a participação do projeto Eco Veículo na Shell Eco-Marathon e pela pesquisa efetuada, concluiu-se que a grande parte dos veículos que participam na Shell Eco-Marathon baseiam-se em dois principais tipos de construção de chassis, gaiola e *monocoque*, surgindo também alguns métodos de construção que associam os dois acima referidos. Na Tabela 1 estão expostos os resultados das cinco melhores equipas que participam na classe gasolina (*petrol*) da Shell Eco-Marathon, entre 2012 e 2014.

Tabela 1 – Classificação das cinco primeiras equipas da classe de gasolina.

Classificação \ Ano	2012	2013	2014
1º	MICROJOULE	MICROJOULE	MICROJOULE
2º	GAMF	GAMF	IFMA eco-challenge
3º	Remmi-Team	Remmi-Team	GAMF
4º	Eco Veículo	Proto INSA Club	Remmi-Team
5º	PV3e Levallois	PV3e Levallois	PV3e Levallois

Na Tabela 2 é caracterizado o tipo de construção de chassis do protótipo, de cada uma das equipas apresentada na Tabela 1.

**Tabela 2 – Tipo de chassi do protótipo de cada equipa presente na tabela 1.**

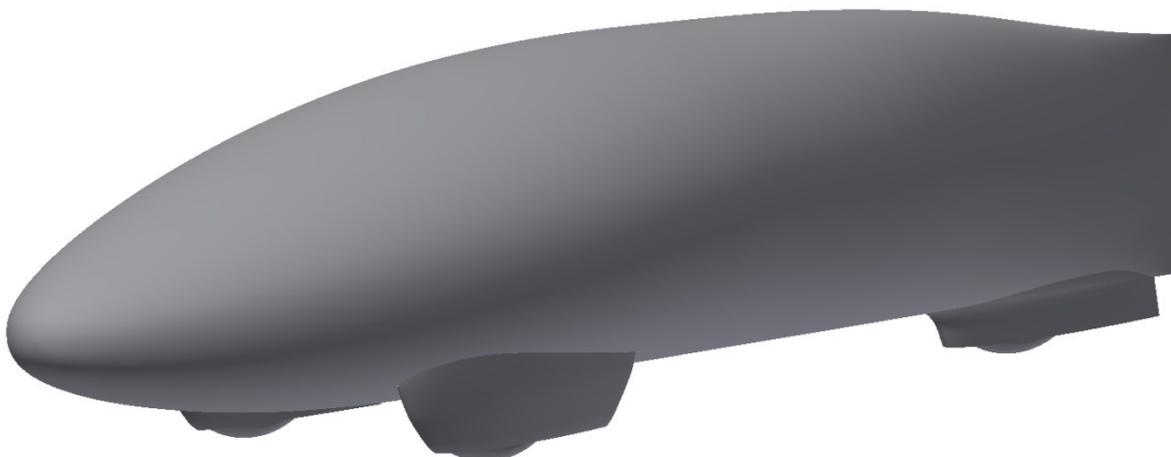
<b>Equipa</b>	<b>Tipo de chassi do protótipo</b>
Eco Veículo	Gaiola
MICROJoule	<i>Monocoque</i>
Remmi-Team	Híbrido - gaiola/ <i>monocoque</i>
GAMF	<i>Monocoque</i>
IFMA eco-challenge	<i>Monocoque</i>
PV3e Levallois	<i>Monocoque</i>
Proto INSA Club	<i>Monocoque</i>
IUT Aix en Provence	<i>Monocoque</i>
Mash Thermique	<i>Monocoque</i>
ARC Team	Gaiola

### **2.3. Chassi atual do Eco Veículo XC20i**

A Tabela 2 mostra que o atual protótipo, XC20i, da equipa Eco Veículo tem como base um chassi em gaiola. Nesta construção foram utilizados tubos de secção circular oca em alumínio da série 6063-T5, obtendo-se uma estrutura com uma massa final de 5.5 kg, capaz de suportar todos os esforços decorrentes de uma utilização normal. Após a montagem de todas as peças que são particulares a este chassi, o valor da massa do veículo aumenta para 38 kg.

### **2.4. Futuro chassi do EV03i**

Está definido como objetivo desta dissertação, estudar e projetar um chassi, para o novo protótipo EV03i, que supere as capacidades do atual chassi em gaiola, isto é, reduzir a massa, manter ou aumentar a rigidez e manter ou aumentar o espaço livre no habitáculo e compartimento do motor. Para alcançar esses objetivos utilizar-se-á o método de construção de chassis em *monocoque*, cuja forma aerodinâmica, Figura 6, foi definida por (Leitão, 2014), onde o ponto de partida, no que toca a dimensões do veículo, foi o chassi do protótipo XC20i.



**Figura 6 - Nova forma aerodinâmica para o protótipo EV03i (Leitão, 2014).**

### 3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE PROJETO

Antes de iniciar qualquer tipo de projeto mecânico, é necessário possuir um vasto conhecimento sobre todo o ambiente que irá rodar e interagir com o resultado desse mesmo projeto. Um conjunto de restrições e aproximações, também conhecido por considerações de projeto, irá orientar o projeto mecânico ao longo da sua realização e irá providenciar formas de ultrapassar determinadas dificuldades.

No caso do projeto Eco Veículo, o estudo e construção de cada protótipo deverá respeitar as normas impostas pelo regulamento da Shell Eco-Marathon, suportar as condições de operação em prova e ter em conta os métodos de construção do protótipo, sempre com o máximo rigor possível.

#### 3.1. Regulamento Shell Eco-Marathon

O protótipo EV03i como todos os outros participantes na Shell Eco-Marathon terá de respeitar o regulamento que rege esta prova. No caso do protótipo EV03i, é o regulamento da classe protótipo (*prototype*) gasolina (*petrol*) que está disponível no documento “SHELL ECO-MARATHON 2015 OFFICIAL RULES CHAPTER I” (Eco-Marathon, 2014).

Apresentam-se a seguir os pontos mais importantes do regulamento que apresentam restrições ao projeto e construção do protótipo EV03i.

Artigo 25 alínea a) ponto i), os veículos de classe protótipo deverão ter 3 ou 4 rodas em permanente contacto com o solo, alíneas b), c) e d), não são permitidos apêndices aerodinâmicos que se ajustem, mudem de forma ou possam ser perigosos para membros de outras equipas e arestas rígidas deverão ser de raio inferior a 5 cm. Alínea g), o compartimento do motor deverá ser de rápido e fácil acesso. Alínea k), todos os veículos deverão ser completamente cobertos, isto é, não são permitidos veículos “descapotáveis”.

Artigo 26 alínea a), o chassi de cada veículo deverá ter as dimensões suficientes para conseguir proteger o piloto em caso de embate ou capotamento. Alínea b), c) e d), cada veículo deverá estar equipado com uma barra de proteção (*rollbar*), em caso

de capotamento, a qual se deve situar 5 cm acima do capacete, 5 cm à volta dos ombros do piloto e suportar um esforço de 700 N, aplicado em qualquer direção, sem se deformar.

Artigo 27 alíneas a) a e) uma antepara deverá separar o compartimento do motor do habitáculo, essa antepara deverá ser resistente ao fogo, garantir uma vedação e separação eficiente e impedir o acesso manual do habitáculo para o compartimento do motor.

Artigo 29 alínea a) e d), o banco do piloto deve estar equipado com um cinto de segurança de 5 pontos. Durante a inspeção técnica o conjunto protótipo+piloto é suspenso pelo cinto de segurança e uma avaliação positiva neste teste é necessária para participação na prova.

Artigo 30 alíneas a) a e), o piloto deverá ser capaz de sair do veículo em menos de 10 segundos, a saída do habitáculo deverá ter dimensões suficientes que permitam que os serviços de emergência retirem o piloto do veículo se necessário, a estrutura que tapa a saída do habitáculo deve ser de abertura fácil, rápida e de acesso pelo interior e exterior sem ser necessário a combinação das duas.

Artigo 33, a posição de condução “cabeça primeiro” é proibida.

Artigo 39 alíneas a) a g), dimensões do veículo:

- Altura máxima 100 cm;
- Via mínima 50 cm;
- Relação altura/largura de eixo inferior ou igual a 1.25;
- Distância entre-eixo mínima 100 cm;
- Largura máxima do veículo 130 cm;
- Comprimento máximo do veículo 350 cm.

Artigo 42 alíneas a) a c), só é permitida direção às rodas da frente e o raio mínimo de viragem é de 8 m.

Para outras informações, consultar regras e regulamento (*rules and regulations*) da Shell Eco-Marathon Europe 2015 ou mais atual.

### 3.2. Esforços

Em qualquer tipo de projeto mecânico é necessário conhecer as solicitações, mecânicas, térmicas, ambientais, etc., a que o produto final desse projeto ficará sujeito. Para um projeto ser mecânico realizado com precisão, isto é, sem subdimensionamento ou elevados níveis de sobredimensionamento, é necessário conhecer com precisão o tipo e a intensidade das solicitações a que o produto final do projeto está sujeito. Assim, o dimensionamento do protótipo, *monocoque*, e seus componentes, será realizado para a situação mais desfavorável possível que pode ocorrer quando o veículo se encontra em movimento. Uma das fases da dissertação de Silva (Silva, 2014) tem como objetivo o cálculo dos esforços mecânicos provocados pela entrada do veículo nessa condição mais desfavorável em função da massa e características geométricas do mesmo.

Foi considerada como situação mais desfavorável o momento em que o veículo descreve uma curva de raio  $R$  e circula à velocidade máxima realizável, para esse mesmo raio de curvatura, criando uma situação de eminência de capotamento no instante em que a roda frontal do lado exterior da curva passa por um ressalto de 10 mm de altura e se inicia uma travagem a fundo, mantendo-se sempre em situação de atrito estático. A realização de uma curva na eminência de capotamento em conjunto com uma travagem a fundo origina os esforços descritos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Esforços, em Newton, transmitidos às rótulas pelas mangas de eixo (Silva, 2014).**

	<b>Rótula superior</b>	<b>Rótula inferior</b>
<b>Direção X</b>	-330,600	591,600
<b>Direção Y</b>	258,798	720,349
<b>Direção Z</b>	653,843	0,000

Quando a roda frontal, que está em contacto firme com o solo, passa pelo ressalto de 10 mm, o resultado é a criação de uma mudança de velocidade vertical, num curto espaço de tempo. Os esforços mecânicos que devem ser considerados, tendo em conta as acelerações criadas por esse ressalto, para fins de projeto após considerado um coeficiente de segurança de 1,5 estão expostos na Tabela 4.

**Tabela 4 – Esforços, em Newton, transmitidos às rótulas pelas mangas de eixo na situação mais desfavorável considerando um coeficiente de segurança de 1,5 (Silva, 2014).**

	<b>Rótula superior</b>	<b>Rótula inferior</b>
<b>Direção X</b>	-495,900	887,400
<b>Direção Y</b>	-1088,711	742,500
<b>Direção Z</b>	3064,679	0,000

Para a análise da *monocoque* considera-se a mesma situação mais desfavorável, mas desta vez originando esforços com ponto de atuação no CG, cuja direção e intensidade se pode consultar na Tabela 5.

**Tabela 5 – Esforços que atuam no CG considerando um coeficiente de segurança de 1,5 (Silva, 2014).**

	<b>Força segundo [N]</b>
<b>Direção X</b>	-988,509
<b>Direção Y</b>	1027,236
<b>Direção Z</b>	-7413,828

Considere-se que a origem dos eixos,  $O$ , está ao nível do solo, no ponto médio dos pontos de contacto das rodas da frente. O eixo  $X$  tem origem em  $O$  e está orientado para a traseira do carro. O eixo do  $Y$  tem origem em  $O$  e está orientado para a direita do carro, quando se está sentado no banco do condutor. O eixo  $Z$  tem origem em  $O$  e está orientado para cima. A posição do CG relativamente à origem,  $O$ , está descrita na Tabela 6.

**Tabela 6 – Posição do CG relativamente à origem  $O$  (Silva, 2014).**

	<b>Posição do CG segundo [m]</b>
<b>Direção X</b>	0,535
<b>Direção Y</b>	0,000
<b>Direção Z</b>	0,237

### 3.3. Materiais

Após o conhecimento das solicitações a que o veículo está sujeito, é necessário fazer a escolha do ou dos materiais de construção que permitirão o fabrico da *monocoque*.

Visto que para um desempenho digno de uma prova internacional é necessário um veículo o mais leve possível sem comprometer a rigidez estrutural, a escolha dos materiais deverá assentar nas duas variáveis que traduzem a massa e a rigidez, são elas a massa volúmica  $\rho$  e o módulo de elasticidade  $E$ . Pretende-se o maior valor de  $E$ , e ao mesmo tempo, o menor valor de  $\rho$ , atendendo a que alguns materiais tradicionais de baixa massa volúmica só conseguem manter a rigidez através do aumento do volume de material utilizado, a escolha de um material com baixa massa volúmica poderá conduzir a uma diminuição de espaço no habitáculo contrariando a restrição de manter ou aumentar o espaço no mesmo. Assim o melhor material será o que maximiza o índice de rigidez específica  $\frac{E}{\rho}$  (módulo de elasticidade/massa volúmica).

Na equação que traduz o índice de rigidez específica foi dada a mesma importância ao módulo de Young e à massa volúmica, visto não se saber de maneira clara qual dos dois parâmetros é mais importante e quanto. Na Tabela 7 estão dispostos alguns materiais e respetiva designação associada a um número, para posteriormente, na Tabela 8, consultar as suas propriedades e índices de rigidez.

**Tabela 7 – Materiais comuns na construção mecânica e respetiva designação.**

<b>Número do material</b>	<b>Material</b>	<b>Designação</b>
1	Liga de alumínio	6063 T6
2	Liga de aço	PM 300 IMPAX SUPREME
3	Liga de titânio	Ti-6Al-4V Classe 5
4	Madeira de balsa	DIAB ProBalsa HW
5	Fibra de vidro	E-Glass
6	Fibra de carbono	T-300

A Tabela 8 mostra uma clara vantagem, em termos de índice de rigidez específica, do material número 6 em relação aos restantes, que, por referência à Tabela 7, corresponde à fibra de carbono de designação T-300.

**Tabela 8 – Propriedades mecânicas dos materiais descritos na Tabela 7.**

Número do material	1	2	3	4	5	6
$\sigma_c @ 24\text{ °C [MPa]}$	145,00	900,00	880,00	20,60	3620,00	3530,00
$E \text{ [GPa]}$	68,90	205,00	113,80	6,84	72,40	230,00
$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	2700	7800	4430	220	5140	1760
$(E/\rho)*100$	2,55	2,63	2,57	3,11	1,41	13,07

Visto que a fibra de carbono pode trazer vantagens construtivas ao projeto, foi realizada uma pesquisa das atuais fibras de carbono no mercado. Essa pesquisa foi realizada no ano de 2014 através da consulta dos *website's* de diversos fabricantes onde alguns tinham à disposição fichas técnicas dos materiais que produzem. Um resumo dessa pesquisa está exposto na Tabela 9 e Tabela 10.

**Tabela 9 – Fabricantes de tranças e tecidos de fibra de carbono e respetivos modelos para venda.**

Número do material	Fabricante	Designação
1	HexTow	IM10
2		HM63
3	TORAYCA	M40J
4		M60J
5	NIPPON GRAPHITE FIBER	GRANOC - YSH-60A-10S
6		GRANOC - XN-90-60S
7		GRANOC - YS-90A-30S
8		GRANOC - YS-95A

**Tabela 10 – Propriedades mecânicas dos materiais descritos na Tabela 9.**

Número do material	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_c @ 24\text{ °C [MPa]}$	6964	4688	4410	3920	3900	3430	3530	3530
$E \text{ [GPa]}$	310	441	377	588	630	860	880	920
$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	1790	1830	1770	1930	2120	2190	2180	2190
$(E/\rho)*100$	17,32	24,10	21,30	30,47	29,72	39,27	40,37	42,01

Analisando os dados da Tabela 10, conclui-se que a fibra de carbono com melhor índice de rigidez específica é a do material 8, ou seja, o modelo YS-95A, da marca GRANOC, fabricada pela NIPPON GRAPHITE FIBER Corp. A fibra YS-95A tem um índice de rigidez específica cerca de 16 vezes maior que o aço ou o alumínio, porém é

importante salientar que as tranças de fibra de carbono por si só não são rígidas. A Figura 7 mostra uma trança de fibras de carbono que se assemelha a um molhe de fios de cabelo. Estes fios ou fibras quando sozinhos não apresentam qualquer tipo de rigidez.



Figura 7 – Trança de fibras de carbono (Cjp24, 2009).

As fibras de carbono podem ser parte integrante de um material, constituído por um ou mais elementos diferentes, ao qual se atribui o nome de compósito. As fibras de carbono são designadas de elemento de reforço, as quais são ligadas entre si e mantidas na posição pretendida através de um material designado de matriz. A matriz pode ser de natureza metálica, cerâmica ou polimérica e tem como função proteger as fibras de danos provenientes do exterior, transferir e distribuir as cargas aplicadas ao compósito para as fibras

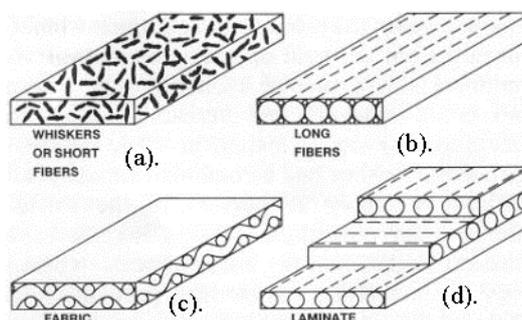


Figura 8 – Diferentes tipos de constituição de um compósito. Editada de (Dandy, 2007).

A Figura 8(a) exemplifica a constituição de uma das formas mais básicas de obter uma lâmina de compósito, onde as fibras são cortadas em pequenos segmentos e misturadas com a matriz. A Figura 8(b) mostra uma fila de fibras, dispostas

longitudinalmente, com a matriz a fazer a ligação entre elas. A Figura 8(c) ilustra uma secção de um tecido constituído por tranças de fibras de carbono entrelaçadas, sendo a ligação entre fibras e o preenchimento dos interstícios feito pela matriz. Por fim a Figura 8(d) representa um laminado, isto é, um conjunto de lâminas, quer seja de fibras cortadas, longitudinais ou em forma de tecido, sobrepostas, formando ou não ângulo entre si. O número de lâminas é função das propriedades finais que se pretendem para o laminado.

O processo de construção da *monocoque* para o protótipo EV03i não acontece em ambiente industrial e é maioritariamente feito por deposição manual (*Hand Layup*). O processo de deposição manual começa pela colocação de um tecido, Figura 8(c), sobre uma zona que tenha a geometria pretendida para o produto final, esse tecido é manualmente ajustado até que ele represente a geometria do molde o melhor possível. O passo seguinte é a introdução da matriz no tecido para se obter um produto final rígido.

Dadas as condições de trabalho, de ambiente não industrial, e a dimensão da geometria do molde ser suficiente para inviabilizar qualquer tipo de deslocação a ambiente industrial, as características da matriz, tais como fluidez à temperatura ambiente, cura à temperatura ambiente ou semelhante e períodos de iniciação de cura a rondar os 30 minutos, são necessárias e essenciais para existir uma real possibilidade de construção do chassi para o novo protótipo EV03i.

Para poder respeitar as restrições enunciadas no parágrafo anterior, o material da matriz deverá ser um polímero. Foi realizada uma pesquisa para o material da matriz procurando o maior valor de índice de rigidez específica e o resultado dessa investigação está exposto na Tabela 11 e Tabela 12.

**Tabela 11 – Fabricantes de matrizes poliméricas para compósitos e respetivas designações.**

<b>Número do material</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Designação</b>
1	Fiber Glast	System 2000
2		Vinyl Ester 1110
3		Isophthalic Polyester 90
4	Gurit	SP 110 Resin/Hardener
5		SP 115 Resin/Hardener
6		Ampreg 21
7		Ampreg 22
8		Ampreg 26

Tabela 12 – Propriedades mecânicas dos materiais descritos na Tabela 11.

Número do material	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_c @ 24\text{ °C}$ [MPa]	67,76	82,00	64,12	82,00	75,90	67,40	54,60	84,90
$E$ [GPa]	2,89	3,72	4,07	3,34	3,70	3,40	3,89	3,91
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1150	1030	1060	N.D.	1600	1091	1099	1132
$(E/\rho)*100$	0,25	0,36	0,38	0,00	0,23	0,31	0,35	0,35

Observando a Tabela 12 o material com maior índice de rigidez específica é o material número 3, que corresponde à designação Isophthalic Polyester 90 da Tabela 11.

Como foi dito anteriormente um material compósito é o produto final que depende de uma junção harmoniosa de vários elementos diferentes, da mesma maneira as propriedades mecânicas desse material compósito dependem das propriedades mecânicas dos materiais constituintes. Uma lâmina de compósito que se baseie na junção de fibras com uma matriz dá origem a um material cujas propriedades mecânicas não são isotrópicas, isto é, as propriedades mecânicas não são iguais em todas as direções, a este fenómeno dá-se o nome de ortotropia ou material ortotrópico. Visto que um laminado é um conjunto de lâminas, as propriedades mecânicas desse mesmo laminado também vão ser ortotrópicas.

Para se poder iniciar o dimensionamento de uma peça é necessário conhecer as propriedades do material compósito, e para isso, o conhecimento das propriedades mecânicas da lâmina mais básica é um processo que tem obrigatoriamente de se realizar. No cálculo das propriedades mecânicas da lâmina, quanto mais próximo possível do real são os seus valores, menor é a probabilidade de incorrer em sub ou sobredimensionamentos não intencionais.

Considere-se a lâmina básica, de fibras unidireccionais ligadas por uma matriz, representada na Figura 9.

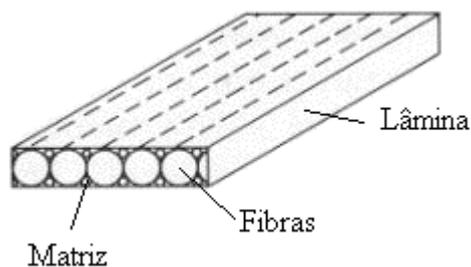


Figura 9 – Lâmina básica constituída por fibras longitudinalmente dispostas e ligadas por uma matriz. Editada de (Dandy, 2007).

Assumindo que a lâmina oferece resistência a tensões no plano, que todos os constituintes têm comportamento linear elástico até à fratura e que a lâmina é transversalmente isotrópica no plano 2-3, Chamis, (Chamis, 1983), afirma serem necessárias cinco constantes elásticas independentes para descrever as propriedades mecânicas segundo as direções principais de uma lâmina constituída por uma matriz e um reforço. As equações que descrevem essas propriedades em função dessas cinco constantes estão expostas a seguir:

$$E_{g11} = k_f E_{f11} + k_m E_m, \quad (1)$$

em que  $E_{g11}$  representa o módulo de elasticidade longitudinal do material na direção 1,  $k_f$  e  $k_m$  representam a percentagem volúmica da fibra e da matriz, e  $E_{f11}$  e  $E_m$  representam o módulo de elasticidade longitudinal na direção 1 da fibra e da matriz respetivamente.

Os módulos de elasticidade longitudinal do material segundo a direção 2 e 3,  $E_{g22} = E_{g33}$ , são dados pela expressão:

$$E_{g22} = \frac{E_m}{1 - \sqrt{k_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_{f22}}\right)} = E_{g33}, \quad (2)$$

onde  $E_{f22}$  representa o módulo de elasticidade longitudinal da fibra segundo a direção 2.

O módulo de elasticidade transversal do material no plano 12 e 13,  $G_{g12} = G_{g13}$ , é dado pela equação:

$$G_{g12} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{k_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{f12}}\right)} = G_{g13}, \quad (3)$$

em que  $G_{f12}$  e  $G_m$  representam o módulo de elasticidade transversal nos planos 12 e 13 da fibra e da matriz respetivamente.

O módulo de elasticidade transversal do material no plano principal 23,  $G_{g23}$ , é dado pela equação:

$$G_{g23} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{k_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{f23}}\right)}, \quad (4)$$

onde  $G_{f23}$  representa o módulo de elasticidade transversal da fibra no plano principal 23.

Os coeficientes de Poisson no plano 12 e 13,  $\nu_{g12} = \nu_{g13}$ , do material são dados pela equação:

$$\nu_{g12} = k_f \nu_{f12} + k_m \nu_m = \nu_{g13}, \quad (5)$$

em que  $\nu_{f12}$  e  $\nu_m$  são os coeficientes de Poisson no plano 12 e 13 da fibra e da matriz respetivamente.

O coeficiente de Poisson no plano 23,  $\nu_{g23}$ , do material é dado pela equação:

$$\nu_{g23} = \frac{E_{g22}}{2G_{g23}} - 1 \quad (6)$$

A massa volúmica,  $\rho_g$ , do material é dada pela equação:

$$\rho_g = k_f \rho_f + k_m \rho_m, \quad (7)$$

onde  $\rho_f$  e  $\rho_m$  correspondem às massas volúmicas da fibra e resina respetivamente.

Gibson, (Gibson, 1994) identifica quatro formulações para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal segundo a direção 2 e 3. A primeira formulação tem o nome de regra das misturas inversa e tem a equação:

$$E_2 = \frac{E_m}{1 - \nu_f \left(1 - \frac{E_m}{E_{f2}}\right)} = E_3, \quad (8)$$

onde  $E_{f2}$  representa o módulo de elasticidade longitudinal segundo a direção 2 da fibra,  $E_{f22}$  da equação (2) e  $\nu_f$  representa a percentagem volúmica da fibra,  $k_f$  da equação 1.

A segunda formulação pode-se apelidar de método das sub-regiões simplificada e é dada pela seguinte equação:

$$E_2 = \frac{E_m}{1 - \sqrt{\nu_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_{f2}}\right)} = E_3 \quad (9)$$

Esta equação devolve exatamente o mesmo valor que a equação (2).

A terceira formulação tem o nome de método das sub-regiões cuja equação se encontra em baixo.

$$E_2 = E_m \left[ \left(1 - \sqrt{\nu_f}\right) + \frac{\sqrt{\nu_f}}{1 - \sqrt{\nu_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_{f2}}\right)} \right] = E_3 \quad (10)$$

A quarta formulação, e última, tem o nome de método de Spencer e tem a seguinte forma:

$$\frac{M_c}{M_m} = \frac{\Gamma-1}{\Gamma} + \frac{1}{k} \left[ -\frac{\pi}{2} + \frac{2\Gamma}{\sqrt{\Gamma^2-k^2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\Gamma+k}{\Gamma-k}} \right] = E_3, \quad (11)$$

onde  $\Gamma$  é um índice de compacidade das fibras, valor que pode ser aproximado pela seguinte equação:

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{(1.1v_f^2 - 2.1v_f + 2.2)v_f}} \quad (12)$$

Para o módulo de elasticidade transversal:

$$M_c = E_2; M_m = E_m; k = 1 - \frac{E_m}{E_{f2}} \quad (13)$$

Para o módulo de elasticidade longitudinal no plano:

$$M_c = G_{12}; M_m = G_m; k = 1 - \frac{G_m}{G_{f12}} \quad (14)$$

Visto não ser possível conhecer, previamente, as propriedades de uma fibra nas direções 2 e 3 e o material da matriz ser tipicamente isotrópico, para efeitos de cálculo consideram-se todas as formulações anteriores e as seguintes simplificações.

$$E_m = E_{m1} = E_{m2} = E_{m3} \quad (15)$$

$$G_m = G_{m12} = G_{m13} = G_{m23} \quad (16)$$

$$E_f = E_{f1} = E_{f2} = E_{f3} \quad (17)$$

Para o cálculo do valor da tensão de cedência do compósito, Gibson, (Gibson, 1994) identifica duas situações de falha diferentes. Uma das situações ocorre quando a fibra falha devido à deformação específica da fibra ser menor que a da matriz. A outra situação ocorre quando a matriz falha devido à deformação específica da fibra ser maior que a da matriz. A Tabela 13 apresenta os valores das propriedades mecânicas da fibra GRANOC - YS-95A e da matriz Isophthalic Polyester 90 escolhidas para constituir o material compósito a utilizar durante o projeto.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas da fibra e matriz escolhida para o compósito.

	GRANOC - YS-95A	Isophthalic Polyester 90
$E_1$ [GPa]	920	4,07
$E_2$ [GPa]	920	4,07
$E_3$ [GPa]	920	4,07
$G_{12}$ [GPa]	383,33	1,51
$G_{13}$ [GPa]	383,33	1,51
$G_{23}$ [GPa]	383,33	1,51
$\nu_{12}$	0,2	0,35
$\nu_{13}$	0,2	0,35
$\nu_{23}$	0,2	0,35
$\sigma_c$ [MPa]	3530	64,12
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2190	1060
$\epsilon_{max}$ [%]	0,3	2,4

Os fornecedores da fibra e da matriz não disponibilizaram informação sobre os valores do módulo de elasticidade transversal e do coeficiente de Poisson. Assim os valores de coeficiente de Poisson apresentados na Tabela 13 são os valores típicos para fibras e matrizes de elevado módulo de elasticidade (Gibson, 1994). Os valores de  $G_{12}$ ,  $G_{13}$  e  $G_{23}$  para a fibra e a resina foram calculados posteriormente, numa folha de cálculo programada em Excel. Consultando os dados da Tabela 13 constata-se que a deformação máxima da matriz é maior do que a da fibra, logo encontramos numa situação em que se existir falha, a fibra é o primeiro elemento a falhar, o que é ideal, pois neste caso a tensão de cedência do compósito é maioritariamente ditada pela tensão de cedência da fibra.

Gibson, (Gibson, 1994) identifica um conjunto de equações que nos permitem calcular a tensão de cedência a tração de uma lâmina de compósito, no sentido longitudinal e transversal, numa situação em que  $\epsilon_m > \epsilon_f$ .

A tensão de cedência a tração no sentido longitudinal é dada pela seguinte equação:

$$S_L^{(+)} = S_{f1}^{(+)}\nu_f + S_{mf1}\nu_m, \quad (18)$$

onde  $S_{f1}^{(+)}$  corresponde à tensão de cedência da fibra e  $S_{mf1}$  é dado por:

$$S_{mf1} = E_m\epsilon_{f1}, \quad (19)$$

em que  $\epsilon_{f1}$  corresponde à deformação específica máxima da fibra.

A tensão de cedência a tração no sentido transversal é dada pela seguinte equação:

$$S_T^{(+)} = \frac{E_2 S_m^{(+)}}{E_m F}, \quad (21)$$

em que:

$$F = \frac{1}{\frac{d}{s} \left[ \frac{E_m}{E_f} - 1 \right] + 1}, \quad (22)$$

e onde:

$$s = \sqrt{\frac{\pi}{4v_f}} d \equiv \frac{d}{s} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi}{4v_f}}} \quad (23)$$

Recorrendo às equações anteriores calcularam-se os valores das propriedades mecânicas de uma lâmina unidirecional de compósito com um volume de fibra de 60 %. Esses valores foram calculados com uma aplicação programada em Excel e encontram-se expostos na Tabela 14.

**Tabela 14 – Propriedades mecânicas do compósito resultante dos materiais da Tabela 13.**

$v_f = 60\%$	Regra misturas inversa	Sub-Regiões simplificada	Sub-Regiões	Spencer
$E_1$ [GPa]	553,63	553,63	553,63	553,63
$E_2$ [GPa]	10,11	17,79	14,69	18,09
$E_3$ [GPa]	10,11	17,79	14,69	18,09
$G_{12}$ [GPa]	6,60	6,60	6,60	6,60
$G_{13}$ [GPa]	6,60	6,60	6,60	6,60
$G_{23}$ [GPa]	6,60	6,60	6,60	6,60
$\nu_{12}$	0,26	0,26	0,26	0,26
$\nu_{13}$	0,26	0,26	0,26	0,26
$\nu_{23}$	-0,23	0,35	0,11	0,37
$S_L^{(+)}$ [MPa]	2122,88	2122,88	2122,88	2122,88
$S_T^{(+)}$ [MPa]	20,67	36,38	30,06	37,01
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1738,00	1738,00	1738,00	1738,00
$\Gamma$	-----	-----	-----	1,12
$k$	-----	-----	-----	1,00
$F$	7,70	7,70	7,70	7,70

Os valores obtidos na Tabela 14 referem-se a uma lâmina unidirecional de fibra/matriz. Porém, como para este projeto se utilizará um tecido de fibras de carbono, as

propriedades mecânicas da lâmina de tecido/matriz são aproximadas pela junção de duas lâminas unidirecionais de fibra/matriz fazendo um ângulo de 90° ente si. As propriedades mecânicas dessa lâmina de tecido/matriz encontram-se na Tabela 15.

**Tabela 15 - Propriedades mecânicas de uma lâmina de tecido/matriz**

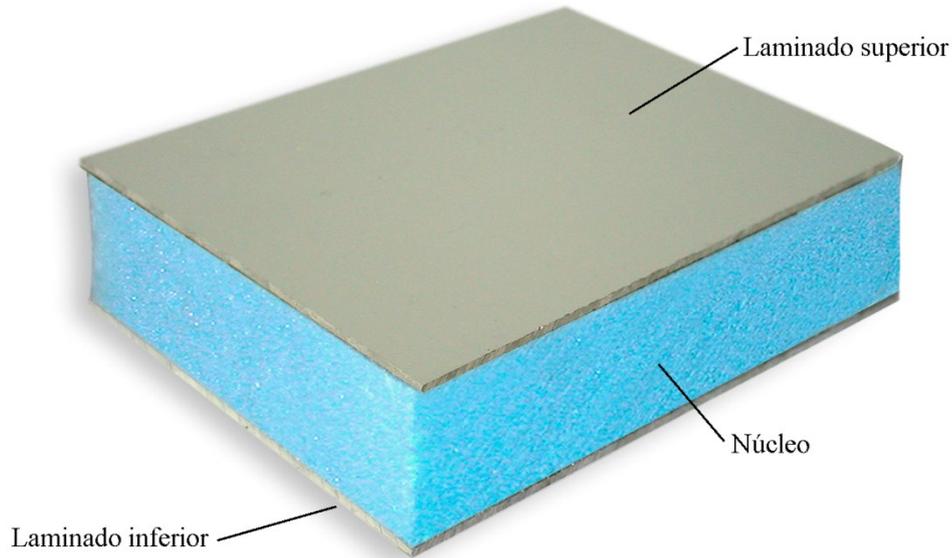
$E_1$ [GPa]	285,86
$E_2$ [GPa]	285,86
$E_3$ [GPa]	18,09
$G_{12}$ [GPa]	6,60
$G_{13}$ [GPa]	6,60
$G_{23}$ [GPa]	6,60
$\nu_{12}$	0,26
$\nu_{13}$	0,26
$\nu_{23}$	0,37
$S_L^{(+)}$ [MPa]	1930,44
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1738,00

Como foi dito anteriormente, lâminas de compósito servem melhor o seu propósito quando solicitadas somente por cargas de tração/compressão, uma lâmina não resiste eficientemente a esforços de flexão. Com o propósito de colmatar esse defeito é necessário definir um método de construção no qual esforços de flexão são transformados em esforços de tração/compressão.

Recorrendo a conhecimentos de resistência dos materiais e analisando o caso de uma viga horizontal bi-apoiada, carregada verticalmente a meio vão, os esforços de flexão geram esforços de tração/compressão que são maioritariamente resistidos pelas superfícies superior e inferior, e o deslocamento a meio vão diminui com o aumento do momento de inércia da secção dessa viga. Conclui-se então que é benéfico aumentar o momento de inércia da secção de um laminado, não esquecendo que o objetivo principal desta dissertação é baixar o valor da massa de um veículo. Dito isto, pretende-se aumentar o momento de inércia da secção do laminado com o mínimo incremento de massa, procurando o menor valor de deformação sem nunca ultrapassar os valores limites de tensão de cedência tração/compressão.

Os objetivos acima descritos encaixam perfeitamente com o método de construção em *sandwich*. O método de construção em *sandwich*, como se encontra

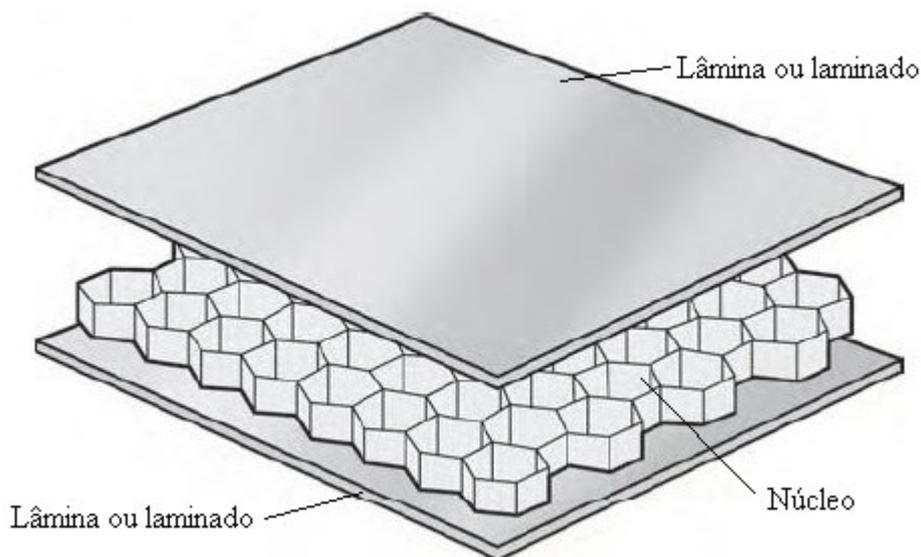
representado na Figura 10, tem como objetivo a criação de uma distância entre a superfície de dois laminados, com vista a aumentar o momento de inércia da secção do material.



**Figura 10 – Modelo representativo de uma amostra de material em *sandwich*. Editado de (Industry).**

Essa distância é criada com a introdução de um núcleo entre esses dois laminados, que irá impedir a superfície que se encontra à compressão de flambar e garantir que a superfície que se encontra a tração mantenha a sua distância da linha média. Um núcleo que cumpra as características mencionadas deverá ter boas propriedades mecânicas à compressão e boa adaptabilidade à geometria do molde.

Após uma pesquisa sobre núcleos a utilizar na constituição de um compósito, concluiu-se que atualmente, para aplicações aeronáuticas, náuticas e competições automóveis, é utilizado um núcleo de geometria hexagonal, muito semelhante aos ninhos de abelha devido às suas ótimas propriedades mecânicas à compressão e à sua extra baixa massa volúmica. Na Figura 11 está exposta uma representação de um compósito cujo núcleo possui uma geometria hexagonal semelhante aos ninhos de abelhas.



**Figura 11 – Representação de uma amostra de compósito com núcleo hexagonal. Editado de (NauticExpo).**

Deu-se então início a uma pesquisa de núcleos, semelhantes ao da Figura 11, para utilização em compósitos. Essa pesquisa teve em conta as características previamente mencionadas que levaram à escolha do núcleo descrito na Tabela 16, cujas propriedades mecânicas se encontram na Tabela 17.

**Tabela 16 – Núcleo em ninho de abelha escolhido para constituir o compósito.**

<b>Fabricante</b>	HexWeb™ Honeycomb
<b>Produto</b>	5052 Alloy Aluminium Flex-Core
<b>Designação</b>	Liga/Nº células abertas ao longo de 305 mm na direção W - Espessura da folha em $\mu\text{m}$
<b>Exemplo</b>	5052/F40 - 33

Tabela 17 – Propriedades mecânicas do núcleo da Tabela 16.

Designação do núcleo	Propriedades mecânicas						
	Compressão			Corte			
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E$ [GPa]	Direção L		Direção W	
				$\sigma_{cL}$ [MPa]	$G_L$ [GPa]	$\sigma_{cW}$ [MPa]	$G_W$ [GPa]
5052/F40 - 33	33,64	1,55	0,45	0,62	0,12	0,34	0,07
5052/F40 - 41	40,05	1,97	0,62	0,83	0,17	0,48	0,08
5052/F40 - 48	49,66	2,62	0,86	1,14	0,22	0,66	0,09
5052/F40 - 64	65,68	3,86	1,28	1,79	0,31	1,14	0,12
5052/F40 - 94	91,31	7,24	2,00	2,96	0,47	1,79	0,16
5052/F80 - 33	68,88	4,48	1,34	2,07	0,31	1,31	0,14
5052/F80 - 48	104,12	8,62	2,14	3,45	0,50	2,14	0,17
5052/F80 - 64	128,15	12,07	2,76	4,45	0,68	3,03	0,21

Informação retirada do catálogo da HexWeb™ Honeycomb e convertida para SI.

## 4. FASE DE TESTES

Após estar estabelecido o conhecimento sobre os materiais a utilizar, deu-se início a uma fase de testes com o objetivo de entrar em contacto com o programa de simulação de elementos finitos. Para a análise e estudo de componentes mecânicos construídos em matérias compósitas escolheu-se o programa de elementos finitos ADINA.

Esta fase de testes consistiu na realização de problemas, de solução previamente conhecida, através do programa ADINA, para a verificação de conhecimentos sólidos de utilização do programa, com vista a garantir um grau elevado de confiança nos resultados obtidos em posteriores estudos.

### 4.1. Teste 1 – Placa quadrada simplesmente apoiada sob pressão uniforme

O primeiro teste consistiu na realização do problema A27 do manual de verificação incluído com o programa ADINA versão 8.8.0. Este teste analisa uma placa quadrada simplesmente apoiada sob pressão uniforme, utilizando elementos do tipo placa, como mostra a Figura 12.

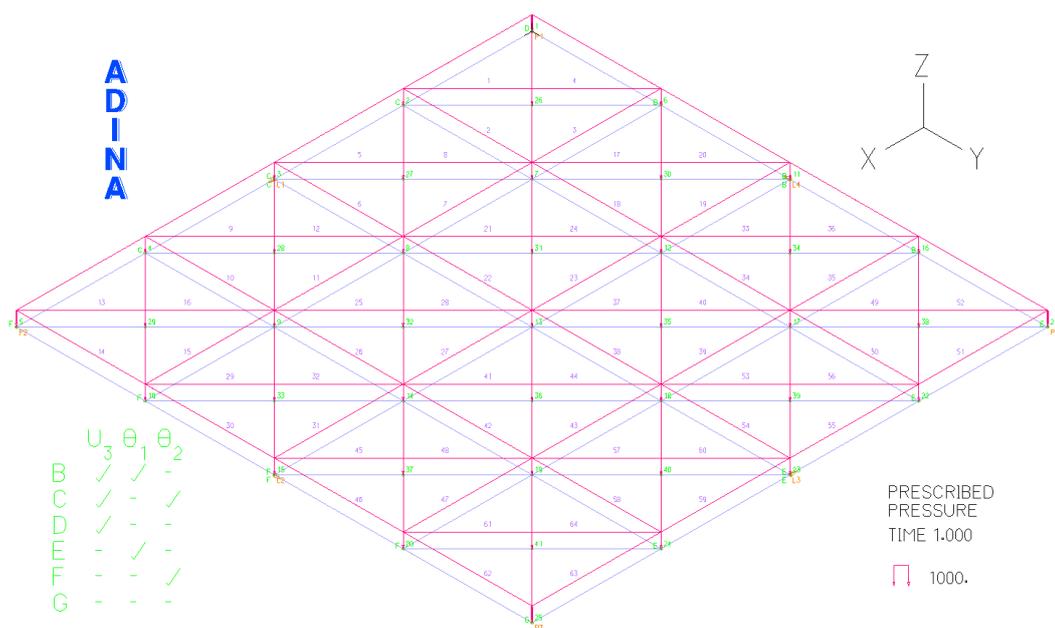


Figura 12 – Formulação em ADINA do problema A27.

Dada a dupla simetria da placa, apenas um quarto da mesma é necessária na simulação para uma correta análise. Começou-se por desenhar um quadrado de 0,4 por 0,4 m, atribui-se-lhe uma espessura de 0,008 m e definiu-se que a placa era constituída por um material isotrópico com um módulo de elasticidade  $E = 210$  GPa e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ . Definiu-se a pressão uniforme sobre a placa com o valor de 1 MPa e definiu-se que as duas arestas, correspondentes às arestas exteriores da placa total, são suportadas por apoios simples e as outras duas, que correspondem à zona interior da placa, são livres. Após a introdução dos dados acima referidos, correu-se a simulação obtendo-se o resultado da Figura 13.

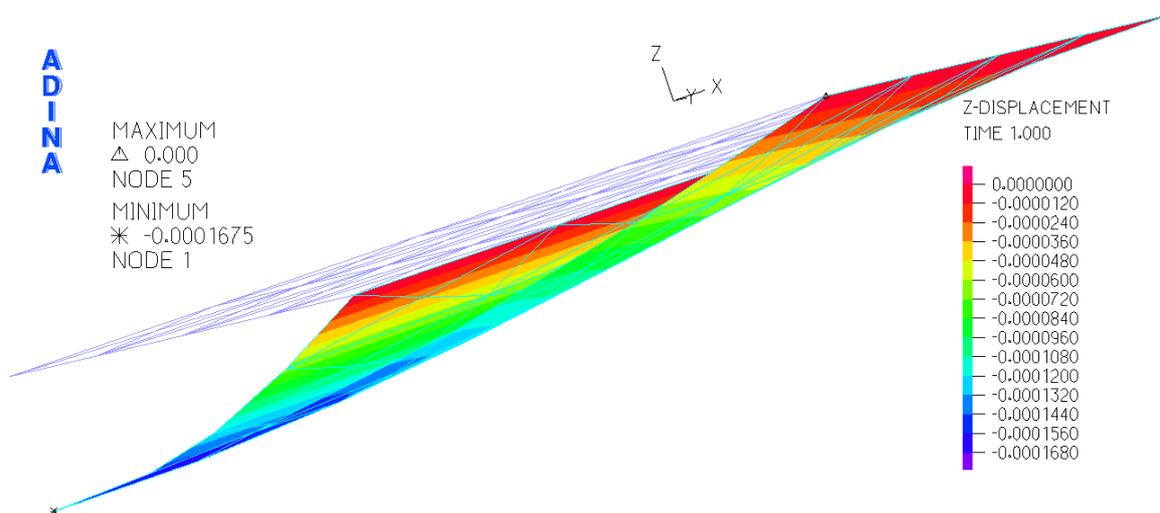


Figura 13 – Simulação em ADINA do problema A27.

Os resultados obtidos e os estimados estão resumidos na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados do teste 1 – A27.

Teste A27	Deslocamento máximo [m]
Resultado obtido	$0,0001680 = 1,680 \times 10^{-4}$
Resultado esperado ADINA	$1,675 \times 10^{-4}$
Resultado teórico estimado	$1,689 \times 10^{-4}$

Após a análise dos dados da tabela 16 pode-se considerar este teste bem-sucedido.

## 4.2. Teste 2 – Scordelis-Lo, problema padrão de um telhado cilíndrico

O segundo teste consistiu na realização do problema A30 do manual de verificação. Este teste analisa uma casca cilíndrica simplesmente apoiada em duas extremidades e livre nas duas arestas longitudinais, sob ação da gravidade. A Figura 14 representa o problema acima descrito.

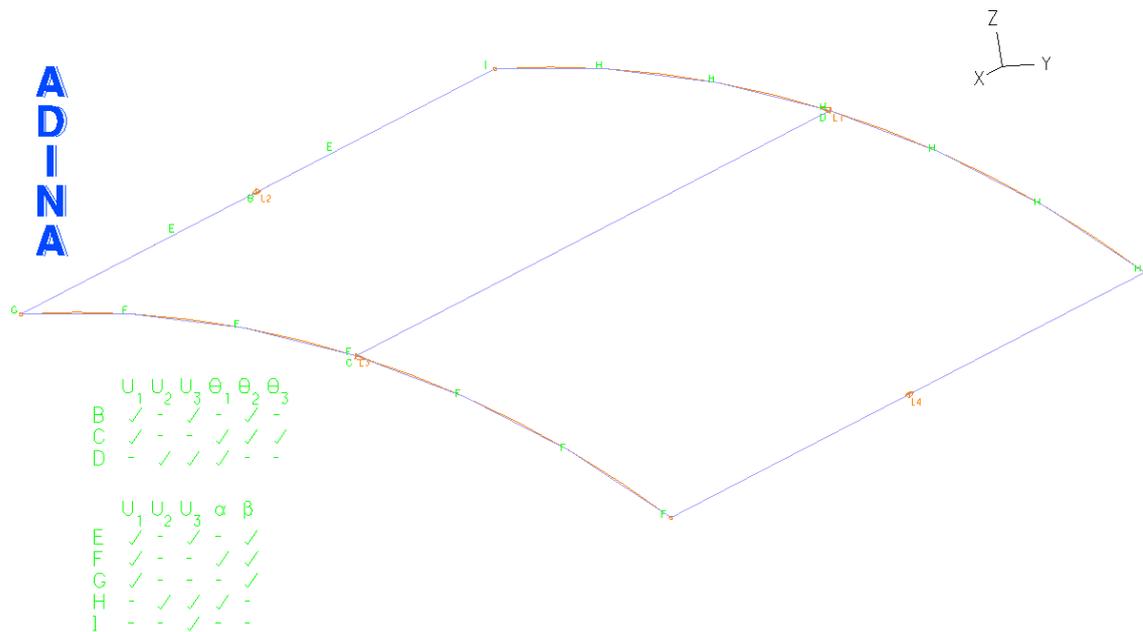


Figura 14 – Formulação em ADINA do problema A30.

Dada a dupla simetria da casca, apenas um quarto da mesma é necessária na simulação para uma correta análise. Começou-se por desenhar dois arcos, paralelos mas afastados 7,62 m, de raio 7,62 m percorrendo um ângulo de 40°, unindo por fim esses dois arcos com dois segmentos de reta. Atribuiu-se-lhe uma espessura de 76,2 mm e definiu-se que a placa era constituída por um material isotrópico com um módulo de elasticidade  $E = 20,68 \text{ GPa}$  e uma massa volúmica  $\rho = 5765,7 \text{ kg/m}^3$ . Definiu-se como carga a massa sob ação da gravidade e atribuíram-se as condições de fronteira que se podem consultar na Figura 15. Após a introdução dos dados acima referidos, correu-se a simulação obtendo-se o resultado da Figura 15.

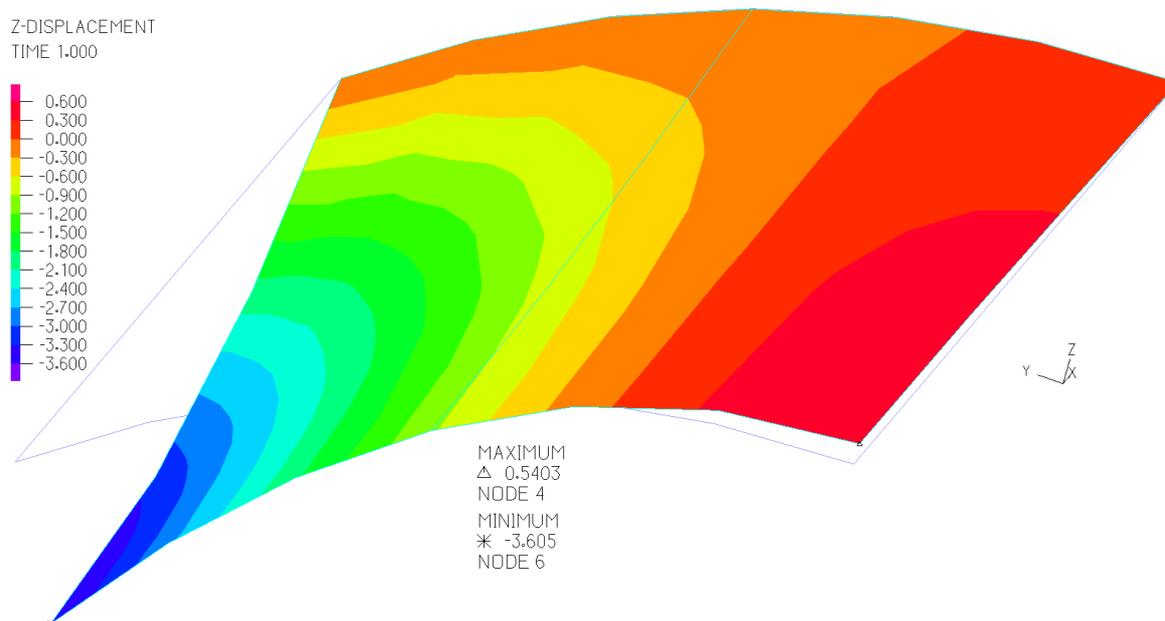


Figura 15 – Simulação em ADINA do problema A30.

O maior valor de deslocamento, neste caso negativo, que se pode ler na Figura 15 encontra-se em polegadas. A Tabela 19 mostra os valores, em metro, obtidos e esperados para este problema.

Tabela 19 – Resultados do teste 2 - A30

Teste A30	Deslocamento máximo [m]
Resultado obtido	$-91,57 \times 10^{-3}$
Resultado esperado ADINA	$-91,57 \times 10^{-3}$

Após a análise dos dados da Tabela 19 pode-se considerar este teste bem-sucedido.

### 4.3. Teste 3 – Casca cilíndrica trilhada

O terceiro teste consistiu na realização do problema A32 do manual de verificação. Este teste analisa uma casca fina cilíndrica simplesmente apoiada nas extremidades, sob ação de uma força concentrada perpendicular à superfície na zona de aplicação. A casca cilíndrica forma um tubo cilíndrico que dada a sua dupla simetria a simulação de um oitavo dessa casca é suficiente para uma correta caracterização da casca completa. A Figura 16 mostra esse oitavo de seção.

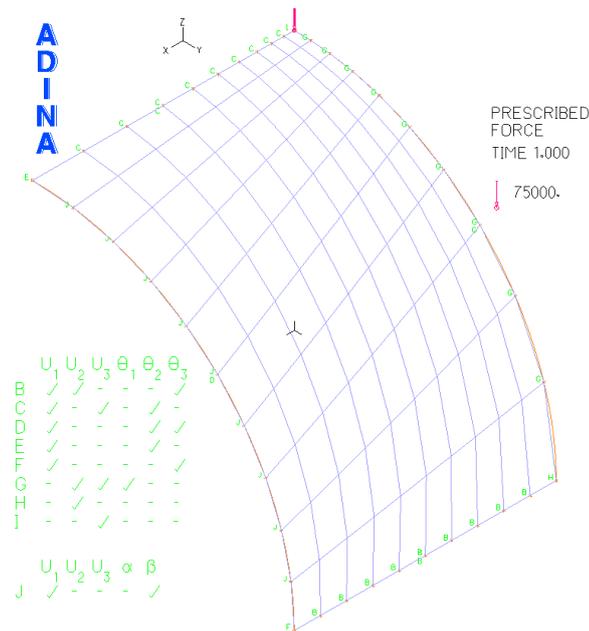


Figura 16 – Formulação em ADINA do problema A32.

Começou-se por desenhar dois arcos, paralelos mas afastados 2,54 m, de raio 2,54 m percorrendo um ângulo de 90°, unindo por fim esses dois arcos com dois segmentos de reta. Atribuiu-se-lhe espessura de 25,4 mm e definiu-se que a placa era constituída por um material isotrópico com um módulo de elasticidade  $E = 206,84$  GPa e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ . Definiu-se a carga concentrada com o valor de 75000 N. As condições de fronteira conseguem ser consultadas na Figura 16. Após a introdução dos dados acima referidos, correu-se a simulação obtendo-se o resultado que está representado na Figura 17.

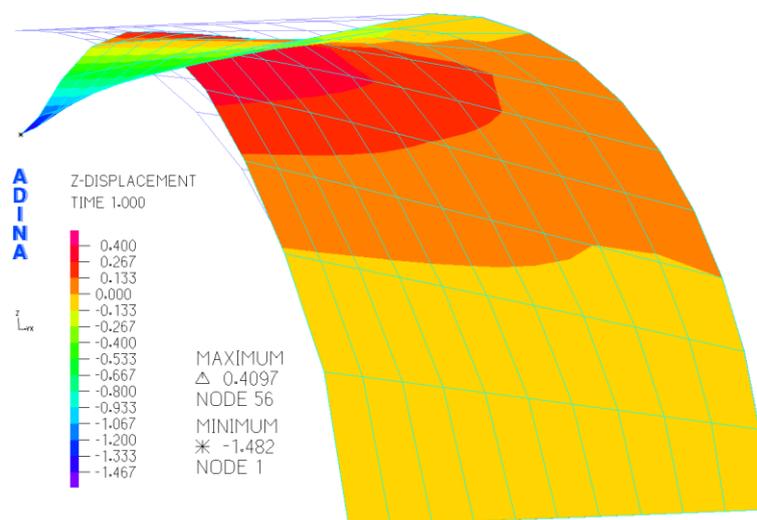


Figura 17 – Simulação em ADINA do problema A32.

Na Tabela 20 estão expostos os resultados obtidos na simulação e os resultados esperados.

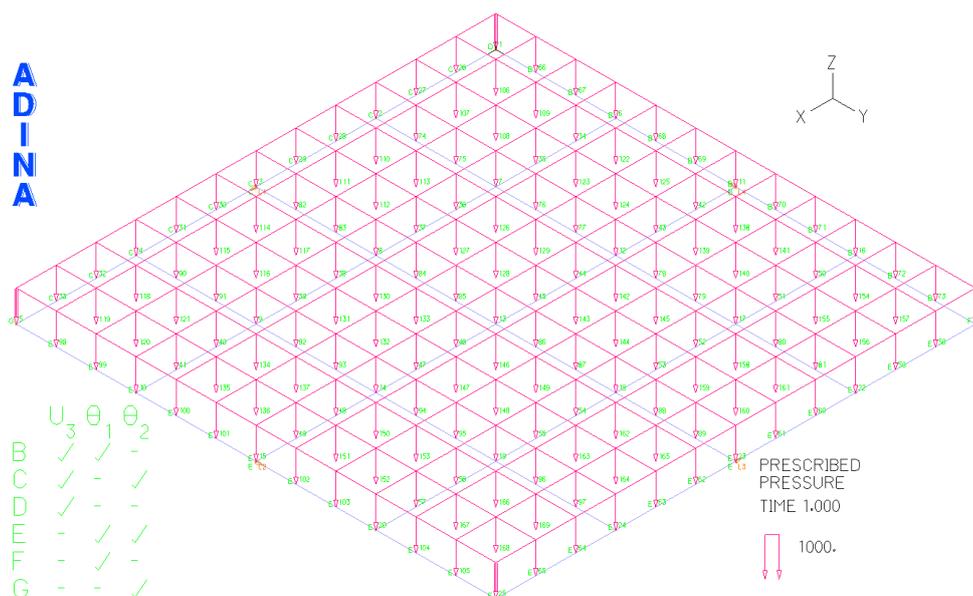
**Tabela 20 – Resultados do teste 3 - A32**

Teste A32	Deslocamento máximo [m]
Resultado obtido	$-37,64 \times 10^{-3}$
Resultado esperado ADINA	$-42,19 \times 10^{-3}$
Resultado teórico estimado	$-41,71 \times 10^{-3}$

Analisando os resultados da Tabela 20 verifica-se uma diferença de 10,78 % entre o resultado obtido e o esperado ADINA e uma diferença de 9,76 % entre o resultado obtido e o teórico. Dito isto considera-se este teste bem-sucedido.

#### 4.4. Teste 4 – Placa ortotrópica sob pressão uniforme

O quarto teste consistiu na realização do problema A39 do manual de verificação. Este teste analisa uma placa quadrada de material ortotrópico simplesmente apoiada nas extremidades, sob ação de uma pressão uniforme. Dada sua dupla simetria a simulação de um quarto da placa é suficiente para uma correta caracterização da placa total. A Figura 18 é a representação do quarto da placa acima mencionada.



**Figura 18 – Formulação em ADINA do problema A39.**

Desenhou-se um quadrado de 0,03 por 0,03 m e foi-lhe atribuída uma espessura de 0,015 m. Selecionou-se um material ortotrópico com as seguintes propriedades: módulos de elasticidade  $E_{xx} = 13,8$  GPa,  $E_{yy} = 1,15$  GPa,  $G_{xy} = 531$  MPa. Após a introdução dos dados acima referidos, correu-se a simulação obtendo-se o resultado da Figura 19.

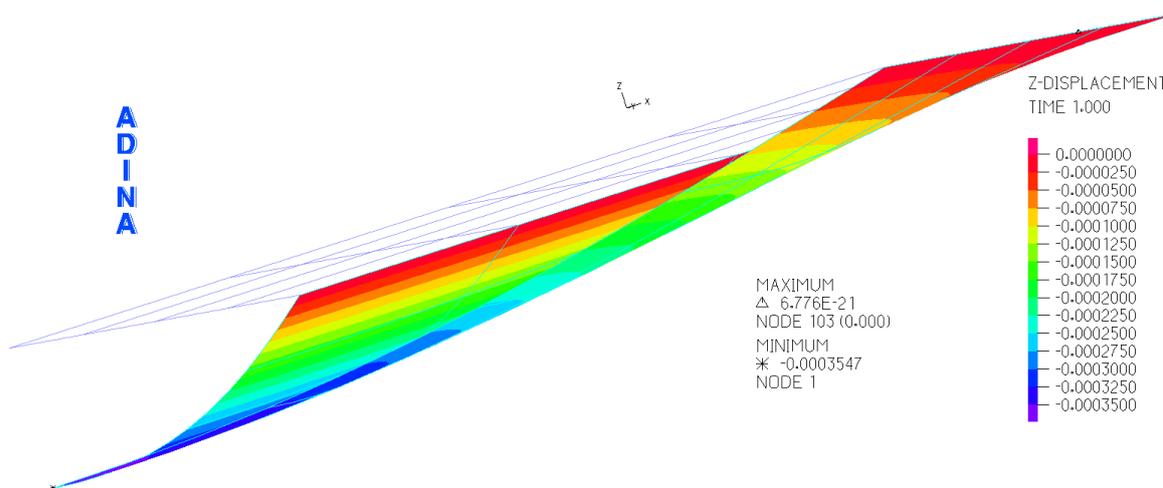


Figura 19 – Simulação em ADINA do problema A39.

Na Tabela 21 estão expostos os resultados do problema A32.

Tabela 21 – Resultados do teste 4 - A39.

Teste A39	Deslocamento máximo [m]
Resultado obtido	$-3,547 \times 10^{-4}$
Resultado esperado ADINA	$-3,593 \times 10^{-4}$
Resultado teórico estimado	$-3,543 \times 10^{-4}$

Após a análise dos dados da Tabela 21 pode-se considerar este teste bem-sucedido.

## 4.5. Teste 5 – Placa multicamadas simplesmente apoiada sob pressão uniforme

O quinto teste consistiu na realização do problema A113 do manual de verificação. Este teste analisa uma placa quadrada, constituída por três camadas de material ortotrópico, simplesmente apoiada nas extremidades, sob ação de uma pressão uniforme.

Dada a sua dupla simetria a simulação de um quarto da placa é suficiente para uma correta caracterização da placa total. A Figura 20 é a representação do quarto da placa previamente mencionada onde também se conseguem distinguir as três diferentes camadas de material.

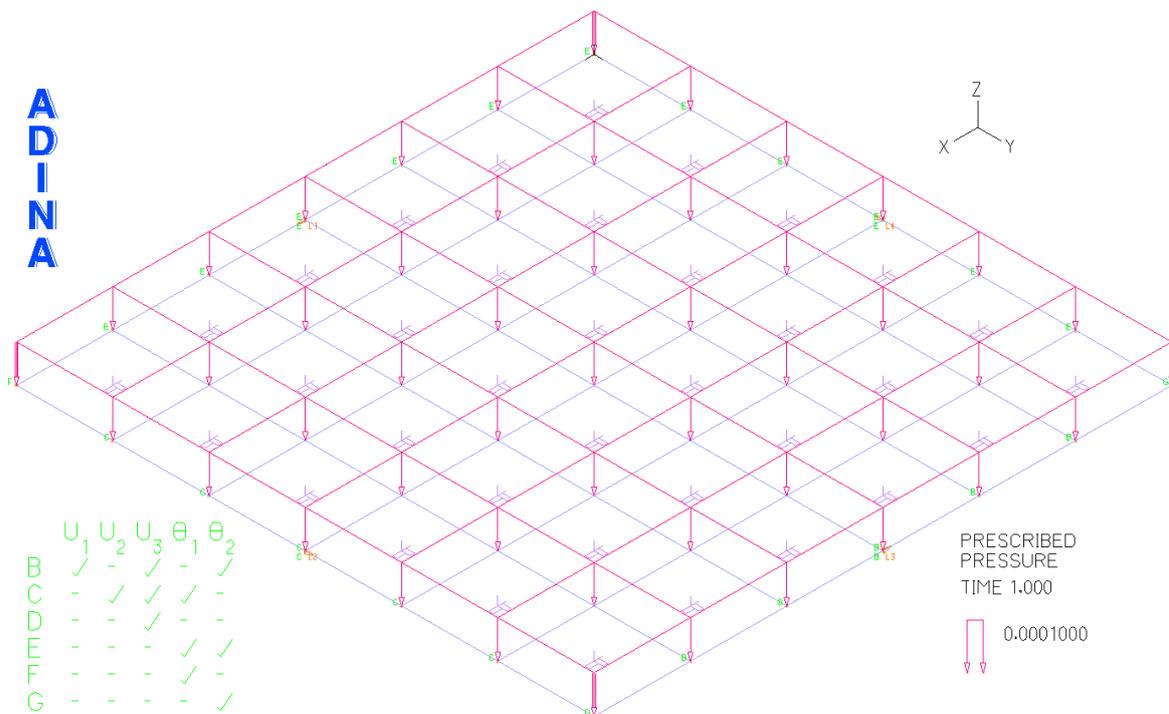


Figura 20 – Formulação em ADINA do problema A113.

Desenhou-se um quadrado de 10 por 10 m e foi-lhe atribuída uma espessura de 1 m. Selecionou-se um material ortotrópico com as seguintes propriedades: módulos de elasticidade  $E_{xx} = 25 \times 10^4$  MPa,  $E_{yy} = 1 \times 10^4$  MPa,  $E_{zz} = 1 \times 10^4$  MPa,  $G_{xy} = 0,5 \times 10^4$  MPa,  $G_{xz} = 0,5 \times 10^4$  MPa,  $G_{yz} = 0,2 \times 10^4$  MPa e coeficientes de Poisson  $\nu_{xy} = 0,01$ ,  $\nu_{xz} = 0,01$ ,  $\nu_{yz} = 0,25$ . Após a introdução do valor e aplicação da pressão uniforme, correu-se a simulação obtendo-se o resultado da Figura 21.

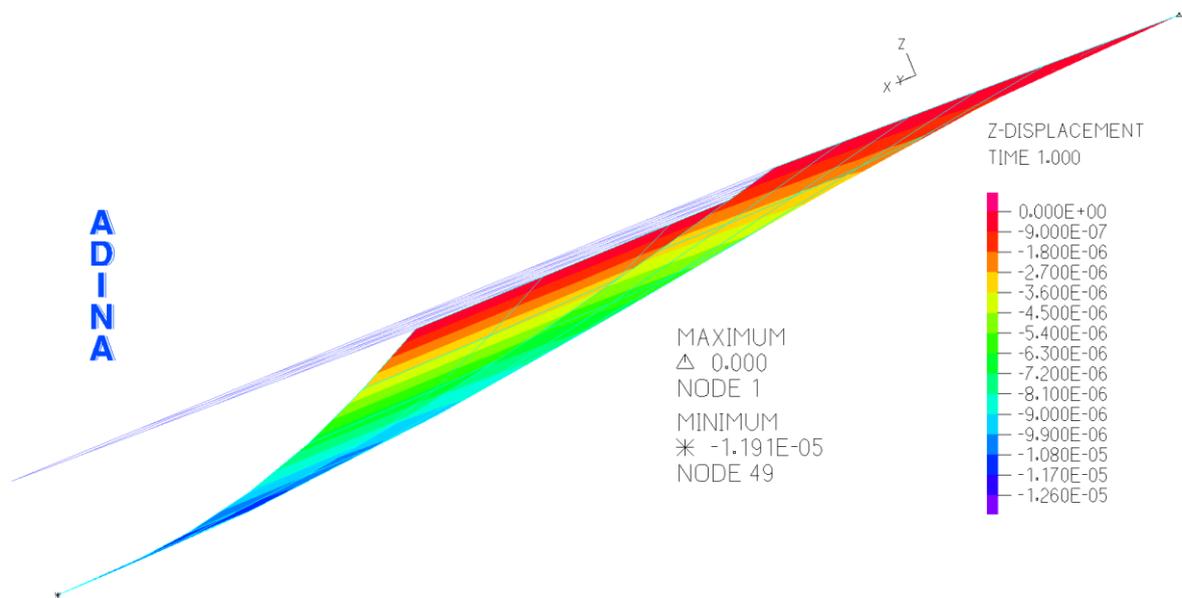


Figura 21 – Simulação em ADINA do problema A113.

Na Tabela 22 estão expostos os resultados do problema A113.

Tabela 22 – Resultados do teste 5 - A113.

Teste A113	Deslocamento máximo [m]
Resultado obtido	$-1,19 \times 10^{-5}$
Resultado esperado ADINA	$-1,28 \times 10^{-5}$
Resultado teórico estimado	$-1,27 \times 10^{-5}$

Após a análise dos dados da Tabela 22 pode-se considerar este teste bem-sucedido. Dá-se assim por concluída a fase de testes.

## 5. ESTUDO E PROJETO DO PROTÓTIPO EV03I

Para o estudo e projeto do novo protótipo EV03i foram usados dois programas de elementos finitos, o programa previamente referido ADINA 8.8.0 utilizado para análise de componentes em materiais compósitos ortotrópicos e o programa AUTODESK INVENTOR 2014 utilizado pela sua vertente de CAD para o desenvolvimento dos componentes necessários à realização desta dissertação e pela vertente de elementos finitos para a análise de componentes em materiais isotrópicos. Neste capítulo estará exposto o processo de criação e desenvolvimento dos componentes que fazem parte dos objetivos desta dissertação.

### 5.1. Sistema de direção

O sistema de direção é um conjunto de componentes com a função de conectar as duas rodas frontais de direção entre si e ao veículo, tentando manter a sua geometria o mais próximo do pretendido possível. A Figura 22 representa a montagem deste sistema de direção no veículo.

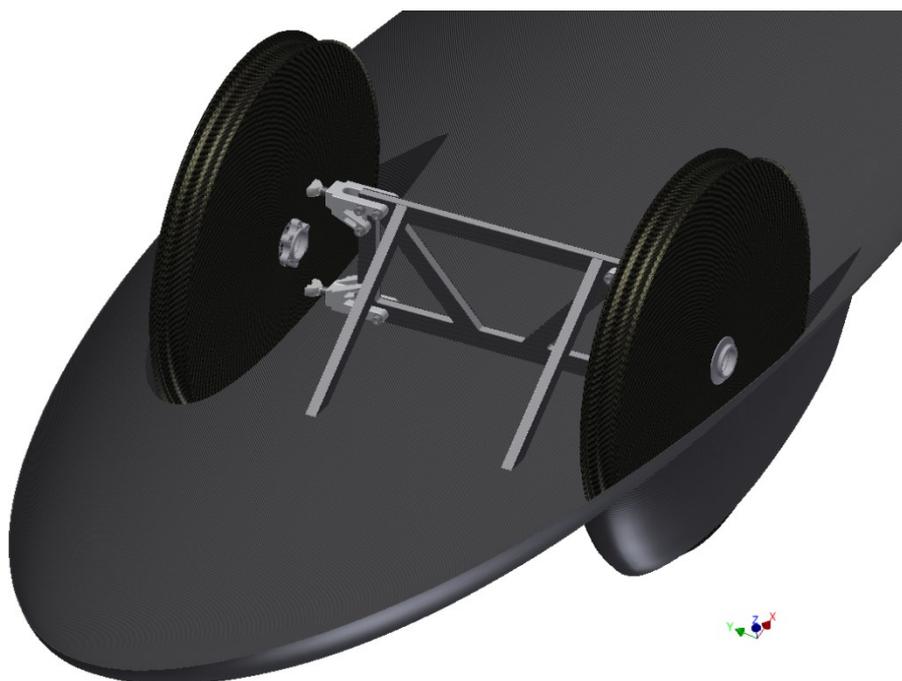


Figura 22 – Montagem sistema de direção.

### 5.1.1. Apoio

O apoio é o elemento que liga a placa vertical da direção à rótula que por sua vez liga à manga de eixo e posteriormente à roda. Assim o apoio terá de suportar os esforços referidos na subsecção 3.2 e os momentos criados pela aplicação desses esforços à rótula que se encontra a uma determinada distância do apoio. A Figura 23 esquematiza a montagem do conjunto rótula/apoio superior, pois este será o mais carregado durante o funcionamento normal em prova.

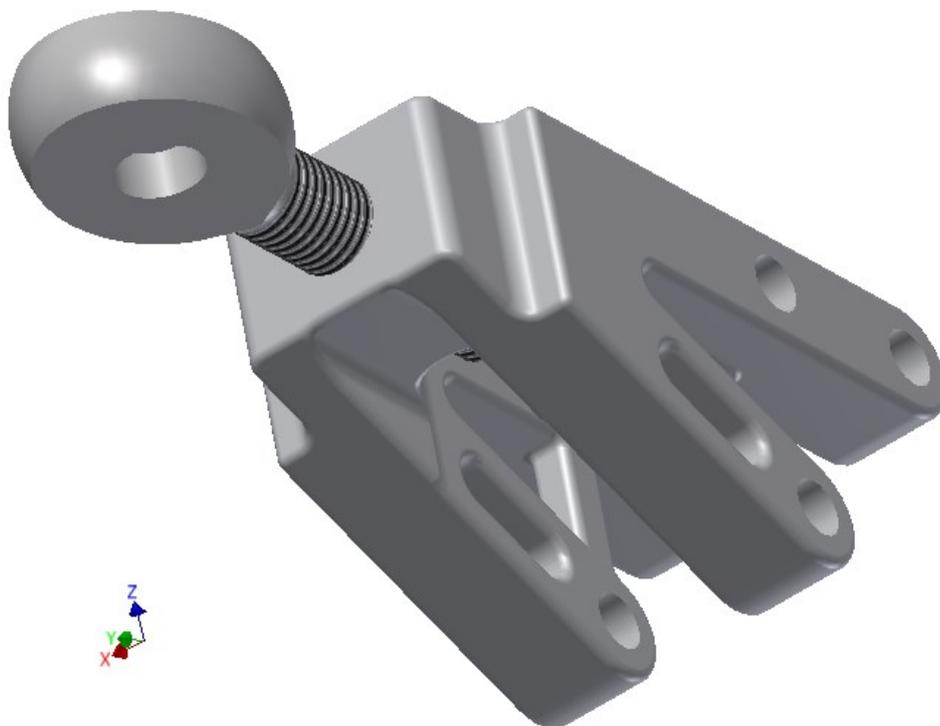


Figura 23 – Montagem do conjunto rótula/apoio superior em CAD.

Na Tabela 23 encontram-se todos os esforços que terão de ser aplicados ao apoio para realizar a simulação.

Tabela 23 – Momentos e forças a aplicar ao apoio.

	Momento em torno de [N·mm]	Força segundo [N]
X	$-2043,1191 \text{ N} \times 35 \text{ mm} \times 1,5$	$-330,6 \text{ N} \times 1,5$
Y	0	$-725,8073 \text{ N} \times 1,5$
Z	$330,6 \text{ N} \times 35 \text{ mm} \times 1,5$	$-2043,1191 \text{ N} \times 1,5$

Conhecidos os valores dos momentos e das forças a aplicar ao apoio, aplicaram-se as condições de fronteira. Na zona dos furos, onde três parafusos M6 irão fixar o apoio à placa da direção, foi colocada uma *pin constraint*, isto é, foi colocada uma restrição que permite que a peça rode em torno do eixo desses furos mas não permite deslocamentos na direção nem axial radial dos mesmos. Definiu-se que o apoio irá ser construído numa liga de alumínio 6061-T6 com as propriedades mecânicas listadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061-T6.

Designação	6061-T6
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2700
$\sigma_r$ [MPa]	310
$\sigma_c$ [MPa]	276
$E$ [GPa]	68,9
$\sigma_f$ [MPa]	96,5

Em que  $\sigma_f$  representa a tensão de fadiga deste material para  $5 \times 10^8$  ciclos. Estão agora reunidas todas as condições para correr a simulação de forma a saber se para esta combinação de geometria, esforços e material nos encontramos em situação de sub ou sobredimensionamento. A Figura 24 mostra a distribuição de tensões obtida durante a simulação.

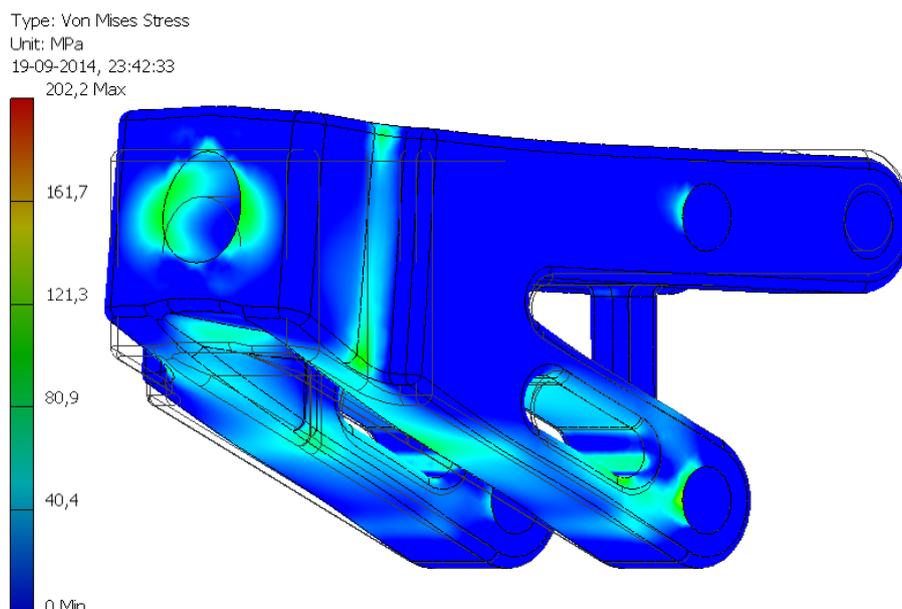
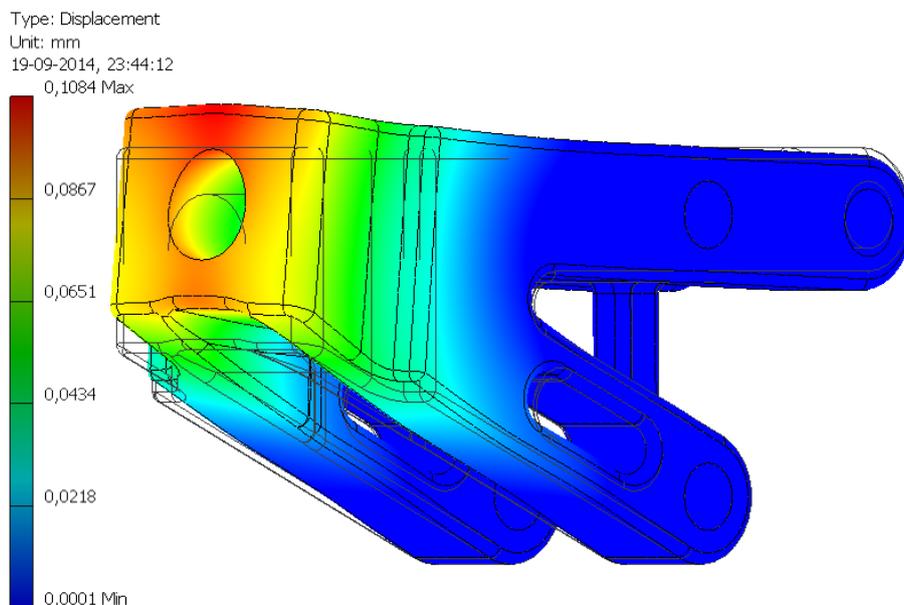


Figura 24 – Distribuição de tensões no apoio.

Verifica-se que o valor máximo de tensão na peça é de 202,2 MPa que é inferior à  $\sigma_c = 275$  MPa. Na Figura 25 consegue-se avaliar a distribuição de deslocamentos obtida na simulação.



Verifica-se que o valor máximo de deslocamento é de 0,1084 mm, o que é aceitável para a função da peça. Ao analisar a Figura 24 e Figura 25, verifica-se que a peça está bem dimensionada. Dada a diferença entre a tensão de cedência do material e a tensão efetiva na peça, obtém-se um coeficiente de segurança final de  $n = 1,5 \times \frac{275}{202,2} = 2,04$  e uma massa final de 0,081 kg.

### 5.1.2. Placa da direção

A placa da direção é a estrutura que liga os apoios ao veículo. É uma estrutura em *sandwich* colada à *monocoque* que desta forma fica impedida de se deslocar nos eixos XYZ. A rotação em torno de Y e Z terá de ser impedida pelos reforços também eles construídos em *sandwich*.

A Figura 26 mostra a placa da direção desenhada em Inventor, onde se distinguem duas lâminas de fibra de carbono e um núcleo. Para núcleo escolheu-se a estrutura em ninho de abelha, referida na tabela 14 da secção 3.3, 5056/F40 – 33.

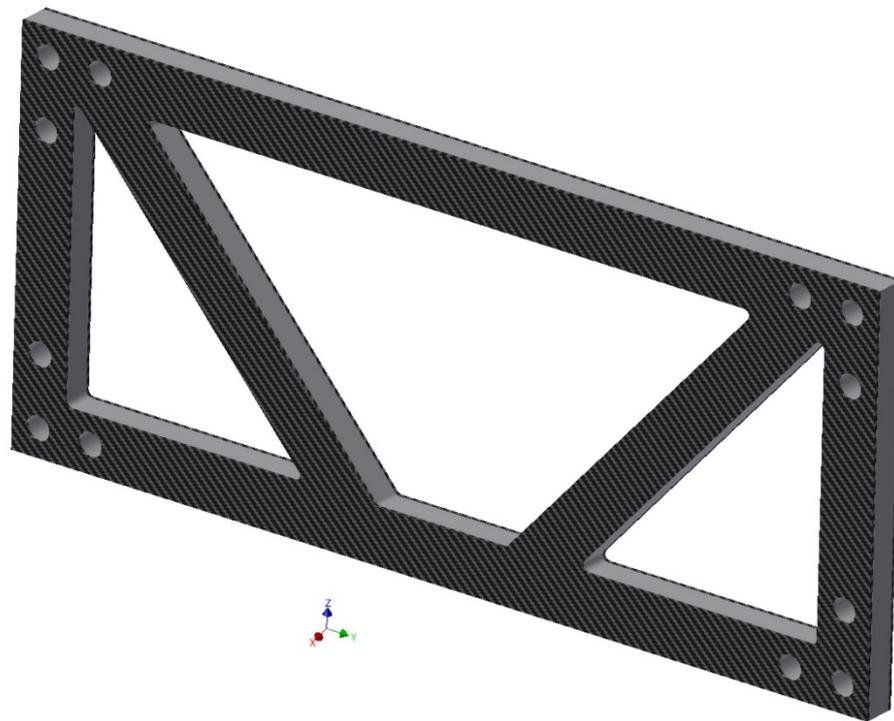


Figura 26 - Placa da direção desenhada em CAD.

Após importar a geometria da Figura 26 para o programa ADINA, procurou-se a superfície média dessa geometria. De seguida definiu-se que a peça era composta por 7 camadas diferentes de material, 3 camadas de tecido de fibra de carbono uma de núcleo e mais 3 de tecido de fibra de carbono. Para simular a geometria dos apoios e rótulas inseriram-se *rigid links* e fez-se o posterior carregamento dos pontos 1 e 2 com os esforços da tabela 4, rótula superior e inferior respetivamente. A Figura 27 mostra a configuração acima descrita.

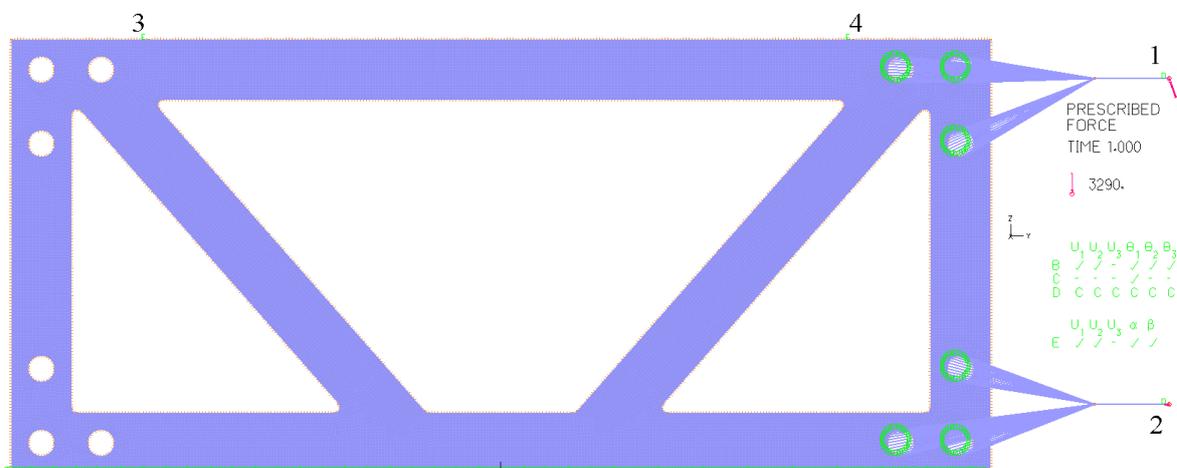


Figura 27 – Formulação em ADINA da placa da direção.

Introduziram-se as condições de fronteira de modo a que a base da placa não venha a sofrer deslocamentos em nenhuma direção. Nos pontos 3 e 4 foi definido que não existe nenhum deslocamento, simulando os reforços que serão adicionados à placa.

Introduziram-se as propriedades dos materiais e definiu-se que cada camada de tecido de carbono iria estar desfasada 45° da seguinte. Com estes dados introduzidos procedeu-se à simulação, cujo resultado está visível na Figura 28, Tabela 25 e Figura 29.

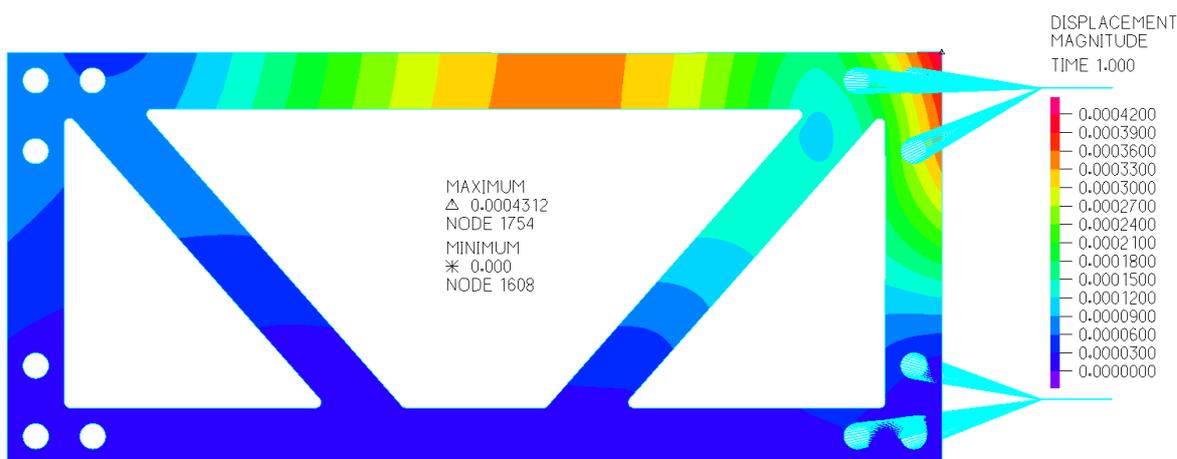


Figura 28 - Distribuição dos deslocamentos da placa da direção.

Consultando a Figura 28 consegue-se ver que o maior deslocamento tem o valor de 0,0004312 m ou 0,4312 mm. A Tabela 25 mostra a tensão máxima gerada em cada camada de material, podendo-se verificar que as camadas de fibra de carbono com maior tensão são as camadas 2 e 6, como mostra a Figura 29. Verifica-se também que na camada 4, que corresponde à camada de núcleo, o valor da tensão máxima ultrapassa o valor limite de 1,55 MPa.

Tabela 25 - Tensões máximas nas camadas constituintes da placa.

Camada número	Tensão máxima [MPa]
1	960,2
2	1035
3	960,4
4	4,1
5	983,5
6	1035
7	986,8

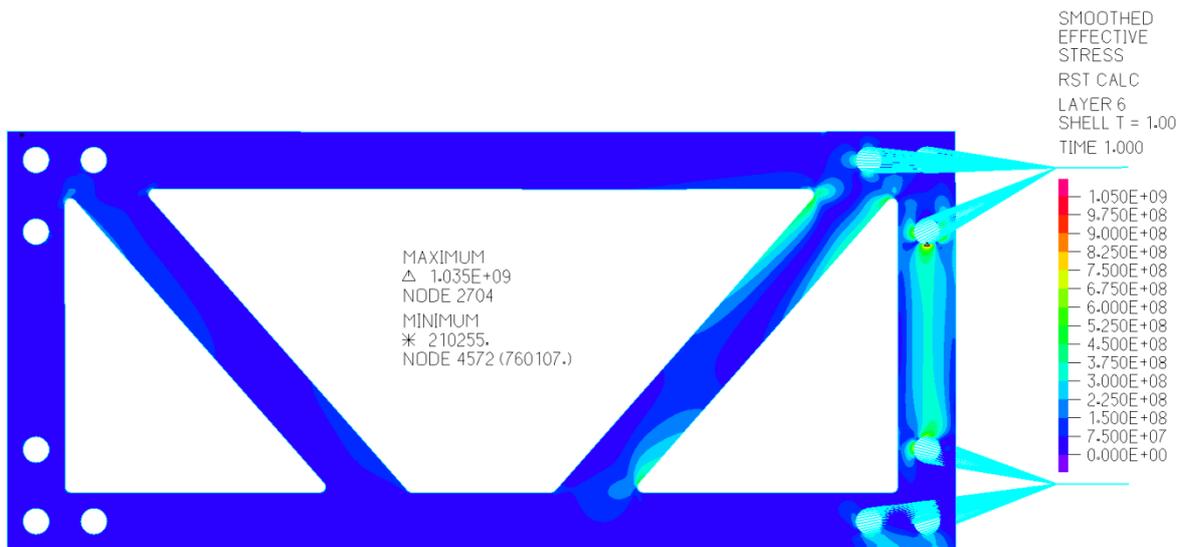


Figura 29 - Distribuição de tensões na placa da direção.

A Tabela 25 mostra que o maior valor de tensão é de 1035 MPa. Dada a diferença entre a tensão de cedência do material e a tensão efetiva na peça, obtém-se um coeficiente de segurança, nas camadas de carbono, de  $n = 1,5 \times \frac{1930}{1035} = 2,80$  e na camada de núcleo de  $n = 1,5 \times \frac{1,55}{4,5} = 0,52$  ou seja esta placa entra em falha devido a falha do núcleo.

Visto que as restrições colocadas no topo da placa não são tão precisas como a própria utilização dos reforços, manter-se-á a geometria para a próxima simulação.

### 5.1.3. Reforço da placa de direção

Para a análise dos reforços procedeu-se à simulação da estrutura esquematizada na Figura 30.



Figura 30 - Sistema de direção desenhado e montado em CAD.

O procedimento desta simulação adiciona à simulação 5.1.2 os reforços construídos também em *sandwich* com mesmo número, orientação e empilhamento de camadas que a placa da direção. As restrições que se vão adicionar nesta simulação ditam que a base dos reforços não pode ter deslocamento em nenhuma direção e que o topo dos mesmos reforços está fixo à placa. A formulação desta montagem pode ser consultada na Figura 31.

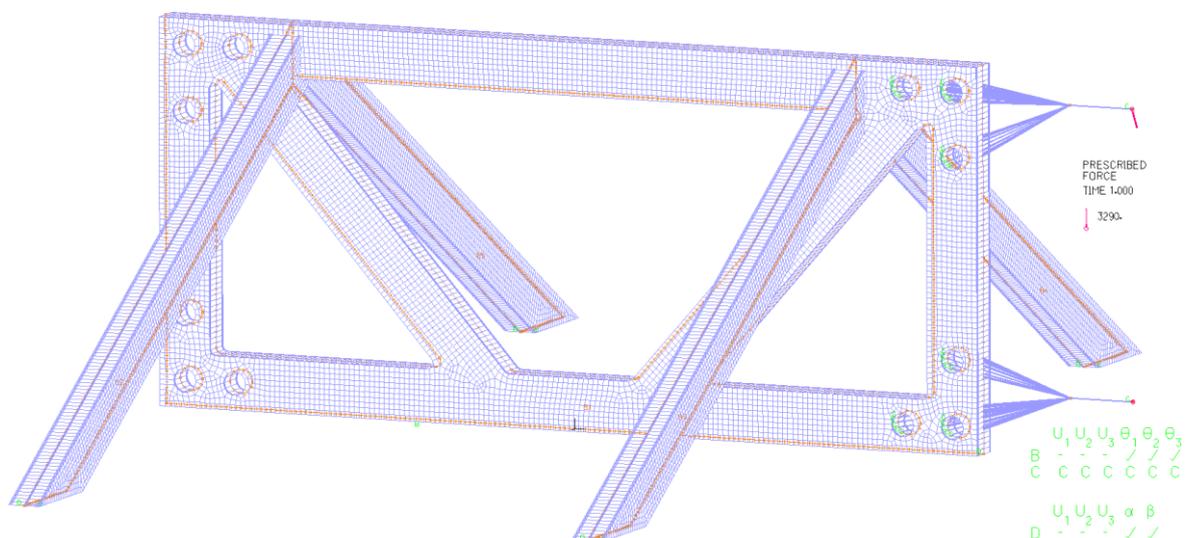
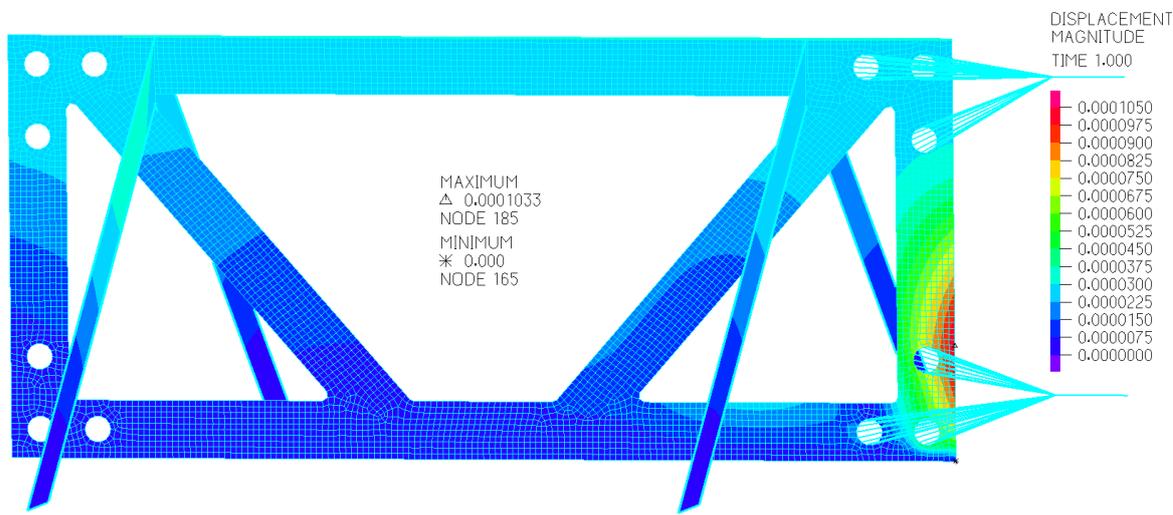


Figura 31 - Formulação em ADINA do conjunto placa/reforços.

Com os dados agora inseridos correu-se a simulação e os resultados obtidos estão expostos na Figura 32, Tabela 26 e Figura 33.



**Figura 32 - Distribuição dos deslocamentos no sistema de direção.**

Como se pode observar na Figura 32 o maior valor de deslocamento é de 0,0001033 m ou 0,1033 mm. A Tabela 26 mostra a tensão máxima gerada em cada camada de material podendo-se verificar que a camada de fibra de carbono com maior tensão é a camada 7 como mostra a Figura 33. Verifica-se também que na camada 4, que corresponde à camada de núcleo, o valor da tensão máxima é inferior ao do valor limite de 1,55 MPa.

**Tabela 26 - Tensões máximas nas camadas constituintes do conjunto placa/reforços.**

<b>Camada número</b>	<b>Tensão máxima [MPa]</b>
1	255,5
2	207,1
3	223,0
4	1,5
5	241,1
6	241,2
7	273,6

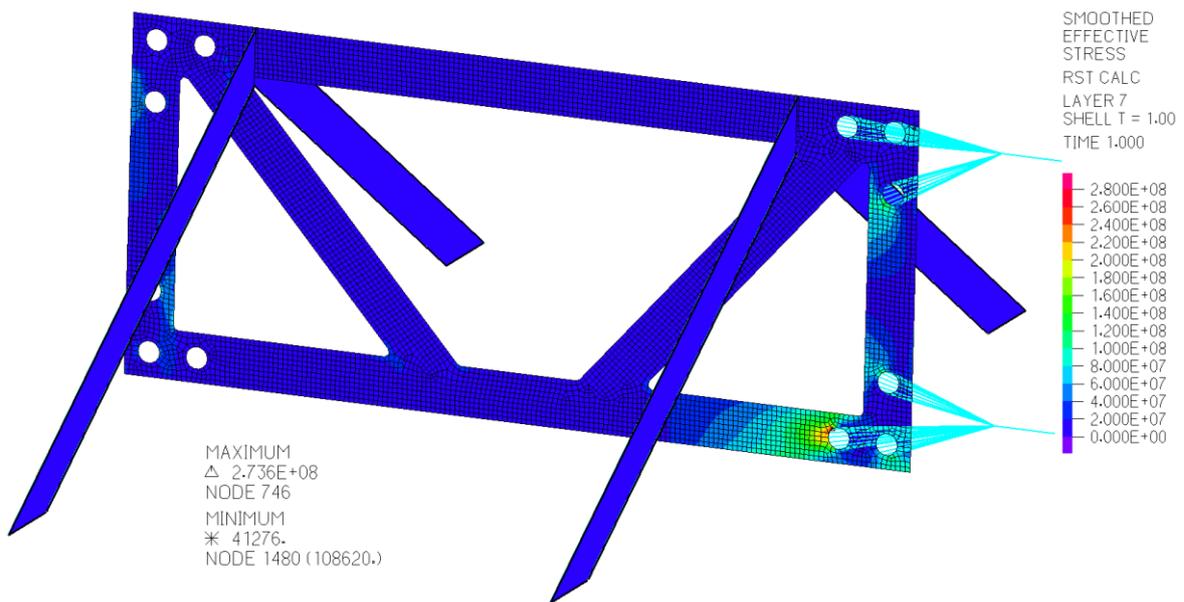
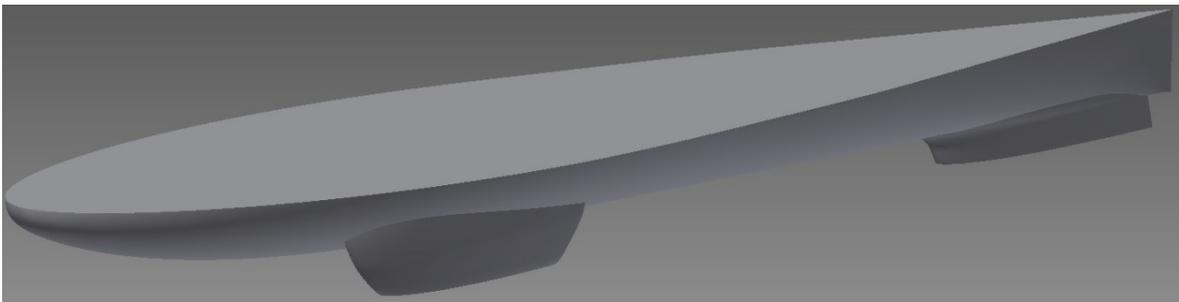


Figura 33 - Distribuição de tensões no sistema de direção.

A Tabela 26 mostra que o maior valor de tensão gerado nesta situação é de 273,6 MPa, que quando comparado à tensão de cedência do material de 1930 MPa indica que esta estrutura tem um coeficiente de segurança mínimo, nas camadas de carbono, de  $n = 1,5 \times \frac{1930}{273,6} = 10,58$  e na camada de núcleo de  $n = 1,5 \times \frac{1,55}{1,5} = 1,55$  ou seja está sobredimensionada em termos de camadas de carbono e bem dimensionada em termos de núcleo. A massa final desta peça é de 168 g.

## 5.2. Monocoque

O processo de construção *monocoque* teve início com a definição de uma linha de separação entre a parte superior e inferior da forma aerodinâmica da Figura 6. A parte superior tem apenas de possuir rigidez para poder exercer a sua função aerodinâmica e por isso não será aqui dimensionada. A parte inferior vai ser o objeto de estudo de modo a que uma forma aerodinâmica possa vir a exercer a sua função estrutural. A Figura 34 mostra a zona onde se escolheu fazer a separação entre as partes superior e inferior. As cavas das rodas que podem ser identificadas na Figura 34 têm função aerodinâmica e não serão dimensionadas.



**Figura 34 - Zona de separação entre as partes superior/inferior da forma aerodinâmica.**

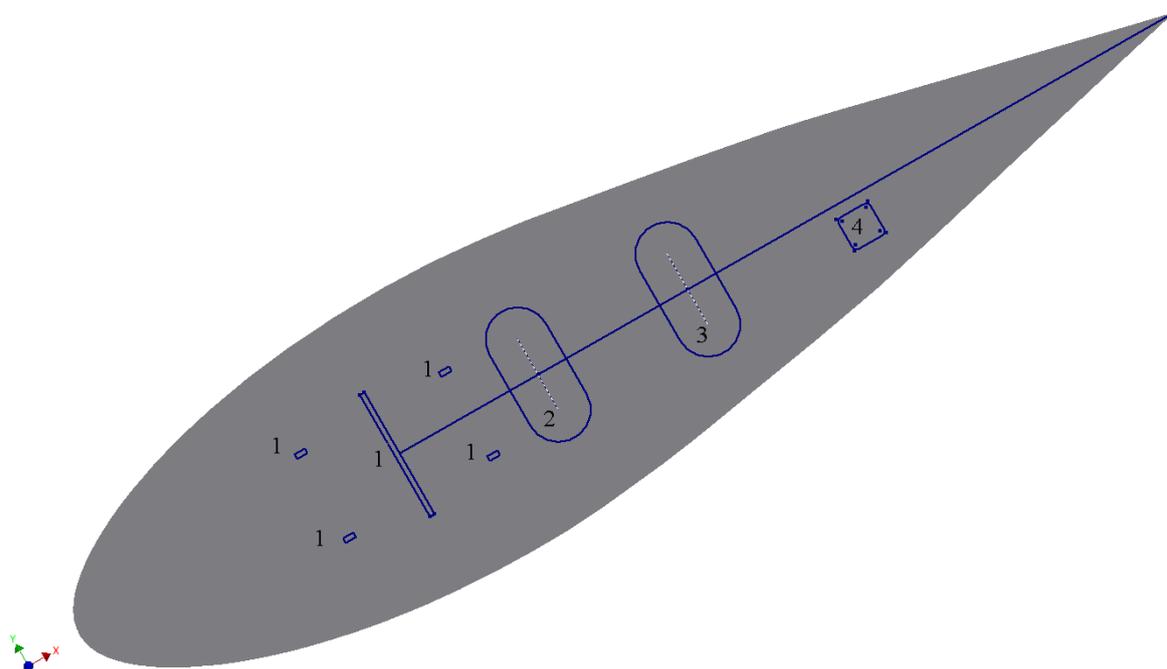
Para se poder dar início ao dimensionamento da estrutura *monocoque*, é necessário conhecer a dinâmica do veículo para se introduzir as condições de fronteira apropriadas e os esforços com magnitude e direção correta.

Sabe-se que o veículo tem a sua posição estável no solo com as três rodas em permanente contacto com o mesmo. As rodas dianteiras e traseira estão fixas ao veículo através do sistema de direção aqui dimensionado e através de um sistema de apoio traseiro.

Considerando que a série elementos que liga uma roda ao veículo tem propriedades mecânicas tais que a sua geometria nunca se altera, independentemente do tipo, intensidade e direção dos esforços neles exercidos, pode-se assumir que a zona de interação entre o veículo e o último elemento da série não vai alterar a sua posição relativamente ao chão. Ao fazer este tipo de consideração fica facilitada a escolha das zonas onde aplicar as condições de fronteira. Fica assim definido que as zonas de interação

referidas vão ser zonas de aplicação de condições de fronteira tentando replicar o melhor possível a situação real.

Estando as condições de fronteira definidas falta definir as zonas de aplicação das solicitações. A aproximação que se irá aqui considerar consiste na criação de duas zonas, situadas entre o eixo dianteiro e o eixo traseiro, representativas da aplicação de solicitações resultantes da massa do piloto e da massa dos componentes. A Figura 35 mostra as zonas que foram criadas para a aplicação de restrições e de solicitações.



**Figura 35 - Zonas criadas para aplicação de condições de fronteira e solicitações.**

As zonas marcadas com o número 1 são zonas de aplicação de condições de fronteira relativas ao sistema de direção, as zonas marcadas com o número 2 e 3 são zonas de aplicação de solicitações e a zona marcada com o número 4 é também zona de aplicação de condição de fronteira relativa ao sistema de apoio traseiro. A aplicação das solicitações nas zonas 2 e 3 será feita através de *rigid links* que ligam essas duas zonas a um ponto que representa o CG, ponto esse que irá ser solicitado com os esforços da Tabela 5. A Figura 36 representa a formulação em ADINA do problema descrito.

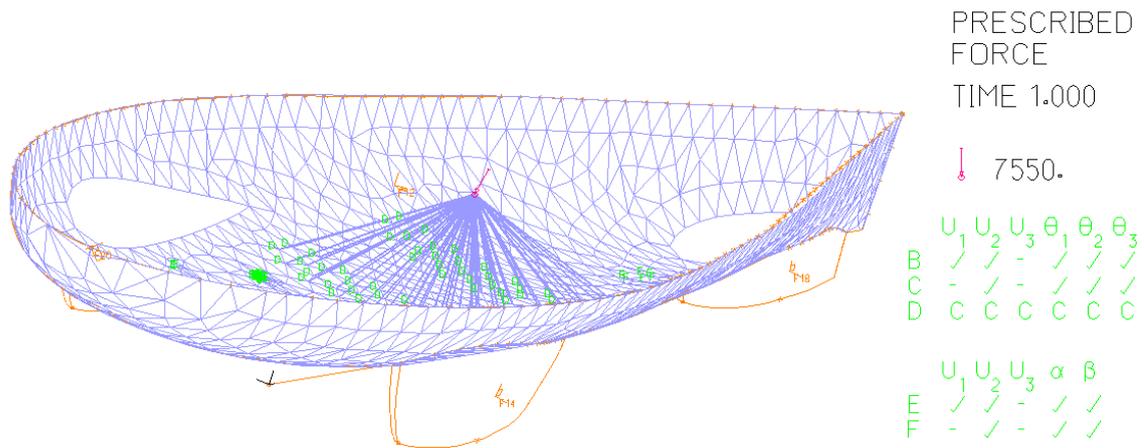


Figura 36 - Formulação em ADINA da *monocoque*.

Tendo em conta as solicitações que a estrutura vai sofrer decidiu-se que o material a utilizar será composto por quatro camadas de carbono, de 0,4 mm por camada e desfasadas 45° da seguinte, e uma camada de núcleo com 20 mm, o que perfaz um total de espessura de 21,60 mm. Depois de introduzidos todos os dados correu-se a simulação que resultou nos dados apresentados na Figura 37, Tabela 27 e Figura 38.

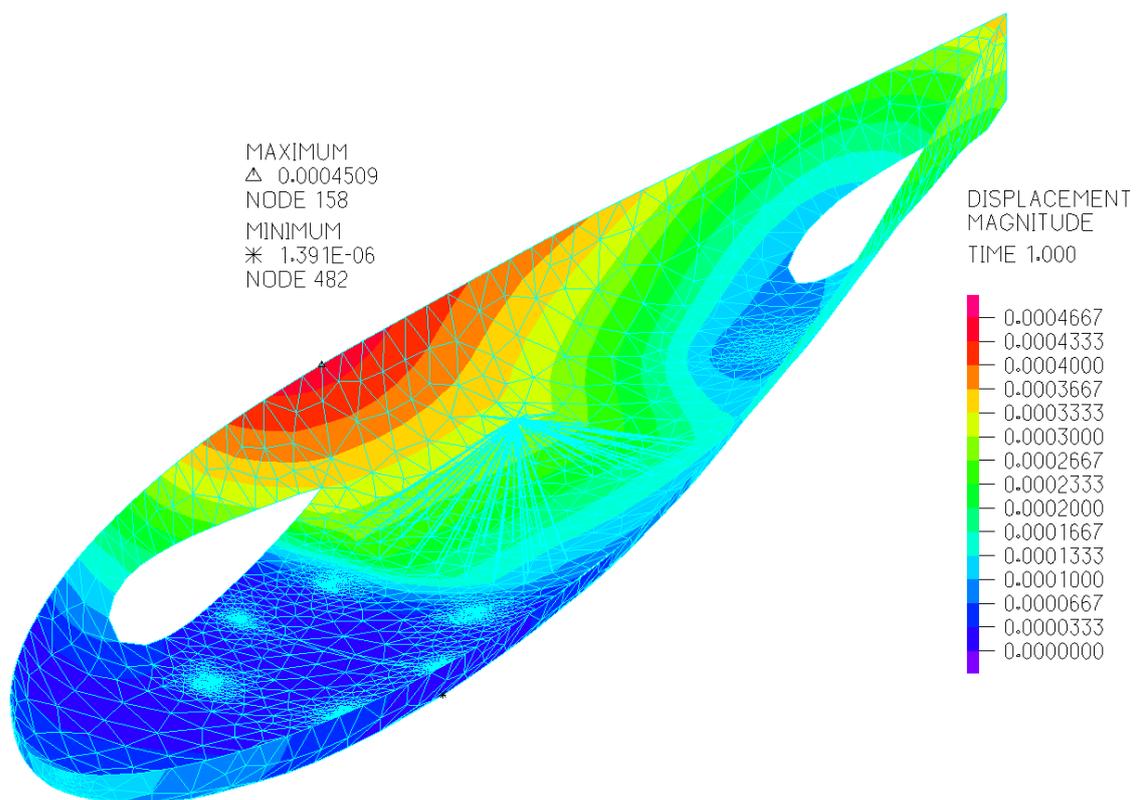


Figura 37 - Distribuição dos deslocamentos na *monocoque*.

A Figura 37 mostra que o maior valor de deslocamento ocorre na lateral da *monocoque* e tem o valor de 0,0004667 m ou 0,4667 mm. A Tabela 27 mostra a tensão máxima gerada em cada camada de material podendo-se verificar que a camada de fibra de carbono com maior tensão é a camada 2 como mostra a Figura 38. Verifica-se também que na camada 3, que corresponde à camada de núcleo, o valor da tensão máxima é inferior ao do valor limite de 1,55 MPa.

Tabela 27 - Tensões máximas nas camadas constituintes do material.

Camada número	Tensão máxima [MPa]
1	150,3
2	167,7
3	1,03
4	145,9
5	154,3

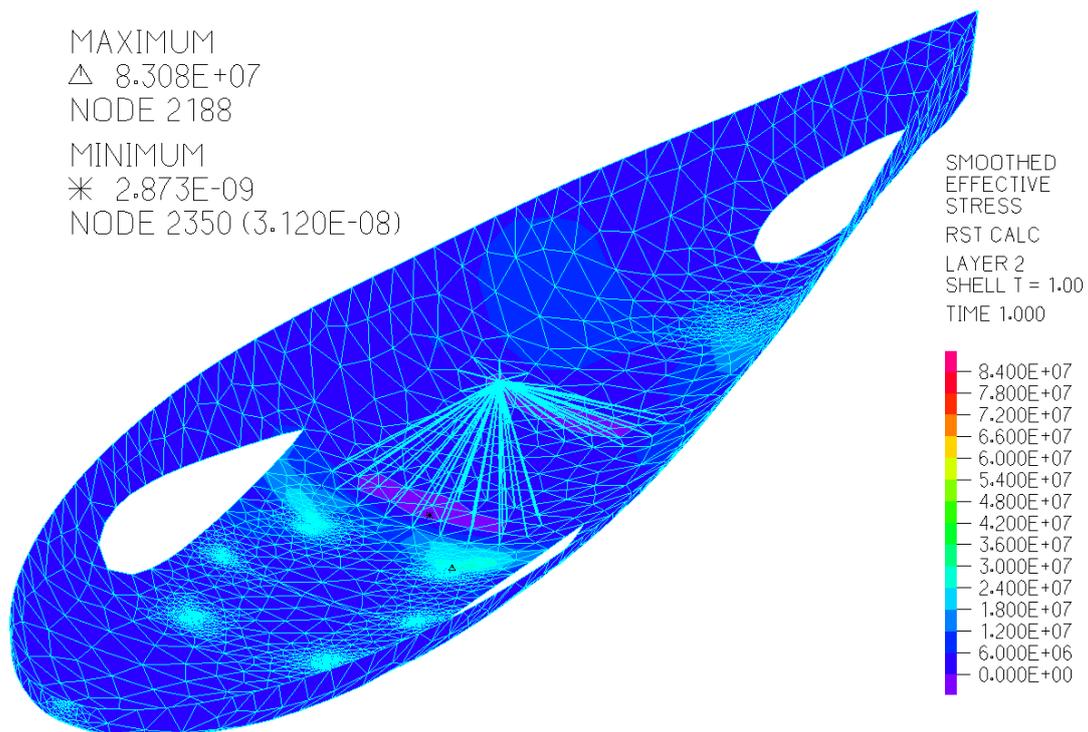


Figura 38 - Distribuição de tensões na *monocoque*.

Através da Tabela 27 consegue-se saber que o maior valor de tensão é de 83,1 MPa, que quando comparado à tensão de cedência do material de 1930 MPa indica que esta estrutura tem um coeficiente de segurança mínimo, nas camadas de carbono, de

$n = 1,5 \times \frac{1930}{167,3} = 17,30$  e um coeficiente de segurança mínimo na camada de núcleo de

$n = 1,5 \times \frac{1,55}{0,5} = 2,26$  ou seja está sobredimensionada em termos de camadas de carbono e

bem dimensionada em termos de núcleo. A massa final da *monocoque* é de 5,23 kg.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1. Conclusões

Pode concluir-se com este estudo que é através de uma estrutura *monocoque* que a equipa Eco Veículo e seus protótipos podem aspirar atingir novas metas de desempenho energético em provas de eficiência energética.

Este trabalho fica a partir de agora com a função de, na equipa, guiar futuros estudos ou processos de otimização que envolvam materiais compósitos e simulações de materiais compósitos. As folhas de cálculo aqui criadas e todo o processo de investigação aqui realizado foram essenciais para a concretização deste trabalho e continuarão a servir o seu propósito em futuros projetos.

Os objetivos deste trabalho foram atingidos pois numa primeira aproximação, sem fase de otimização a massa da estrutura *monocoque* ficou pelos 5,23 kg o que a torna mais leve que o anterior chassis em alumínio e esta estrutura já incorpora a forma aerodinâmica e o chão do carro.

### 6.2. Sugestões

A estrutura aqui obtida não é a estrutura final. Mais estudos serão necessários de modo a implementar zonas de diferente espessura de material na *monocoque*. É necessário também realizar simulações com o banco do piloto e antepara implementadas na *monocoque*. Os resultados de todos estes estudos serão ainda melhores se for desenvolvida uma simulação numérica representativa da estrutura em ninho de abelha de modo a obter as suas propriedades com elevado nível de confiança. É necessário também realizar a análise e projeto da estrutura de apoio da roda traseira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Automotive, M. (s.d.). *McLaren MP4/1 Carbon Monocoque / MP4-12C MonoCell*. Obtido em Maio de 2014, de EuroCar News:  
[www.eurocarnews.com/media/pictorials/1137/5164.jpg](http://www.eurocarnews.com/media/pictorials/1137/5164.jpg)
- badass. (Outubro de 2013). *Lamborghini Countach #2448082*. Obtido em Maio de 2014, de Cloudlakes: [cloudlakes.com/gallery/2448082-lamborghini-countach.html](http://cloudlakes.com/gallery/2448082-lamborghini-countach.html)
- Bandershtadter. (Fevereiro de 2010). *Maserati Tipo 61 Birdcage '1959-60*. Obtido em Maio de 2014, de AutoWP.ru: [en.autowp.ru/picture/349288](http://en.autowp.ru/picture/349288)
- Baron, P. (s.d.). *Lamborghini Countach (1974-1990)*. Obtido em Maio de 2014, de Stubs Auto La Culture Automobile: [stubs-auto.fr/l/lamborghini-countach-1974-1990/](http://stubs-auto.fr/l/lamborghini-countach-1974-1990/)
- Chamis, C. C. (7 a 11 de Fevereiro de 1983). Simplified Composite Micromechanics Equations for Hygral, Thermal and Mechanical Properties. *Thirty-eighth Annual Conference of the Society of the Plastics Industry (SPI) Reinforced Plastics/Composite Institute*.
- Cjp24. (Junho de 2009). *Carbon fiber-2*. Obtido em Maio de 2014, de Wikimedia Commons: [upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Carbon\\_fiber-2.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Carbon_fiber-2.jpg)
- Dandy, D. S. (2007). *Topic 5 Polymer composites*. Obtido em Maio de 2014, de What is Chemical Engineering:  
[navier.engr.colostate.edu/whatische/images/ChEL05t03f01.jpg](http://navier.engr.colostate.edu/whatische/images/ChEL05t03f01.jpg)
- Eco-Marathon, S. (Setembro de 2014). *Rules and regulations*. Obtido em Julho de 2014, de Shell Eco-marathon: [s02.static-shell.com/content/dam/shell-new/local/corporate/ecomarathon/downloads/pdf/global/sem-2015-global-rules-chapter1-updated-020914.pdf](http://s02.static-shell.com/content/dam/shell-new/local/corporate/ecomarathon/downloads/pdf/global/sem-2015-global-rules-chapter1-updated-020914.pdf)
- Faria, T. N. (2014). *Projecto e Construção das Rodas da Frente e da Roda Traseira de um Veículo Automóvel de Elevado Desempenho Energético*. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Figueiredo, A. M. (2014). *Projecto e Construção de um Sistema de Roda Livre de Baixo Binário de Atrito para a Roda Traseira de um Veículo Automóvel de Elevado Desempenho Energético*. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Gibson, R. F. (1994). *Principles of Composite Material Mechanics, Second Edition*. McGraw-Hill.
- Hunter, T. (1999). *1954 Mercedes-Benz 300 SL Gullwing Coupe*. Obtido em Maio de 2014, de Car Styling 2.0:  
[www.carstyling.ru/de/car/1954\\_mercedes\\_benz\\_300\\_sl\\_gullwing\\_coupe/images/1081/](http://www.carstyling.ru/de/car/1954_mercedes_benz_300_sl_gullwing_coupe/images/1081/)
- Industry, D. (s.d.). *Cel Components S.r.l*. Obtido em Maio de 2014, de Direct Industry The Online industrial Exhibition: [www.directindustry.com/prod/cel-components-srl/aluminum-polystyrene-foam-sandwich-panels-38588-495073.html](http://www.directindustry.com/prod/cel-components-srl/aluminum-polystyrene-foam-sandwich-panels-38588-495073.html)
- John, L. (2006). *2006 OC Auto Show*. Obtido em Maio de 2014, de [www.flickr.com/photos/jrok/265838085/](http://www.flickr.com/photos/jrok/265838085/)

- Leitão, J. M. (2014). *Optimização Aerodinâmica da Forma da Carroçaria de um Veículo Automóvel Protótipo de Elevada Eficiência Energética para Competir na Shell Eco-Marathon Europe 2014*. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Markham, P. (Abril de 2008). *Project Heinkel*. Obtido em Maio de 2014, de [heinkelscooter.blogspot.pt](http://heinkelscooter.blogspot.pt): [heinkelscooter.blogspot.pt/2011/12/tatras-streamliners-yesterdays-car-of.html](http://heinkelscooter.blogspot.pt/2011/12/tatras-streamliners-yesterdays-car-of.html)
- NauticExpo. (s.d.). *Ayres composite Panels*. Obtido em Maio de 2014, de NauticExpo The Online Boating and Maritime Exhibition: [www.nauticexpo.com/prod/ayres-composite-panels/sandwich-panels-honeycomb-aluminum-28043-189246.html](http://www.nauticexpo.com/prod/ayres-composite-panels/sandwich-panels-honeycomb-aluminum-28043-189246.html)
- Nunes, J. M. (2014). *Otimização do Consumo Específico de Combustível ao Freio de um Motor de Combustão Interna para Participar nas Edições 2014 da Shell Eco-Marathon*. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Silva, D. D. (2014). *Projeto, Construção e Teste do Sistema de Direção para um Veículo de Elevada Eficiência Energética*. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.