

# **Design de mesas de direção (Triple Clamps) para motociclos**

*Helder Marques Gonçalves Cavalheiro da Costa*

Dissertação do MIEM

Orientadores na FEUP:

Professor António Torres Marques

Professor António Joaquim Mendes Ferreira



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2013



## Resumo

Nos tempos atuais, existe uma crescente demanda na redução do peso das estruturas. No campo da indústria automóvel e de motocicletas, essa redução prende-se com o aumento do preço dos combustíveis. Uma diminuição no peso global de um veículo resulta em menores consumos de combustível e um conseqüente menor impacto ambiental. Necessita-se assim de substituir as soluções convencionais por soluções com materiais mais leves, mas que apresentem a mesma performance. Surge assim o interesse no uso de materiais compósitos em estruturas primárias de veículos, nomeadamente com fibra de vidro e de carbono.

O presente trabalho refere-se à possibilidade de introduzir materiais compósitos num componente pertencente à suspensão dianteira de motocicletas. Sendo o componente original de alumínio, torna a tarefa ainda mais desafiante, uma vez que a sua eficácia estrutural é elevada. Neste tipo de estudo, devem ser consideradas inúmeras variáveis e restrições, verificando se é ou não viável seguir por uma determinada via. Para este caso, foi estudada a viabilidade da introdução de um composto de moldação baseado em pré-impregnados de fibra de carbono (HexMC), cuja resistência específica é um dos seus maiores pontos de vantagem em relação aos alumínio.

Foram estudadas algumas das situações típicas durante uma viagem de motociclo: aceleração máxima, travagem máxima na roda dianteira, travagem máxima na roda traseira, curva e impacto. Dentro deste grupo, aquelas que acarretam maiores esforços ao conjunto dianteiro são as situações de travagem máxima na roda dianteira e de impacto. Para determinar as tensões e deslocamentos no componente, foi utilizado o *software* de elementos finitos *Abaqus*.

Não menos importante é também a definição dos processos de fabrico, que devem ter em conta todas as considerações de projeto inerentes à substituição do alumínio por este composto de moldação. Aliada aos processos de fabrico, também deve ser feita uma análise de custos, de forma a verificar a viabilidade do projeto.



## Abstract

In current times, there is a growing demand for lightweight structures. In the field of automobile and motorcycle industry, this reduction is related to the increasing fuel prices. A decrease in the overall weight of a vehicle results in lower fuel consumption and consequent reduced environmental impact. Thus, there is a need to replace conventional solutions with solutions with lighter materials, which have the same performance. This leads to the interest in the use of composite material in primary structures of vehicles, including fiberglass and carbon fiber.

The present study is related to the possibility of introducing composite material in a component that belongs to the front suspension of motorcycles. Since the original component is made of aluminum, it makes the task even more challenging, since its structural efficiency is high. In this type of study, it should be considered several variables and constraints, checking whether it is feasible to follow a given path. For this case, it was studied the viability of introducing a molding compound based on pre-impregnated chopped carbon fiber (HexMC), whose specific resistance is one of its biggest points of advantage over aluminum.

Some of the typical situations during a motorcycle trip have been studied: maximum acceleration, maximum braking on the front wheel, maximum braking on the rear wheel, turn and impact. From this group, those that lead to bigger efforts in the front assembly are the situations of maximum braking on the front wheel and impact. To determine the stresses and displacements in the component, the finite element *software Abaqus* was used.

No less important is also the definition of manufacturing processes, which must take into account all design considerations inherent to the replacement of aluminum by this molding compound. Coupled with the manufacturing processes, should also be done a cost analysis in order to verify the feasibility of the project.



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor António Torres Marques a constante disponibilidade e o sentido crítico que me permitiu que o presente trabalho atingisse os seus objetivos. Quero agradecer igualmente ao Professor António Joaquim Mendes Ferreira pela disponibilidade e conhecimento transmitido.

Agradeço a todos os meus colegas de Faculdade que me acompanharam ao longo deste percurso, tanto pelas críticas construtivas que me fizeram como pelos momentos de descontração e partilha de conhecimentos na mais diversas áreas.

Agradeço ainda aos amigos de toda a vida que sempre confiaram no meu valor e qualidade, assim como por todos os momentos vividos.

Finalmente, quero agradecer aos meus Pais, por todo o apoio e pelo que me proporcionaram ao longo deste caminho.

## ***Agradecimentos***

---

# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1	Desenvolvimento Integrado de Produto .....	3
2.2	Definição de Motociclo .....	8
2.3	Cinemática e Dinâmica de Motociclos .....	10
2.3.1	Forças .....	10
2.3.2	Movimentos .....	11
2.3.3	Dinâmica Lateral.....	11
2.4	Sistema de Suspensão Dianteira.....	13
2.4.1	“ <i>Triple Clamps</i> ” .....	18
2.5	Materiais Compósitos e substituição do Alumínio .....	21
2.5.1	O que é um material compósito?.....	21
2.5.2	Interesse no uso de materiais compósitos .....	25
2.5.3	Exemplos de substituição de soluções convencionais por materiais compósitos.....	25
2.5.4	Exemplos de aplicação dos compósitos .....	26
2.5.5	Substituição do alumínio por materiais compósitos .....	27
2.5.6	Processos de Fabrico de Compósitos de Matriz Polimérica .....	30
2.5.7	Processos de Fabrico do componente em Alumínio.....	36
<b>3</b>	<b>PROJETO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....</b>	<b>41</b>
3.1	Análise de Forças num Motociclo .....	42
3.1.1	Aceleração Máxima .....	43
3.1.2	Máxima Travagem na Roda Dianteira .....	45
3.1.3	Máxima Travagem na Roda Traseira .....	45
3.1.4	Quando o motociclo está em curva .....	47
3.1.5	Forças externas (Resumo) .....	48
3.2	Triple Clamp Testado.....	49
3.3	Materiais Testados.....	50

## *Índice*

---

3.3.1	Al 6061-T6 .....	51
3.3.2	Al 7075-T6 .....	52
3.3.3	HexMC .....	53
3.4	Aplicação de Elementos Finitos .....	56
3.5	Resultados obtidos .....	57
3.6	Identificação das frequências naturais .....	60
3.7	Impacto.....	63
3.8	Considerações de projeto .....	67
<b>4</b>	<b>PROCESSOS DE FABRICO E ANÁLISE DE CUSTOS .....</b>	<b>69</b>
4.1	Processo de fabrico HexMC .....	69
4.2	Análise de Custos .....	72
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DE RESULTADOS E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE UM MOTOCICLO .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>CARACTERÍSTICAS YAMAHA YZF-R1 2000 .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>CÁLCULO DE FORÇAS EXTERNAS .....</b>	<b>87</b>
C.1	Regime estacionário.....	87
C.2	Aceleração Máxima.....	88
C.3	Máxima travagem na roda dianteira.....	88
C.4	Máxima travagem na roda traseira .....	89
C.5	Quando o motociclo está em curva.....	90
<b>ANEXO D</b>	<b>CÁLCULO DE FORÇAS PARA APLICAÇÃO NO SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS .</b>	<b>91</b>
D.1	Máxima travagem na roda dianteira.....	91
D.2	Impacto.....	94

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Desenvolvimento de Produto e a sua multidisciplinarietà	3
Figura 2.2 - Exemplo de variantes de produtos existentes	4
Figura 2.3 - Exemplos de produtos inovadores	4
Figura 2.4 - Exemplo de produto criativo	5
Figura 2.5 - Ciclo de vida de um produto num ponto de vista económico. (1)	5
Figura 2.6 - Desenvolvimento integrado de produto e as suas etapas. Adaptado de (1)	7
Figura 2.7 - Estrutura Cinemática de um Motociclo. Adaptado de (2)	8
Figura 2.8 - Exemplos de molas helicoidais	14
Figura 2.9 - Modelo de Sistema de Suspensão de Motociclo. Adaptado de (6)	15
Figura 2.10 - Exemplo de pneu de motociclo	15
Figura 2.11 - Suspensão de forquilha telescópica	16
Figura 2.12 - Motociclo com Suspensão de Forquilha Telescópica	17
Figura 2.13 – Principais especificações de um Triple Clamp	18
Figura 2.14 - Rake, offset e trail de um motociclo. Adaptado de (7)	19
Figura 2.15 - Exemplos de triple clamps	20
Figura 2.16 - Arranjos típicos de fibras (10)	24
Figura 2.17 - Vista explodida do BEM-170, mostrando os componentes fabricados em compósitos poliméricos avançados (Embraer)	26
Figura 2.18 - Pré-impregnado sob a forma de volume (esquerda) e sob a forma de folha (direita)	28
Figura 2.19 - Exemplo de substituição do alumínio por pré-impregnado de fibras curtas (14)	29
Figura 2.20 – Esquema do processo RRIM (15)	30
Figura 2.21 - Esquema do processo RTM (15)	31
Figura 2.22 - Esquema do processo SMC (15)	33
Figura 2.23 - Esquema do processo de moldação em prensa (15)	34

## *Lista de Figuras*

---

Figura 2.24 - Esquema do processo de moldação por injeção (15) .....	35
Figura 2.25 - Processo de forjamento .....	36
Figura 2.26 - Sequência de operações CAD-CAM .....	38
Figura 2.27 - Exemplo de triple clamp anodizados .....	40
Figura 2.28 - Exemplo de componentes anodizados .....	40
Figura 3.1 - Esquema de forças aceleração máxima. Adaptado de (17).....	44
Figura 3.2 - Esquema de forças máxima travagem na roda dianteira. Adaptado de (17).....	45
Figura 3.3 - Esquema de forças máxima travagem na roda traseira. Adaptado de (17) .....	46
Figura 3.4 - Esquema de forças do motociclo em curva. Adaptado de (17) .....	47
Figura 3.5 - Triple Clamp Superior Yamaha R1 2000. Adaptado de (18).....	49
Figura 3.6 - Distribuição aleatória das fibras curtas .....	53
Figura 3.7 - Comparação da densidade do HexMC com outros materiais. Adaptado de (24).....	54
Figura 3.8 - Comparação da tensão de cedência específica do HexMC com outros materiais. Adaptado de (24).....	54
Figura 3.9 - Comparação do módulo específico do HexMC com outros materiais. Adaptado de (24) .....	55
Figura 3.10 - Exemplos de aplicação de compostos de moldação.....	55
Figura 3.11 - Malha de elementos finitos utilizada .....	57
Figura 3.12 - Condições de fronteira do modelo .....	57
Figura 3.13 - Distribuição de tensões no caso de travagem máxima na roda dianteira e identificação das zonas críticas .....	58
Figura 3.14 – Transmissibilidade em função da razão de frequência. Retirado de (26) .....	60
Figura 3.15 - Frequências naturais Al 6061 e HexMC .....	62
Figura 3.16 - Força Contacto Pneu Dianteiro – Piso durante passagem em degrau/queda com 0.05 m a 100 km/h. Adaptado de (6) .....	63
Figura 3.17 – Gráfico força de contacto vs. Tensão de Von Mises máxima.....	64
Figura 3.18 - Distribuição de tensões para o HexMC em situação de impacto máximo .....	65
Figura 3.19 - Identificação da zona crítica em situação de impacto máximo .....	65
Figura 3.20 - Força de impacto / Força de contacto em regime estacionário vs. Tensão de cedência do material.....	66
Figura 4.1 - Etapas do processo de fabrico do HexMC. Adaptado de (24) .....	70
Figura 4.2 - Placa necessária para maquinar o componente .....	73
Figura 5.1 - Etapas para trabalhos futuros.....	76
Figura A.1 - Valores típicos de distância entre eixos (6).....	82

Figura A.2 - Valores típicos do ângulo rake (6) .....	83
Figura A.3 - Valores típicos da distribuição do peso - % na roda da frente (6) .....	83
Figura A.4 - Valores típicos da altura do centro de gravidade (6) .....	84
Figura A.5 - Esquema de motociclo e identificação dos seus principais parâmetros geométricos. Adaptado de (17) .....	84
Figura C.1 - Esquema de forças motociclo em estado estacionário. Adaptado de (17) .....	87
Figura D.1 - Esquema de forças travagem máxima na roda dianteira. Adaptado de (17).....	91
Figura D.2 - Forças na roda dianteira. Adaptado de (17) .....	92
Figura D.3 - Esquema para cálculo de forças nos triple clamps .....	92
Figura D.4 - Esquema de forças para cálculo de força de impacto nos triples clamps .....	94



# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Movimentos principais na Dinâmica Lateral de um Motociclo. Adaptado de (2).....	12
Tabela 2.2 - Tipos de Materiais Compósitos (9) .....	22
Tabela 2.3 - Principais requisitos de uma matriz (9).....	23
Tabela 2.4 - Exemplos de substituição de soluções convencionais por materiais compósitos. Adaptado de (11).....	25
Tabela 3.1 - Resumo de forças externas .....	48
Tabela 3.2 - Composição química Al 6061 (20).....	51
Tabela 3.3 - Propriedades Mecânicas e Térmicas Al6061-T6 (20) .....	51
Tabela 3.4 - Composição química Al 7075 (21).....	52
Tabela 3.5 - Propriedades Mecânicas e Térmicas Al7075-T6 (21) .....	52
Tabela 3.6 - Propriedades HexMC (23) .....	53
Tabela 3.7 - Resultados obtidos para o caso de travagem máxima na roda dianteira .....	58
Tabela 3.8 - Deslocamento no caso de travagem máxima na roda dianteira para os vários materiais.....	59
Tabela 3.9 - Resultados obtidos para o caso de impacto.....	63
Tabela 3.10 - Resultados obtidos para situação de impacto via processo iterativo .....	64
Tabela 3.11 - Resultados obtidos para o caso de força de impacto máxima .....	65
Tabela 3.12 - Força de impacto / Força de contacto em regime estacionário .....	66
Tabela 4.1 - Temperatura e tempo de cura para o HexMC para espessura de 4 mm (23).....	69
Tabela 4.2 – Preço [€/kg] de cada material testado .....	72
Tabela 4.3 - Massa final do componente para cada material testado .....	72
Tabela 4.4 - Preço Matéria-Prima/Peça [€] para processo de maquinagem.....	73
Tabela 4.5 - Preço Matéria-Prima/Peça [€] para processo de forjamento.....	73
Tabela 4.6 - Preço Matéria-Prima/Peça [€] para processo de moldação por compressão .....	74

## ***Lista de Tabelas***

---

Tabela A.1 - Variação da distância entre eixos em função do tipo de motociclo. Adaptado de (2) .....	81
Tabela A.2 - Simbologia e identificação de parâmetros da FIGURA A.5 .....	84
Tabela B.1 - Características Yamaha YZF-R1 2000 (28) .....	85

# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

BMC	Bulk Moulding Compound
Cog	Centro de Gravidade
HS Carbon	High Strength Carbon
RIM	Resin Injection Moulding
RRIM	Reinforced Resin Injection Moulding
RTM	Resin Transfer Moulding
SMC	Sheet Moulding Compound
SRIM	Structural Moulding Compound
VaRTM	Vacuum assisted Resin Transfer Moulding

## Lista de símbolos

$a$	Transferência de carga da roda traseira para a dianteira	[%]
$b$	Distância do centro de gravidade para a frente	[ $m$ ]
$c$	Ângulo da forquilha / Angulo de rake	[°]
$f$	Ângulo de transferência de carga	[°]
$F$	Força de travagem	[ $N$ ]
$F_{\text{impacto}}$	Força de impacto	[ $N$ ]
$F_{\text{tripleclamp}}$	Força transmitida no triple clamp	[ $N$ ]
$g$	Aceleração da gravidade	[ $m/s^2$ ]
$h$	Altura do centro de gravidade	[ $m$ ]
$k$	Rigidez	[ $N/m$ ]
$m$	Massa do motociclo	[ $kg$ ]
$n$	Coeficiente de segurança	[–]
$N_d$	Força de contacto roda dianteira - piso	[ $N$ ]
$N_{sd}$	Carga estática da roda dianteira	[ $N$ ]
$N_{st}$	Carga estática da roda traseira	[ $N$ ]
$N_t$	Força de contacto roda traseira - piso	[ $N$ ]

## Abreviaturas e Símbolos

---

$N_{tr}$	Transferência de carga	[N]
$o$	Offset	[m]
$p$	Distância entre eixos	[m]
$p-b$	Distância do centro de gravidade para trás	[m]
$r_c$	Raio de curvatura	[m]
$R_f$	Raio roda frente	[m]
$R_r$	Raio roda trás	[m]
$R_x$	Força de reação horizontal no eixo da roda	[N]
$R_y$	Força de reação vertical no eixo da roda	[N]
$T$	Trail	[m]
$T$	Força motriz	[N]
$tcspd$	Transferência de carga na posição estática (roda da frente)	[%]
$tcsptr$	Transferência de carga na posição estática (roda de trás)	[%]
$u$	Deslocamento	[mm]
$\Omega$	Velocidade angular	[rad/s]
$\alpha$	Ângulo da forquilha	[°]
$\beta$	Razão de frequências	[-]
$\mu$	Coefficiente de atrito	[-]
$\xi$	Razão de amortecimento	[-]
$\rho$	Densidade volúmica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão de Von Mises máxima	[MPa]
$\sigma_{ced}$	Tensão de cedência do material	[MPa]
$\omega$	Frequência de excitação	[rad/s]
$\omega_n$	Frequência natural	[rad/s]

# 1 Introdução

O presente trabalho de dissertação surge no término do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. O seu principal âmbito é o estudo da introdução de materiais compósitos em componentes de motocicletas, nomeadamente em “*triple clamps*”, vulgarmente conhecidos por mesas de direção.

Em primeiro lugar, foram feitas diversas pesquisas de modo a criar um levantamento de toda a informação acerca de motocicletas, a sua cinemática/dinâmica e os seus constituintes, focalizando a atenção sobre o sistema de suspensão dianteira. Deste modo, foi possível obter uma boa perceção sobre qual o papel do componente a analisar na estrutura do motociclo. Seguidamente foi realizada uma incursão pelos materiais compósitos, seus processos de fabrico inerentes e uma eventual substituição do alumínio por estes materiais.

Em segundo lugar, e já com uma ideia global sobre o comportamento do motociclo, foram analisadas as forças externas que atuam sobre este durante os seus movimentos típicos. Após determinação da situação que acarreta uma maior solicitação do conjunto dianteiro, procedeu-se à criação do modelo de elementos finitos para simulação numérica em *Abaqus*. Este modelo consiste na geometria 3D do componente, com a conseqüente definição das condições de fronteira e cargas aplicadas. Após recolha e interpretação de resultados, nomeadamente tensão de Von Mises, deslocamentos e frequências naturais, foi testada a situação de impacto na roda dianteira. Nesta parte, após a caracterização desta solicitação, foi-se aumentando as cargas aplicadas até serem atingidas as tensões de cedência correspondentes a cada material testado. Nesta secção do trabalho, também foram analisadas algumas considerações de projeto aliadas à substituição do alumínio por materiais compósitos.

Na última parte do trabalho, é descrito o processo de fabrico do material compósito escolhido. Para além da definição do processo de fabrico, foi feita uma análise de custos. Esta análise versa apenas sobre o custo dos materiais diretos (matérias-primas), associados a cada processo de fabrico. Esta última parte é bastante importante para ser analisada, uma vez que pode, certas vezes inviabilizar uma dada solução ou projeto.



## 2 Revisão da Literatura

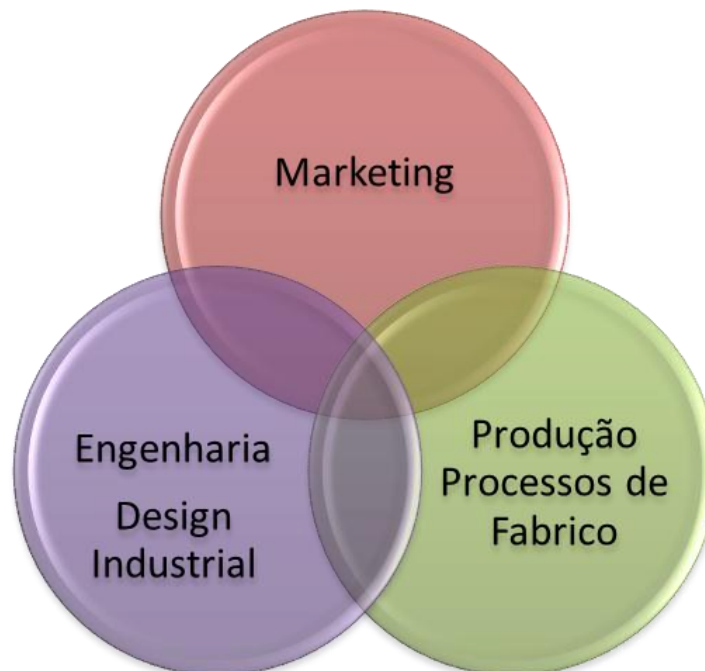
Neste capítulo será feita uma introdução e contextualização do tema da dissertação, versando essencialmente sobre: desenvolvimento integrado de produto, aspetos cinemáticos e dinâmicos de motocicletas, sistemas de suspensão dianteira, materiais compósitos e a substituição do alumínio.

### 2.1 Desenvolvimento Integrado de Produto

Desenvolvimento integrado de produto é um conjunto de atividades, começando com a perceção de uma oportunidade de mercado e acabando com a produção, venda e entrega do produto.

Este conjunto de atividades é multidisciplinar, englobando:

- Marketing;
- Engenharia + Design Industrial;
- Produção/Processos de fabrico.



**Figura 2.1** - Desenvolvimento de Produto e a sua multidisciplinidade

O termo produto refere-se a um objeto concebido, produzido industrialmente, com características e funções, comercializado e usado pelas pessoas ou organizações, de modo a atender os seus desejos ou necessidades. (1)

Quanto ao grau de novidade, os produtos podem ser classificados em:

- **Variantes de produtos existentes:** extensões de linha, reposicionamento de produtos em termos de seu uso e mercado, formas novas, versões modificadas;
- **Inovadores:** modificações feitas em produtos existentes, gerando produtos de elevado valor agregado. Geralmente, um maior grau de inovação requer um tempo mais longo ou esforço de desenvolvimento e maior custo de pesquisa;
- **Criativos:** geralmente são produtos com existência nova, o tempo de desenvolvimento é longo e os custos de pesquisa e desenvolvimento são elevados. A introdução no mercado de produtos criativos pode ser de risco elevado, mas também pode gerar novos paradigmas e potencializar novos campos industriais. (1)



Figura 2.2 - Exemplo de variantes de produtos existentes



Figura 2.3 - Exemplos de produtos inovadores



Figura 2.4 - Exemplo de produto criativo

Todos os produtos, independentemente da sua natureza ou característica, têm um determinado ciclo de vida. A próxima figura ilustra o ciclo de vida de um produto desde um ponto de vista económico.

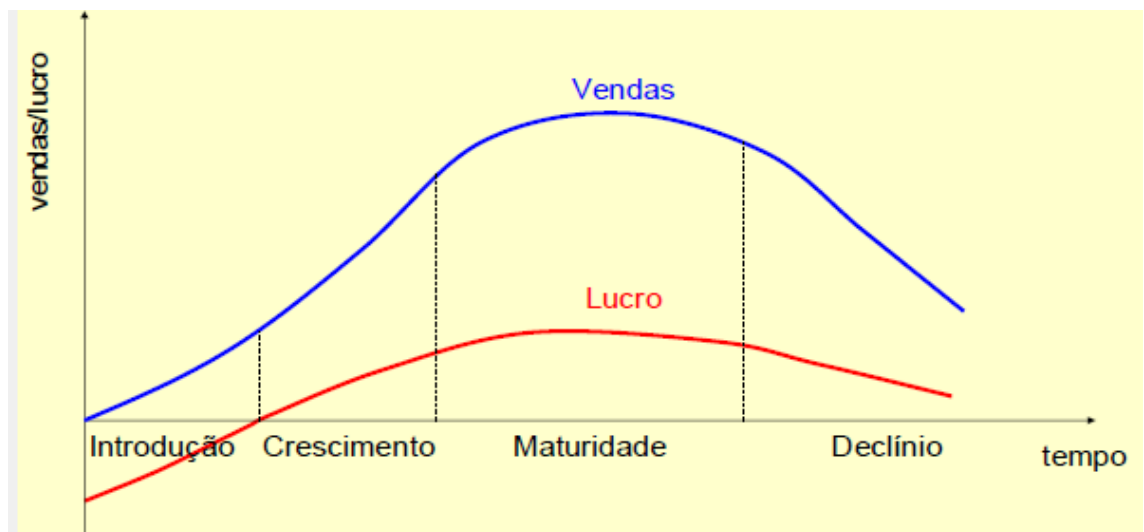


Figura 2.5 - Ciclo de vida de um produto num ponto de vista económico. (1)

Projeto de engenharia é o uso de princípios científicos, informações técnicas e imaginação na definição de estruturas, máquinas ou sistemas para desempenhar funções pré-especificadas com máxima economia e eficiência. Projeto é uma atividade predominantemente cognitiva, fundamentada em conhecimento, experiência e dirigida na busca de soluções ótimas de produtos técnicos, a fim de determinar a construção funcional e estrutural, criar documentos com informações precisas e claras para o seu fabrico.

O projeto do produto pode ser formulado como uma atividade de planear, sujeita às restrições de resolução e às restrições de solução. Como restrições de resolução entende-se,

aquelas que se relacionam com o conhecimento disponível, o tempo, facilidades de laboratório e de computação para resolver o problema. As restrições de solução englobam aspectos de custo, disponibilidade de materiais, equipamentos e processos de fabrico, uso e manutenção.

Para se obter sucesso no desenvolvimento de um determinado produto, têm que se identificar as necessidades do “cliente” e rapidamente criar produtos que as satisfaçam a baixo custo, sempre com a perspectiva de gerar lucro para quem vende/produz. (1)

**Características para um desenvolvimento de produto bem-sucedido:**

- Capacidade de produzir e vender produtos com lucro;
- Qualidade do produto;
- Custo do produto;
- Tempo de desenvolvimento;
- Custo de desenvolvimento;
- Capacidade de desenvolvimento.

Existem diversos métodos de projeto, mas todos seguem uma estrutura básica:

1. **Observação e análise:** Definição do problema, pesquisa, definição de objetivos e restrições;
2. **Planear e projetar:** geração de opções de projeto, escolha da opção de projeto, desenvolvimento, aprimoramento, detalhamento;
3. **Construir e executar:** protótipo, produção.

Assim, podemos descrever os seguintes passos:

1. Identificação de uma oportunidade;
2. Análise do problema (levantamento de informações);
3. Geração de ideias;
4. Seleção de ideias (triagem);
5. Desenvolvimento e teste do conceito;
6. Desenvolvimento da estratégia de marketing;
7. Análise do negócio (financeira/comercial);
8. Desenvolvimento do produto;
9. Teste de mercado;
10. Comercialização. (1)

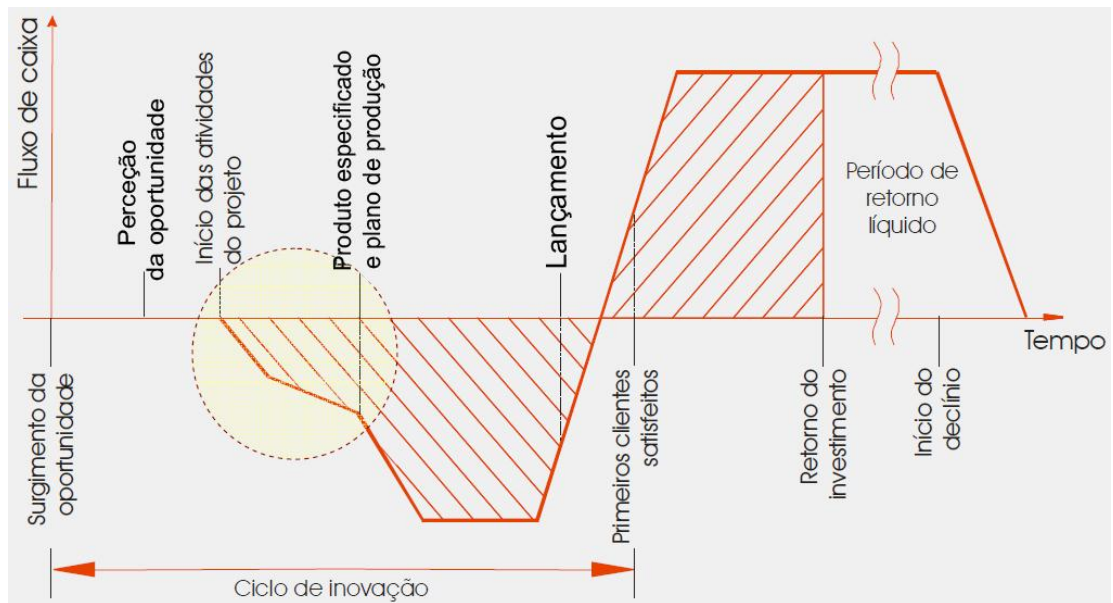
Estes passos podem ser iterados conforme necessário, sendo que alguns passos podem ser eliminados. Para reduzir o tempo do processo de desenvolvimento de produto, algumas empresas completam várias etapas ao mesmo tempo. A maioria dos líderes na indústria vê o processo de desenvolvimento de produto como um processo pró-ativo, onde os recursos são alocados de forma a identificar mudanças no mercado e apoderar-se de novas oportunidades

de produtos antes que elas ocorram (em contraste com a estratégia reativa em que nada é feito até que os problemas ocorrem ou o concorrente introduz uma inovação).

Por vezes em produtos mais inovadores, onde existe um grande quantidade de incerteza e mudança que torna difícil ou impossível planear o projeto completo antes de o iniciar, é sempre aconselhada uma abordagem mais flexível.

Como este processo requer tanto conhecimento de engenharia como de marketing, são sempre necessárias equipas multidisciplinares, sendo a equipa responsável por todos os aspetos do projeto, desde a geração da ideia inicial até à comercialização final.

Nas indústrias onde os produtos são tecnicamente complexos e os custos de pesquisa e desenvolvimento são elevados, por vezes existem alianças estratégicas entre organizações de forma a distribuir os custos, proporcionando um maior rapidez no processo.



**Figura 2.6** - Desenvolvimento integrado de produto e as suas etapas. Adaptado de (1)

## 2.2 Definição de Motociclo

Segundo (2), embora os motociclos sejam compostos por uma grande variedade de componentes mecânicos, desde um ponto de vista estritamente cinemático, considerando as suspensões como sendo rígidas, um motociclo pode ser simplesmente definido como um mecanismo espacial composto por 4 corpos rígidos:

- Conjunto traseiro (quadro, selim, depósito, motor e conjunto de transmissão);
- Conjunto dianteiro (forquilha, coluna de direção e guiador);
- Roda dianteira;
- Roda traseira.

Estes corpos rígidos estão conectados por três eixos de revolução (eixo de direção e os dois eixos das rodas) e estão em contacto com o solo como mostrado na **FIGURA 2.7**.



**Figura 2.7** - Estrutura Cinemática de um Motociclo. Adaptado de (2)

Os 4 corpos rígidos representam 24 graus de liberdade. Cada eixo de revolução restringe cinco graus de liberdade no mecanismo espacial, enquanto cada ponto de contacto roda/piso deixa três graus de liberdade livres. Se considerarmos a hipótese de rolamento puro dos pneus na estrada/piso como sendo válida, é fácil de indagar que cada roda só pode girar em torno:

- Do ponto de contacto com o plano da roda (movimento para a frente);
- Do eixo de intersecção dos planos do motociclo e da estrada (movimento de revolução);
- Do eixo que passa através do ponto de contacto e do centro da roda (rotação).

Em conclusão, o número de graus de liberdade de um motociclo é igual a 3, dado que 15 graus de liberdade estão inibidos pelos 3 eixos de revolução e os 6 graus de liberdade eliminados pelos 2 pontos de contacto roda/piso devem ser subtraídos dos 24 graus de liberdade dos 4 corpos rígidos.

Os três graus de liberdade de um motociclo devem ser associados com três movimentos principais:

- Movimento para a frente (representado pela rotação da roda traseira);
- Movimento de revolução/rotação em torno da linha que junta os dois pontos de contacto no plano do piso/estrada;
- Rotação da direção.

Enquanto conduz, o condutor gere estes três movimentos principais, de acordo com o seu estilo pessoal e perícia. O movimento resultante do motociclo e a correspondente trajetória dependem da combinação, no domínio do tempo, dos 3 movimentos principais relacionados com os 3 graus de liberdade. Esta combinação gera uma manobra, perante milhares possíveis, representando de certa forma o estilo pessoal do condutor.

Estas considerações foram formuladas assumindo que os pneus se movem sem escorregamento. Contudo, na realidade, o movimento dos pneus não é apenas um processo de rotação.

A geração de forças longitudinais (forças de condução e travagem) e forças laterais requer algum grau de escorregamento em ambas as direções, longitudinal e lateral, dependendo das condições da estrada. O número de graus de liberdade é portanto igual a sete:

- Movimento de avanço do motociclo;
- Rotação do guiador;
- Movimento de revolução do eixo de intersecção dos planos do motociclo e da estrada;
- Escorregamento longitudinal da roda dianteira (travagem);
- Escorregamento longitudinal da roda traseira (impulso ou travagem);
- Escorregamento lateral da roda dianteira;
- Escorregamento lateral da roda traseira.

## 2.3 Cinemática e Dinâmica de Motociclos

O estudo cinemático de motociclos é importante, especialmente em relação aos seus efeitos no seu comportamento dinâmico. Portanto, neste capítulo, para além do estudo cinemático, serão referidas algumas propriedades e características do comportamento dinâmico de um motociclo de forma a mostrar como algumas peculiaridades cinemáticas podem influenciar a estabilidade direcional e manobrabilidade de uma moto. Alguns aspetos são abordados no **ANEXO A**.

Os movimentos de interesse num motociclo incluem: equilíbrio/caso estático, travagem, viragem/direção, aceleração, ativação da suspensão e vibração. O estudo destes movimentos começou no século XIX e continua até hoje. (3) (4) (5)

Tanto os motociclos como as bicicletas, são veículos fundamentalmente diferentes e mais difíceis de estudar do que outros veículos de rodas, como por exemplo, os triciclos e quadriciclos. Apresentam falta de estabilidade lateral quando estacionários, e na maioria das circunstâncias só permanecem em pé quando se deslocam para a frente. A experimentação e análise matemática demonstraram que um motociclo permanece na posição vertical quando for orientado para manter o seu centro de massa sobre as suas rodas. Esta orientação é normalmente gerada por um condutor. Vários fatores, incluindo geometria, distribuição da massa e efeito giroscópico contribuem em diferentes graus para esta auto-estabilidade.

Manter-se em pé pode ser o principal objetivo para um condutor/piloto iniciado. Contudo, o motociclo deve inclinar-se, a fim de manter o equilíbrio numa curva: quanto maior for a velocidade ou menor for o raio da curva, maior a inclinação requerida. Ao contrário de outros veículos, a entrada de comando primário é a direção e não a posição.

Embora os motociclos sejam longitudinalmente estáveis quando parados, costumam ter um centro de massa razoavelmente alto e uma distância entre eixos suficiente para levantar a roda do chão sob uma determinada aceleração ou desaceleração.

### 2.3.1 Forças

Se o condutor e o motociclo forem considerados como sendo um único sistema, as forças que atuam nesse sistema e as suas componentes podem ser divididas em dois grupos: forças internas e forças externas.

As forças externas são devido à gravidade, inércia, contacto com o solo e com a atmosfera. As forças internas são causadas pelo condutor e pela interação entre componentes.

#### **Forças Externas**

Tal como acontece com todas as massas, a gravidade puxa o piloto e todos os componentes do motociclo para a terra. Em cada superfície de contacto do pneu existem forças de reação do solo com componente horizontal e vertical. As componentes verticais

maioritariamente agem contra a força da gravidade, mas também variam com a aceleração e travagem.

As componentes horizontais, devido ao atrito entre as rodas e o solo, incluindo a resistência ao rolamento, são em resposta às forças de propulsão, de travagem e de viragem. As forças aerodinâmicas devidas à atmosfera são na sua maioria sob a forma de arrasto, mas também podem ser devido ao vento lateral. A velocidade elevada, o arrasto aerodinâmico torna-se esmagadoramente a maior força que faz resistência ao movimento.

As forças devido à viragem são geradas durante as manobras de equilíbrio e também devido às mudanças de direção. Estas podem ser interpretadas como forças centrífugas no quadro do motociclo e no condutor. As forças giroscópicas que atuam em peças, tais como rodas, motor, transmissão, etc, são provocadas pela inércia destas peças em rotação.

### **Forças Internas**

As forças internas são na maioria dos casos causadas pelo condutor ou pelo atrito. O atrito existente entre as peças que se movem umas contra as outras: transmissão, mecanismo de direção e quadro, etc. Para além dos travões, que criam atrito entre as rodas em rotação e as peças do quadro em não rotação, a maioria dos motociclos têm suspensão dianteira e traseira de forma a dissipar energia indesejável.

## **2.3.2 Movimentos**

Os movimentos de um motociclo podem ser agrupados em dois tipos: aqueles fora do plano de simetria (laterais) e aqueles no plano central de simetria (longitudinal ou vertical). Movimentos laterais incluem o equilíbrio, inclinação, direção/controlo e viragem. Movimentos no plano central de simetria incluem o movimento para a frente / de avanço, paragem, e sobretudo situações que envolvam a ativação da suspensão.

Estes dois tipos de movimentos podem ser tidos como linearmente desassociados entre si. Por exemplo, um motociclo é lateralmente instável quando está parado e pode ser lateralmente auto-estável quando se desloca sob as condições certas. Por outro lado, um motociclo é longitudinalmente estável quando estacionário e pode ser longitudinalmente instável quando submetido a uma aceleração ou desaceleração suficiente.

## **2.3.3 Dinâmica Lateral**

A dinâmica lateral tem-se demonstrado ser a mais complicada, exigindo análise dinâmica tridimensional de vários corpos. No mínimo, são necessárias duas equações diferenciais de segunda ordem acopladas para caracterizar os principais movimentos. Obter soluções exatas é impossível, sendo necessário recorrer aos métodos numéricos em seu lugar. Na **TABELA 2.1** podem ser observados os principais movimentos na dinâmica lateral de um motociclo (equilíbrio, viragem e manobrabilidade) e os parâmetros que afetam cada um desses movimentos.

Dinâmica Lateral de Motociclos		
Equilíbrio	Viragem	Manobrabilidade
<ul style="list-style-type: none"><li>• Velocidade de avanço</li><li>• Localização do centro de massa</li><li>• Trail</li><li>• Distância entre eixos</li><li>• Distribuição da massa do mecanismo de direção</li><li>• Efeitos giroscópicos</li><li>• Auto-estabilidade</li><li>• Aceleração longitudinal</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inclinação</li><li>• Contra-viragem</li><li>• Viragem em estado estacionário</li><li>• Angulo de viragem</li><li>• Pneus</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Input do condutor</li></ul>

**Tabela 2.1** - Movimentos principais na Dinâmica Lateral de um Motociclo. Adaptado de (2)

## 2.4 Sistema de Suspensão Dianteira

Os sistemas de suspensão nos motocicletas foram introduzidos entre 1930 e 1940, desde então, um grande número de arquiteturas/designs e modelos cinemáticos têm sido propostos.

A suspensão de um motociclo tem uma dupla finalidade: contribuir para o manuseio e travagem do veículo, e proporcionar segurança e conforto mantendo os passageiros do veículo confortavelmente isolados do ruído, impacto e vibrações da estrada.

Um motociclo sem suspensão movendo-se sobre um piso irregular apresenta dificuldades de direção devido à perda de aderência das rodas na estrada e ao desconforto do condutor. Pequenos solavancos na estrada são facilmente absorvidos pelos pneus, mas para uma adequada absorção de solavancos maiores, um motociclo precisa de uma adequada suspensão.

A suspensão tem de satisfazer os três seguintes propósitos:

- Permitir às rodas seguir o perfil da estrada sem transmitir excessivas vibrações ao condutor. Este propósito relaciona-se com o conforto do condutor, isolando a massa suspensa da vibração gerada pela interação das rodas com as irregularidades da estrada;
- Garantir a aderência das rodas no plano da estrada com o intuito de transmitir as forças de travagem, laterais e motrizes necessárias;
- Assegurar o equilíbrio pretendido do veículo sob várias condições de funcionamento (aceleração, travagem, entrar e sair de curvas).

O grau de conforto requerido varia de acordo com o uso do motociclo. Por exemplo, nos veículos de corrida, o conforto é menos importante do que a capacidade do motociclo manter as rodas em contacto com o piso e assumir o equilíbrio desejado.

Contudo, noutro tipo de veículos a suspensão é esperada para servir outros propósitos. Por exemplo, em motocicletas *off-road* a suspensão serve para isolar a massa suspensa dos contínuos impactos gerados pelos saltos do veículo.

Perante uma travagem, a suspensão dianteira pode ser chamada a suportar 100% do peso do veículo, adicionando a isto as forças de travagem, a carga estática da suspensão irá quase triplicar. Enquanto tem esta função, terá de ser também capaz de absorver os choques provenientes das irregularidades do piso/estrada.

Existem quatro parâmetros principais que afetam a performance de uma suspensão:

- Mola;
- Amortecedor;
- Massa suspensa e não suspensa;
- Características do pneu.

## Mola

Tendo em conta o propósito de uma suspensão, a característica mais importante de uma mola é a sua constante elástica. É uma medida da sua rigidez e é determinada pela força extra necessária para comprimir a mola uma certa distância. A constante elástica pode ser expressa em N/mm e no sistema imperial de medida é usualmente expressa em lbf/inch.

Portanto, numa mola com uma constante igual a 10 N/mm, será necessário exercer uma força extra de 100 N para a mola comprimir 10 mm. As molas mais comuns são as helicoidais feitas em aço.

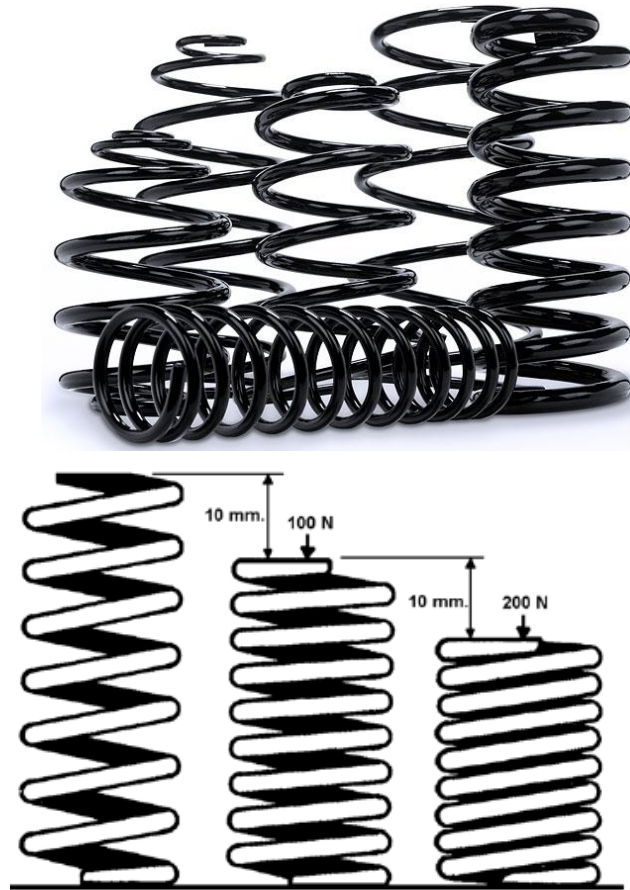


Figura 2.8 - Exemplos de molas helicoidais

## Amortecedor

Um amortecedor é, de um ponto de vista simples, um absorvedor de energia. O movimento do amortecedor provoca resistência mecânica, mas ao contrário das molas, não tem tendência para retomar a sua posição inicial, e portanto utiliza trabalho ou energia, que é dissipada sob a forma de calor. Esta perda de energia é necessária para prevenir oscilações não controladas da suspensão. Vamos supor que um grande solavanco na estrada comprimiu totalmente o amortecedor, nesse instante, a energia é armazenada na mola como energia potencial. À medida que a mola retorna ao seu comprimento estático, esta energia é transferida, que caso não houvesse amortecimento, seria totalmente transferida para a massa do motociclo, sob a

forma de energia cinética. Isto faria com que a suspensão se estendesse para além da sua posição normal.

A introdução do amortecimento irá absorver uma parte ou a totalidade da energia transmitida para a suspensão pelas irregularidades da estrada e, conseqüentemente, a oscilação irá ser reduzida ou eliminada, dependendo do grau de amortecimento. Como a energia absorvida pelo amortecedor é transformada em calor. Suspensões como as dos motociclos de motocross poderão por vezes sobreaquecer.

### Massa suspensa e não suspensa

Um motociclo com suspensão, desde um ponto de vista dinâmico, pode ser considerado como um corpo rígido conectado às rodas com sistemas elásticos (suspensão dianteira e traseira). O corpo rígido constitui a massa suspensa (chassis, motor, coluna de direção, condutor), enquanto as massas ligadas às rodas são chamadas massas não suspensas.

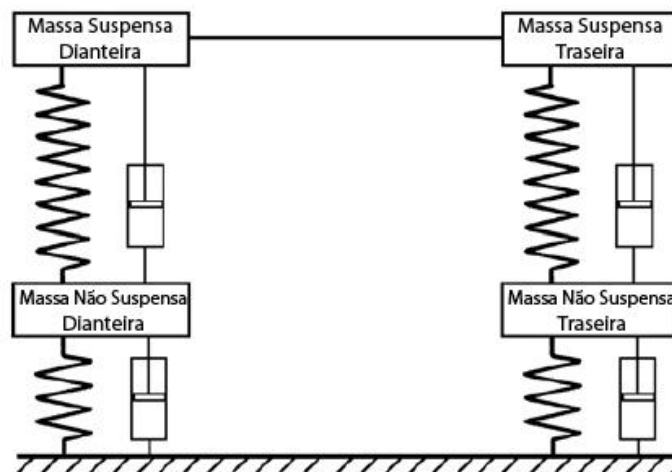


Figura 2.9 - Modelo de Sistema de Suspensão de Motociclo. Adaptado de (6)

### Pneus

Os pneus têm uma grande influência na manipulação dos motociclos. Geram as forças laterais necessárias para as viragens e equilíbrio, através de uma combinação das forças de viragem e de impulso. A pressão de enchimento de um pneu, também é considerada uma variável importante para o comportamento do motociclo



Figura 2.10 - Exemplo de pneu de motociclo

O sistema de suspensão dianteira mais generalizado é o de forquilha telescópica. Este termo é utilizado porque os tubos deslizam para dentro e para fora do corpo, tal como um telescópio. Os garfos podem ser mais facilmente entendidos como grandes amortecedores hidráulicos com molas internas. Permitem à roda da frente reagir às imperfeições da estrada enquanto isolam o resto do motociclo daquele movimento. Os tubos do garfo devem ser lisos e com um bom acabamento superficial, de modo reduzir o atrito, sendo a vedação do óleo feita por vedante e raspador.

A parte superior dos garfos está ligada ao quadro do motociclo através do “*triple clamp*” superior e inferior, também conhecido por mesa de direção superior e inferior, permitindo uma ligação entre os garfos a fim de orientar o motociclo.

A maioria dos motociclos tem “*triple clamps*” superiores e inferiores, fornecendo dois pontos sólidos de fixação da forquilha ao quadro.

A parte inferior dos garfos/forquilhas está ligada ao eixo da frente em torno do qual a roda dianteira gira.

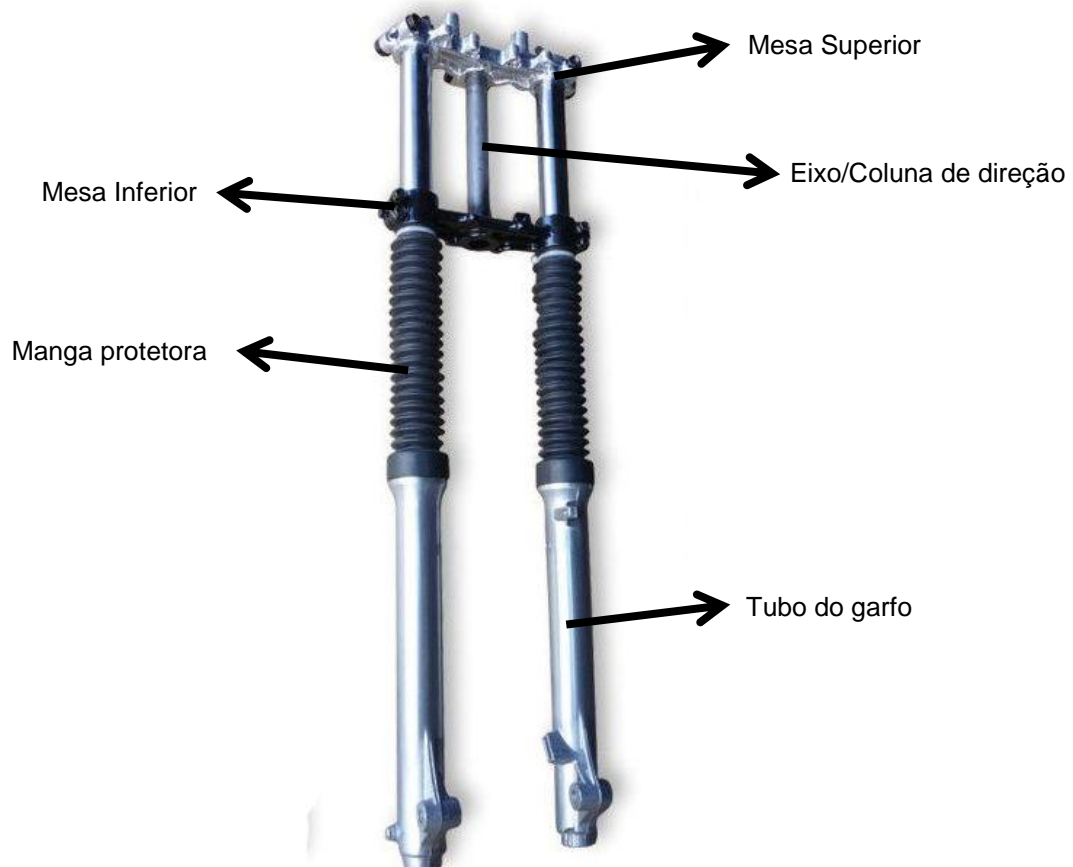


Figura 2.11 - Suspensão de forquilha telescópica

A forquilha telescópica é caracterizada pela baixa inércia em volta do eixo da coluna de direção. A sua grande desvantagem é representada pelas elevadas forças de atrito encontradas quando são aplicadas forças ortogonais ao eixo sobre o qual os tubos deslizam – por exemplo, durante as travagens e curvas.

Duas limitações da forquilha telescópica são a impossibilidade de atingir valores de força/deslocamento progressivos e os elevados valores da massa sem suspensão que é parte integral da roda.



**Figura 2.12** - Motociclo com Suspensão de Forquilha Telescópica

### 2.4.1 “Triple Clamps”

Tal como dito anteriormente, os “*triple clamps*” conectam os tubos da forquilha ao quadro do motociclo, fornecendo dois pontos sólidos de fixação da forquilha ao quadro.

#### Principais especificações

- Largura da forquilha / Distância entre tubos da forquilha;
- Diâmetro dos tubos da forquilha;
- Diâmetro do eixo da coluna de direção;
- *Offset*.
- Distância para a coluna de direção

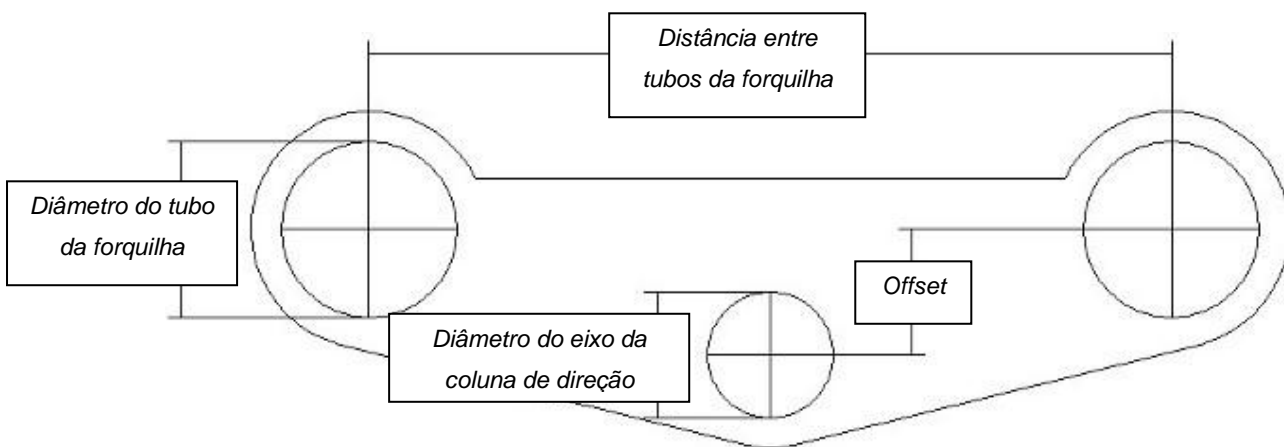


Figura 2.13 – Principais especificações de um Triple Clamp

De forma a compreender melhor a importância dos *triple clamps* e de como se pode ajustar o desempenho de um motociclo através deles, é importante referir alguns parâmetros geométricos importantes tais como, “*Rake*” ou ângulo da forquilha, “*Trail*” e “*Offset*”. Estes parâmetros são estabelecidos pela forquilha e os seus pontos de fixação no quadro.

“**Rake**” – é definido como o ângulo entre o eixo vertical e o eixo da direção. O ângulo de inclinação tem efeito na direção, quanto menor for o “*rake*”, mais fácil será o motociclo virar, mas será menos estável em linha reta.

“**Trail**” – é a distância medida no solo entre uma linha reta traçada através do centro do eixo da roda dianteira e uma linha traçada através do eixo do cabeçote da direção. Quanto maior for o “*Trail*”, maior será a estabilidade em linha reta, contudo será mais difícil efetuar viragens.

“**Offset**” - é a distância entre uma linha traçada através do centro do eixo da haste de direção/cabeçote e a linha de centro dos tubos do garfo dianteiro. Quanto maior for o “*offset*”, menor vai ser o “*trail*”.

A seguinte ilustração mostra cada uma destas medidas.

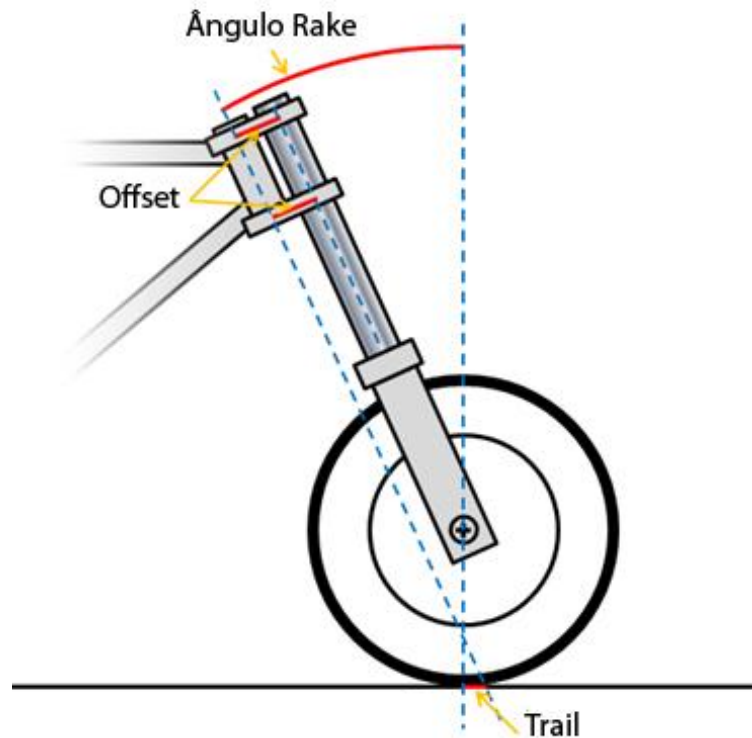


Figura 2.14 - Rake, offset e trail de um motociclo. Adaptado de (7)

#### Relação entre “offset”, “trail” e “rake”

- Se aumentar o “rake”, o “trail” aumenta e vice-versa;
- Se aumentar o “offset” para ambos os “triple clamps”, o “trail” diminui;
- Se aumentar o “offset” apenas do “triple clamp” superior, o “trail” aumenta;
- Se aumentar o “offset” apenas do “triple clamp” inferior, o “trail” diminui. (7)

A conjugação destes 3 parâmetros permite alterar as características de estabilidade e direção do motociclo conforme a utilização que se vai dar a este e as preferências do condutor. Podem ser consultadas mais informações sobre estes parâmetros geométricos no **ANEXO A**.

Este componente permite melhorar o manuseio do motociclo através da alteração do *offset*, ajustando-se às necessidades do condutor. Também permitem uma melhor absorção dos choques e das vibrações que caso contrário iriam ser transmitidas para as mãos do condutor. Esta diminuição das vibrações possibilita uma menor fadiga nos braços e conseqüentemente uma melhor sensação de condução.



Figura 2.15 - Exemplos de triple clamps

## 2.5 Materiais Compósitos e substituição do Alumínio

A competição entre diferentes tipos de materiais é um processo contínuo que ocorre desde os primórdios da civilização, à medida que, em função das suas necessidades, o homem iniciou a transformação de materiais em ferramentas e utensílios.

Foi a partir da década de 1960 que os compósitos – materiais constituídos por dois ou mais componentes com propriedades físicas e químicas distintas – começaram a ser utilizados no fabrico de componentes. Porém, nessa época, alguns sectores da indústria ainda impunham restrições quanto ao seu uso. Com o passar dos anos e evolução das tecnologias, os materiais compósitos ganharam o seu espaço e passaram a ser aplicados na produção de peças estruturais para diferentes segmentos da indústria.

Entre as vantagens de se utilizar peças produzidas com estes materiais está a redução de peso, considerado um diferencial estratégico no fabrico de um automóvel, motociclo ou avião, uma vez que, influencia diretamente o desempenho do veículo, permitindo maior velocidade e menor consumo durante a sua utilização. Devido a esta e outras vantagens, a produção e utilização de compósitos cresce a cada dia.

A potencial substituição de alumínio por um material compósito é uma tarefa desafiante, considerando a elevada eficácia estrutural do componente metálico original. O uso de materiais compósitos no processo de fabrico de componentes estruturais para veículos está a ter um lento mas contínuo crescimento desde a sua introdução. No campo das aplicações aeroespaciais, o uso de compósitos está a experienciar um incremento acentuado com a futura geração de aviões comerciais, tais como o Airbus A350 e o Boeing 787, onde os compósitos são largamente adotados em estruturas primárias. A substituição do alumínio por compósitos poliméricos estruturais, por exemplo, permite uma redução de peso de 20 a 30%, além de 25% na redução do custo final de obtenção das peças. (8)

### 2.5.1 O que é um material compósito?

Materiais compósitos são materiais feitos a partir de dois ou mais materiais constituintes com diferenças significativas a nível de propriedades físicas ou químicas. Separadamente os constituintes do compósito mantêm as suas características, porém quando misturados formam um composto com propriedades impossíveis de se obter com apenas um deles.

Os materiais que podem compor um material compósito podem ser classificados em dois tipos: matriz e reforço.

- O material da matriz é o que confere estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios que ficam entres os materiais de reforço e mantendo-os nas suas posições relativas;
- Os materiais de reforço ou fibras são os que realçam as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do material compósito como um todo.

<i>Matriz</i>		<i>Reforço</i>	
Orgânica (PMC's– Polymer Matrix Composites)	Polímeros Termoplásticos  Polímeros Termoendurecíveis	Mineral	- Fibra de vidro  - Fibra de Carbono
		Orgânico	- Aramida  - Poliamida
		Metálico	- Boro  - Alumínio
Metálica (MMC's– Metal Matrix Composites)	Ligas leves de Alumínio, Magnésio, Titânio	Mineral	- Carbono  - Carboneto de silício
		Metálico	- Boro
		Misto	- Boro revestido com Carboneto de Silício
Cerâmica (CMC's–Ceramic Matrix Composites)		Mineral	Carbonetos
		Metálica	Boro ou Tungstênio

**Tabela 2.2 - Tipos de Materiais Compósitos (9)**

O principal objetivo de se produzirem compósitos é o de combinar diversos materiais para se produzir um único com propriedades superiores às dos componentes isolados, pelo que a combinação dos materiais constituintes é decidida a partir da aplicação específica que se pretende dar ao material compósito.

A conceção deste tipo de materiais é milenar: existem referências escritas sobre a utilização de argila reforçada com palha em tijolos no Antigo Egipto. No século XIX já se utilizavam barras de ferro para reforçar alvenarias, abrindo-se assim o caminho para o desenvolvimento do betão armado. Nos anos 40 do século XX generalizou-se a utilização de plásticos reforçados em componentes elétricos. A partir de 1960 desenvolveram-se as fibras de carbono que foram a partir de 1968 aplicadas em aviões.

A combinação dos materiais depende da aplicação específica que se pretende do material compósito e a relativa importância de vários fatores tais como:

- Resistência à corrosão;
- Rigidez;
- Peso;
- Resistência à fadiga;
- Expansão térmica;
- Propriedades eletromagnéticas;
- Condutibilidade térmica;

- Comportamento acústico;
- Aspeto.

As elevadas resistência e rigidez específicas continuam a ser a combinação que lança os materiais compósitos para novas áreas, sendo a grande capacidade de amortecimento e o baixo coeficiente de expansão térmica, características que podem ser adaptadas para aplicações específicas. Os designados compósitos avançados permitem reduzir os problemas de fadiga, possibilitando uma maior flexibilidade no projeto e nos processos de fabrico. Outras vantagens dos compósitos são a resistência a temperaturas extremas, à corrosão e ao desgaste que podem conduzir a custos mais baixos do ciclo de vida do produto.

### Matriz

A matriz de um material compósito deve, para além de manter a coesão das fibras, garantir as seguintes funções:

- Proteger as fibras do meio envolvente;
- Proteger as fibras do dano durante o manuseamento;
- Distribuir o carregamento pelas fibras;
- Redistribuir o carregamento pelas fibras resistentes em caso de rutura.

Na **TABELA 2.3** apresentam-se os principais requisitos do material da matriz.

Propriedades Mecânicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistência à tracção elevada</li> <li>- Ductilidade</li> <li>- Resistência ao corte</li> <li>- Tenacidade</li> <li>- Resistência ao impacto</li> </ul>
Propriedades Térmicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistência a temperaturas extremas</li> <li>- Coeficiente de dilatação térmica próxima do da fibra</li> <li>- Baixa condutividade térmica</li> </ul>
Propriedades Químicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa adesão às fibras</li> <li>- Resistência à degradação em ambientes quimicamente agressivos</li> <li>- Baixa absorção de humidade</li> </ul>
Outras Propriedades	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo</li> <li>- Solidificação ou cura rápidas</li> </ul>

**Tabela 2.3** - Principais requisitos de uma matriz (9)

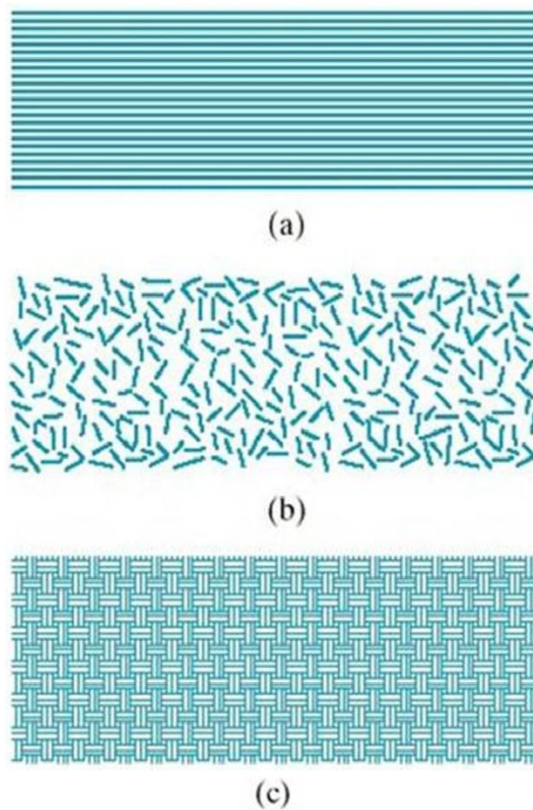
## Fibras

Consistem em milhares de filamentos, cada filamento com diâmetro entre 5 e 15 micrómetros, permitindo a sua produção em equipamentos do sector têxtil. As fibras podem ser encontradas em duas formas:

- Fibras curtas;
- Fibras contínuas.

Alguns arranjos típicos de fibras nos materiais compósitos:

- a) Fibras unidirecionais contínuas;
- b) Fibras descontínuas orientadas de modo aleatório;
- c) Fibras unidirecionais tecidas ortogonalmente.



**Figura 2.16 - Arranjos típicos de fibras (10)**

Principais materiais usados nas fibras

- Vidro;
- Aramida ou Kevlar (muito leve);
- Carbono;
- Boro;
- Carboneto de silício (resistência a elevadas temperaturas);
- Fibras naturais.

### 2.5.2 Interesse no uso de materiais compósitos

Por exemplo, no domínio da aviação comercial, as principais preocupações dos fabricantes de aviões são a performance e os fatores económicos. As principais características de um material compósito incluem:

- Redução de peso que leva a uma redução no consumo de combustível;
- Aumento das cargas a utilizar;
- Boa resistência à fadiga, que leva a uma vida mais prolongada, envolvendo uma redução no custo a longo termo do produto;
- Boa resistência à corrosão, significando menos necessidade de inspeção e consequente redução na manutenção. Exceto no caso de contacto do alumínio com fibras de carbono, onde uma reação galvânica provoca rápida corrosão;
- Não apresentam cedência (os limites elásticos correspondem aos de rutura);
- Não são sensíveis à maioria dos químicos usados em motores: lubrificantes, óleo, tintas e solventes, petróleo, etc...
- Apresentam uma excelente resistência ao fogo. Contudo, o fumo emitido pela combustão de algumas matrizes pode ser tóxico. (11)

### 2.5.3 Exemplos de substituição de soluções convencionais por materiais compósitos

A seguinte tabela mostra alguns casos significativos que ilustram as melhorias a nível de preço e performance que podem ser obtidas depois da substituição de uma determinada solução convencional por materiais compósitos.

Aplicação	Solução convencional	Solução em Compósitos
Estabilizador para helicóptero	Ligas leves + Aço = 16 kg	Carbono/epoxy = 9 kg
Guincho de suporte para helicóptero	Aço soldado = 16 kg	Carbono/epoxy = 11 kg
Cabeça de robot para soldar	Alumínio = 6 kg	Carbono/epoxy = 3 kg
Mesa X-Y para fabrico de circuitos integrados	Alumínio fundido Taxa de fabrico = 30 placas/hora	Carbono/epoxy estrutura honeycomb Taxa de fabrico = 55 placas/hora

**Tabela 2.4** - Exemplos de substituição de soluções convencionais por materiais compósitos. Adaptado de (11)

## 2.5.4 Exemplos de aplicação dos compósitos

- Capacete (kevlar) de proteção individual de algumas forças militares;
- Colete à prova de bala (kevlar);
- Betão armado (cimento e aço);
- Bicicletas (carbono);
- Varas (salto com vara);
- Alguns barcos de lazer (fibra de vidro ou carbono);
- Pranchas de Surf e windsurf;
- Pás dos helicópteros;
- Canas de Pesca (grafite ou carbono ou fibra de vidro);
- Raquetes de ténis;
- Indústria automóvel e aeroespacial

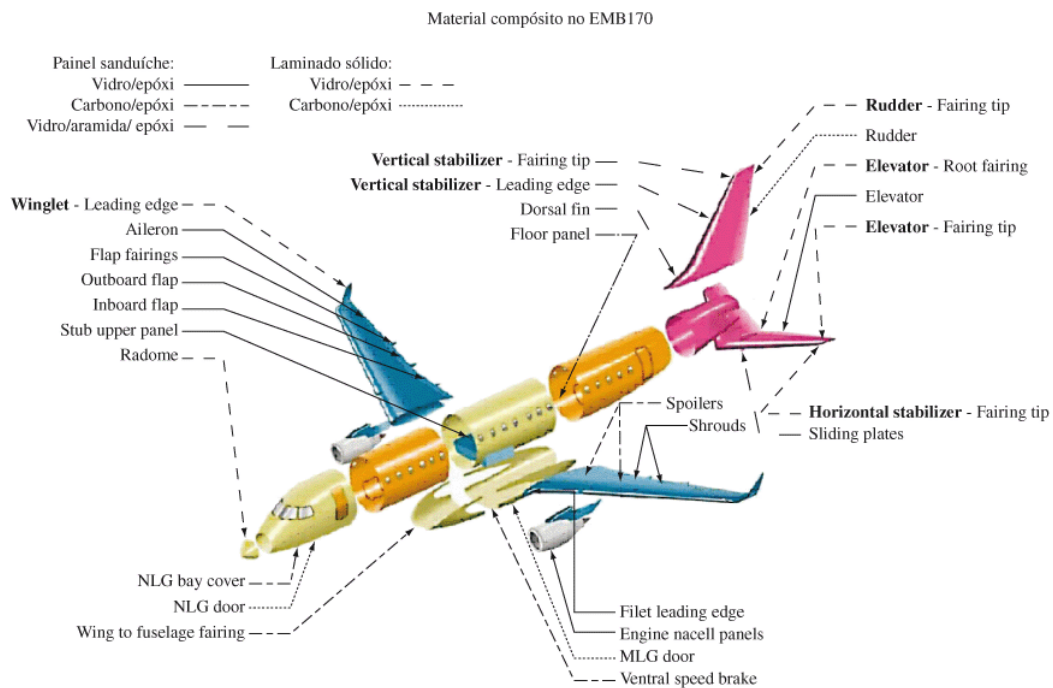


Figura 2.17 - Vista explodida do BEM-170, mostrando os componentes fabricados em compósitos poliméricos avançados (Embraer)

### 2.5.5 Substituição do alumínio por materiais compósitos

Os potenciais benefícios da introdução de compósitos na indústria automóvel e dos motociclos tem sido exaustivamente estudada em diversos estudos (12) e (13), explorando a possível adaptação das características do material e da sua elevada eficácia estrutural. A possibilidade de redução de peso entre 30% e 50 % no que diz respeito às clássicas soluções metálicas foi encontrada em várias aplicações, tais como eixos de transmissão, braços de suspensão e chassis de automóveis. Processos como **Sheet Moulding Compound** (SMC), **Resin Injection Moulding** (RIM) ou **Resin Transfer Moulding** (RTM), têm sido encontrados particularmente adequados para a produção em massa no campo automóvel. Estas tecnologias são também promissoras em termos de custo de produção, uma vez que permitem o fabrico de peças de grande porte apenas numa operação de moldação e pagar os custos iniciais mesmo para uma baixo/médio volume de produção (10 mil a 100 mil peças). Contudo, existem alguns autores que apontam o custo das matérias-primas como o principal obstáculo à difusão dos materiais compósitos na produção em massa. Existem outras limitações mencionadas tais como as exigências estéticas relevantes para a elevada qualidade do acabamento superficial para peças externas ou a necessidade de aumentar a quantidade de materiais reciclados. Para além disso, os compósitos tendem a desenvolver defeitos durante o seu fabrico e manuseio assim como delaminação devido a impactos com objetos estranhos ou detritos, o que pode levar a uma severa redução das suas propriedades de resistência. Estas limitações são a principal preocupação no uso de laminados compósitos em aplicações que exijam elevada performance mas também no seu fabrico em massa.

Por outro lado, custos de produção, reciclagem e redução do tempo de vida devido aos defeitos não são um ponto crítico para carros e motociclos desportivos. Por isso, componentes estruturais feitos a partir de compósitos laminados são largamente usados nesse contexto, onde permitem atingir uma superior eficiência estrutural.

Mais recentemente, a aplicação de compósitos reforçados com carbono em veículos desportivos de alto rendimento foi prosseguida pela concentração dos requisitos estruturais e processos de fabrico eficazes. Neste momento, podem-se ter duas considerações: crescente tendência pela substituição de componentes metálicos por componentes compósitos e as tecnologias e processos de fabrico emergentes tais como o RTM ou o VaRTm, que permitem uma mais rápida e menos dispendiosa produção. (8)

Uma das maneiras de substituir o alumínio por materiais compósitos é através da utilização de compostos de moldação constituídos por pré-impregnados com fibras curtas distribuídas aleatoriamente. Esta solução apresenta uma grande possibilidade de escolha a nível do tamanho e largura das fibras, flexibilidade na seleção da resina e eventualidade de serem feitas pré-formas. Oferecem outra forma de material a ser considerada pelos engenheiros ligados aos materiais compósitos. Algumas razões atrativas são a igualdade de performance, custos totais mais baixos, e uma mais fácil transição desde o alumínio comparando com os compósitos de

fibras contínuas. Este tipo de material tanto pode ser fornecido na forma de volume (na forma de fibras soltas) ou na forma de folha (tapete enrolado).



**Figura 2.18** - Pré-impregnado sob a forma de volume (esquerda) e sob a forma de folha (direita)

São tipicamente moldados a temperaturas constantes em moldes metálicos. A cura isotérmica otimiza o uso do equipamento através da eliminação do aquecimento e arrefecimento em rampa, associado aos pré-impregnados. Ao contrário da moldação em autoclave, o uso de moldes metálicos fornece superfícies dimensionalmente controladas em ambos os lados do componente. O ingrediente essencial para moldar este tipo de pré-impregnado é aplicar pressão ao composto de moldação de forma a que a resina e a fibra se movam como um só. Se a resina é demasiado espessa ou fina para fluir e mover a fibra, então o molde não será totalmente preenchido, resultando numa má qualidade do componente. Inversamente, no processo de autoclave para pré-impregnados de fibras contínuas é desejada a resina com mais baixa viscosidade de modo a que o ar aprisionado possa ser removido a baixas pressões. (14)

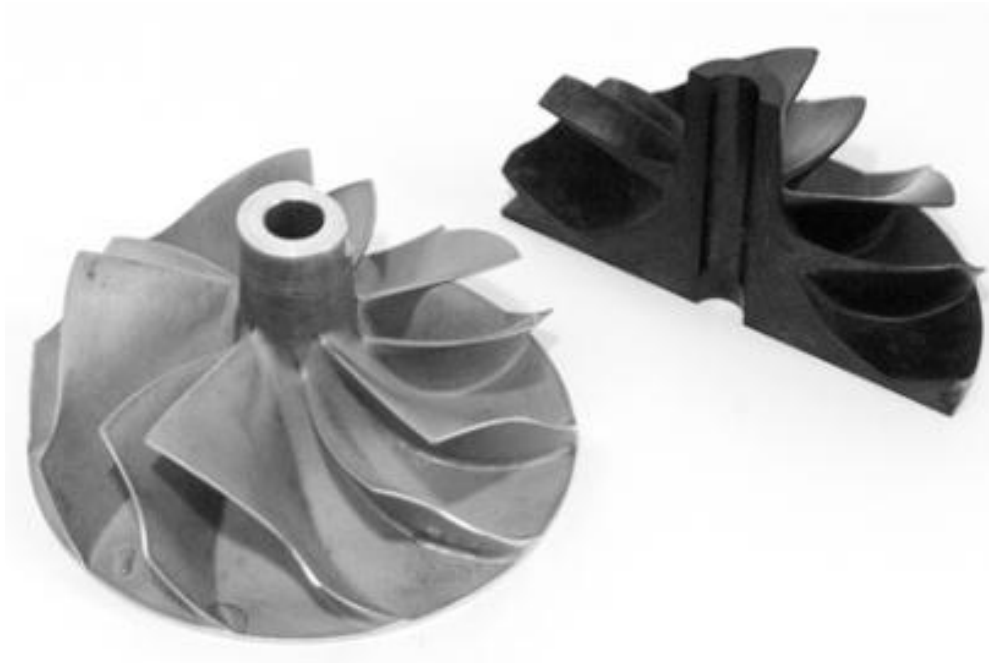
Componentes feitos desde pré-impregnados de fibras curtas unidirecionais apresentarão a mesma performance que compósitos de fibra contínuas processados por laminação manual “*hand layup*”, no que diz respeito a ações/efeitos inesperados. Muito do ganho de performance obtido nos pré-impregnados de fibra curta provém da sua baixa sensibilidade aos tradicionais efeitos inesperados (impacto, choque). Uma vez que os pré-impregnados de fibra curta têm falhas inerentes devido à concentração de tensões nas extremidades das fibras, as perdas adicionais de propriedades devido a furos, absorção de humidade, etc., são mínimas. Para além disto, esta forma de material pode ser transformada em formas geométricas complexas. (14)

Este tipo de material pode ter uma vantagem sobre os pré-impregnados de fibras contínuas orientadas quando se trata de produtividade do trabalho. Para geometrias simples é mais rápido criar um tapete de fibra curta distribuída aleatoriamente do que orientar um pré-impregnado de fibra contínua utilizado em moldação manual em vácuo. (14)

A nível de custos os pré-impregnados de fibra contínua apresentam duas operações exigentes (laminação, saco de vácuo e adesão das fibras), enquanto que os pré-impregnados

de fibras curtas apresentam duas operações menos rigorosas (fabrico do tapete e pré-forma). Para além disso, requisitos de pós-processamento, tais como, aparar as bordas, perfurar, instalar insertos, etc., podem ser atingidos através da moldação. Eliminar estas operações reduz ainda mais os custos, originando um custo global mais baixo. (14)

Os pré-impregnados de fibras curtas são mais adequados para a substituição do alumínio devido à sua capacidade de moldação 3D. É importante verificar algumas vantagens e desvantagens de design e processo de forma a alcançar o melhor custo final e performance do componente, contudo este processo é menos exigente que um processo de redesign total, sendo apenas necessário considerar algumas modificações menores na peça. (14)



**Figura 2.19** - Exemplo de substituição do alumínio por pré-impregnado de fibras curtas (14)

## 2.5.6 Processos de Fabrico de Compósitos de Matriz Polimérica

Da análise do artigo (8), foram encontrados os seguintes processos adequados à produção deste tipo de componente e que são apelativos na substituição do alumínio:

- Moldação por injeção com reação – **RIM** (*Resin Injection Moulding*);
- Moldação por transferência de resina – **RTM** (*Resin Transfer Moulding*);
- Moldação com compostos - **SMC** (*Sheet Moulding Compound*) e **BMC** (*Bulk Moulding Compound*).

### a) Moldação por injeção com reação – RIM

A moldação por injeção com reação também designada por moldação por reação líquida ou RIM consiste em:

- Misturar dois líquidos monoméricos reativos numa câmara de mistura;
- Injetar num molde fechado, sob baixa pressão, a mistura imediatamente a seguir;
- A polimerização e, geralmente, separação de fase, dá-se dentro do molde;
- Após solidificada, a peça é ejetada ou retirada do molde.

Existe uma variante deste processo que é o **RRIM** (*Reinforced Reaction Injection Moulding*). Nesta variante, introduzem-se fibras curtas num dos componentes reativos o que conduz à injeção de uma mistura pré-reforçada. Existe também o **SRIM** (*Structural Reaction Injection Moulding*), onde se introduzem fibras longas, na forma de mantas de fibra contínua, telas ou préformas, no interior do molde antes da injeção.

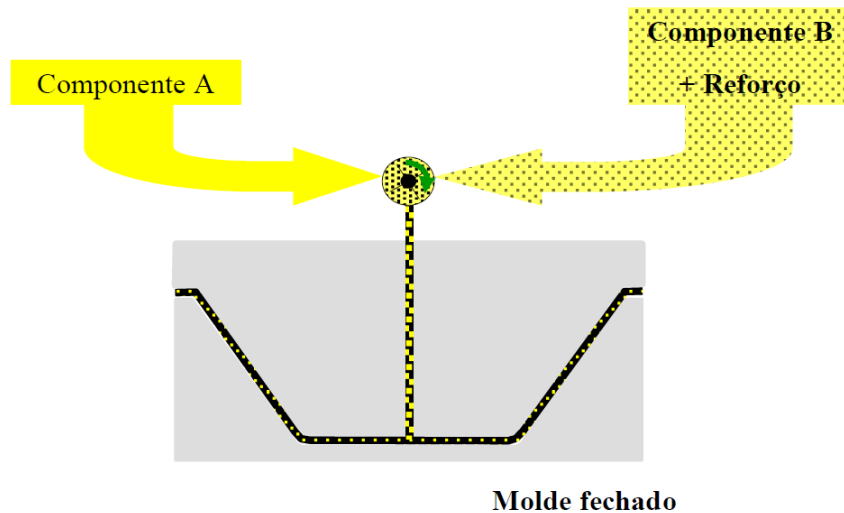


Figura 2.20 – Esquema do processo RRIM (15)

### Vantagens e desvantagens

- Produtividade elevada;
- O RRIM tem custos de mão-de-obra baixos mas propriedades mecânicas médias;

- O SRIM tem custos de mão-de-obra mais elevados mas boas propriedades mecânicas;
- Equipamento menos dispendioso que outros processos de cadência elevada.

### Aplicações

- O mercado automóvel representa o mais importante campo de aplicações para as peças obtidas por este processo, nomeadamente em painéis de instrumentos e em proteções inferiores do carro;
- Muitos componentes para camiões são também produzidos por RIM, tais como amortecedores, painéis frontais e grelhas;

### b) Moldação por transferência de resina - RTM

Alguns autores designam também o RTM, mais vulgarmente, por VaRTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding), o processo de molde aberto que designámos por moldação por injeção de resina.

### Descrição do processo

- Para um bom acabamento começa-se por aplicar uma camada de gel ao molde;
- O reforço preparado como pré-forma é montado no interior de uma moldação fechada;
- Fecha-se o molde que, em certos casos, pode ser aquecido;
- A resina com baixa viscosidade e misturada com um catalisador é injetada sob relativamente baixa pressão para o interior da cavidade; em certos casos aplica-se vácuo;
- Aguarda-se a cura da peça;
- Retira-se a peça.

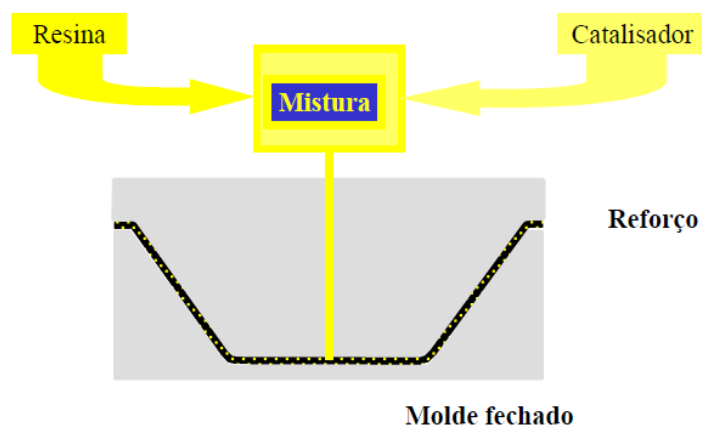


Figura 2.21 - Esquema do processo RTM (15)

### Vantagens

- Acabamento muito bom em ambas as superfícies;
- Obtenção de peças com formas complexas incluindo insertos e machos;
- Séries pequenas ou médias;

- Possibilidade de automação parcial;
- Espessura uniforme nas peças, podendo variar entre 0,5 e 9 mm;
- Baixa emissão de voláteis;
- Baixa porosidade;
- O reforço pode ser montado em pré-formas complexas com diversos tipos de fibra de formas comerciais;
- Possibilidade de obter peças com elevado teor em fibra.

### Desvantagens

- Moldes e ferramentas auxiliares são difíceis de projetar e mais caros do que os necessários para a moldação manual mas menos caros do que os usados em moldação em prensa;
- Necessita de bastante mão-de-obra;
- Dificuldade de prever o fluxo de enchimento;
- Limitações de dimensão;
- Necessidade de utilizar resina de baixa viscosidade;
- Percentagem de peças rejeitadas pode ser elevada, dado que o reforço pode mover-se no interior do molde;
- O processo não é fácil de automatizar.

### Aplicações

- Produção em séries pequenas ou médias de peças para carroçarias de camiões, reboques e contentores;
- Aplicado em materiais sanitários como, por exemplo, banheiras;
- Permite a produção de peças com dimensões médias.

### c) *Moldação com compostos SMC e BMC*

Composto em folha ou SMC é uma mistura de fibra de vidro ou carbono cortada (numa fração volúmica de 20% a 60%), com resina (numa fração mássica de cerca de 30%), com catalisadores, aditivos e cargas (material de enchimento), na forma de uma folha pré-impregnada e não aderente. O composto em folha inclui todos os componentes necessários para a moldação final.

O processo de moldagem por compressão em prensa, em moldes metálicos aquecidos, ou por injeção (menos vulgar) torna possível a produção de peças.

Existem três tipos de SMC:

1. **SMC STANDARD** – massa específica de  $1900 \text{ kg/m}^3$ ; redução de massa relativamente a peças equivalentes de aço da ordem dos 55%;
2. **SMC DE BAIXA DENSIDADE** – massa específica de  $1300 \text{ kg/m}^3$ ; usam-se esferas ocas de vidro como carga; redução de massa relativamente a peças equivalentes de aço da ordem dos 75%;
3. **SMC LITE** – massa específica de  $1600 \text{ kg/m}^3$  conseguida usando carboneto de cálcio como aditivo; redução de massa relativamente a peças equivalentes de aço da ordem dos 65%;

### Descrição do processo SMC

1. A fibra de vidro ou carbono é cortada a partir de fio (roving) em pedaços com comprimento entre 25 e 50 mm e misturado com resina e outros componentes;
2. A mistura é confinada entre duas camadas finas de plástico e compactada de forma a garantir a completa impregnação do reforço;
3. O conjunto é enrolado e os rolos são armazenados por alguns dias para permitir que o composto atinja uma viscosidade adequada.

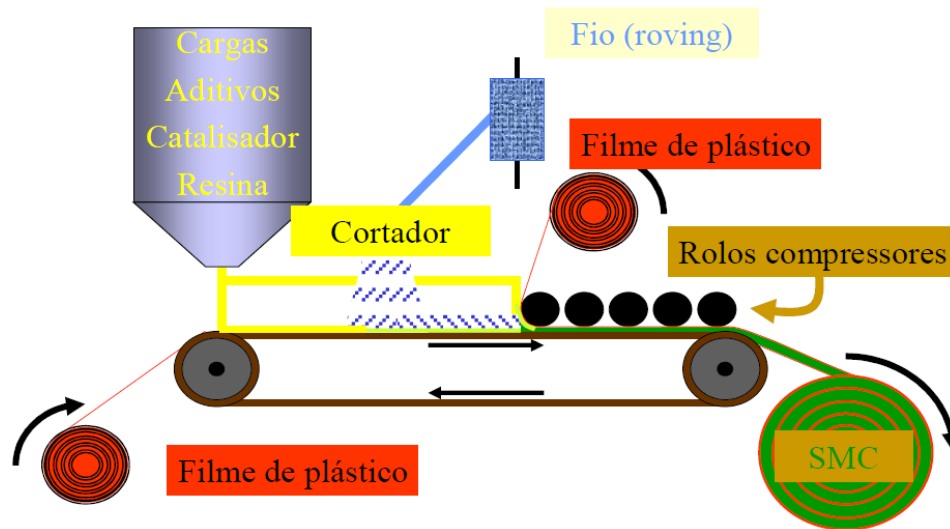


Figura 2.22 - Esquema do processo SMC (15)

O composto em volume ou BMC (bulk moulding compound) é uma mistura de fibra curta (6 a 12 mm) com resina e outros componentes secundários na forma de uma pasta muito viscosa. Ao contrário do SMC, não é necessário recorrer a uma fase de armazenamento o que torna o composto em volume mais adequado para a moldação por injeção. O material também pode ser processado por compressão em prensa com moldes metálicos aquecidos, de forma semelhante ao SMC.

Os compostos de BMC possuem normalmente baixos conteúdos de fibra de vidro (entre 10 a 20% em volume). O composto em volume (BMC) pode conter maior teor de cargas do que o composto em folha (SMC) o que torna uma opção mais económica mas com piores propriedades mecânicas. Como o material é usado no fabrico de peças complexas, geralmente nervuradas, a resistência mecânica das peças não é prejudicada.

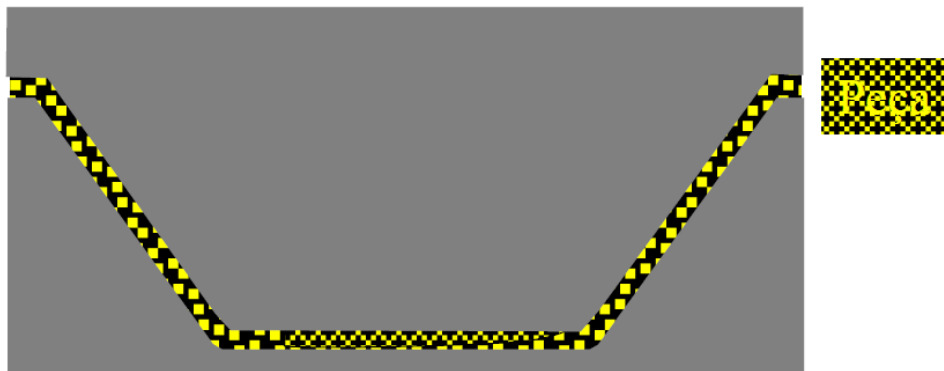
### Descrição do processo BMC

1. Inicialmente é introduzida a resina, os aditivos e as cargas num equipamento misturador;
2. A seguir é colocada a fibra que é misturada rapidamente para evitar a fratura destas;
3. O BMC pode ser imediatamente passado para a máquina de injeção ou para a prensa.

### Descrição da moldação em prensa

A moldação com compostos em prensa apresenta as seguintes etapas:

1. O composto (SMC (em folha) ou BMC (em volume)) é cortado no tamanho necessário para a peça e é pesado;
2. O composto é introduzido numa ferramenta aquecida entre 100°C e 175°C montada numa prensa;
3. A prensa é fechada exercendo uma pressão que varia entre 1 e 8 MPa de onde a força total variará entre 300 e 400 toneladas conforme a necessidade da peça e a capacidade da prensa;
4. Devido à pressão e à temperatura que lhe diminui a viscosidade, o composto é forçado a preencher todo o molde;
5. Aguarda-se a cura da peça que, vulgarmente varia entre menos de 1 e 5 minutos;
6. Abre-se a prensa e retira-se a peça manualmente ou com o auxílio de ejetores.



**SMC**

**Moldação fechada**

Figura 2.23 - Esquema do processo de moldação em prensa (15)

### Descrição da moldação por injeção

1. O composto em volume ou BMC é introduzido na forma de uma massa viscosa no alimentador da máquina de injeção;
2. Um atuador hidráulico ou um fuso de Arquimedes empurra a mistura através do corpo aquecido da máquina e injeta-a sob pressão (30 a 80 MPa) num molde fechado igualmente aquecido;
3. A mistura aquecida a uma temperatura próxima da temperatura de cura diminui a viscosidade e flui facilmente através dos canais de enchimento para a cavidade do molde;
4. O acumular de calor durante o processo é controlado de forma a minimizar o tempo de cura;
5. Após a cura e ejeção a peça necessita de poucos acabamentos.



Figura 2.24 - Esquema do processo de moldação por injeção (15)

#### Vantagens da moldação em prensa

- Peças com excelente acabamento superficial, baixo peso, elevada resistência mecânica e custo competitivo;
- Baixo custo de mão-de-obra;
- Processo pouco poluente uma vez que não existe nenhum tipo de solvente no ar durante a produção;
- Possibilidade de reciclar os produtos moldados em SMC;
- Possibilidade de séries elevadas (10000 a 200000 peças) com baixo investimento unitário em ferramentas.

#### Vantagens e desvantagens da moldação por injeção

- Cadência de produção elevada uma vez que o tempo injeção varia (tipicamente) entre 1 e 5 segundos;
- Elevado volume de peças produzidas (até 2000 peças pequenas por hora);
- Necessidade de poucos acabamentos;
- Qualidade mecânica do compósito limitada, mas compensada pela possibilidade de obter peças com exigências técnicas bem definidas nomeadamente com paredes de espessura variável, ângulos vivos e nervuras.

#### Aplicações da moldação em prensa

- Produção em grande escala de peças para carroçarias, ou componentes estruturais de automóveis, e caixas para equipamento elétrico e eletrónico;
- Crescentemente aplicada em sectores produtivos de materiais sanitários (banheiras) e de mobiliário urbano (cadeiras para estádios e cinemas), etc.;
- Geralmente aplicada em peças até  $1,5 m^2$ , muito embora se possa produzir peças maiores.

#### Aplicações de moldação por injeção

- Produção em grande escala de peças complexas para equipamentos elétricos e componentes para automóveis (uma aplicação importante do BMC são os faróis dianteiros);
- Produção de brinquedos para crianças;
- Geralmente aplicada em peças relativamente pequenas.

## 2.5.7 Processos de Fabrico do componente em Alumínio

Nesta secção do trabalho, serão introduzidos alguns dos processos de fabricos que são utilizados para a conceção do componente na sua solução original, ou seja, em alumínio. Estes processos incluem: forjamento, maquinagem e anodização.

### a) Forjamento

Forjamento é um processo de conformação, em geral a quente, que por compressão se obriga a matéria-prima a assumir a forma, contorno ou perfil da ferramenta conformadora, chamada matriz ou estampo. Por forjamento a frio produzem-se parafusos, porcas e engrenagens, entre outros. É um processo semelhante à conformação, diferenciado pelo fato de que este acontece por impacto. A matéria-prima é colocada na parte inferior do molde, então a parte superior desce em alta velocidade e atinge a matéria-prima.

Dependendo do tipo de processo adotado no forjamento, pode-se gerar mínima perda de material e boa precisão dimensional. Diversas técnicas produtivas são adotadas para se conseguir forjar peças e melhorar as características metalúrgicas, algumas dessas técnicas são milenares, com baixo grau tecnológico, caros e demorados e outras técnicas são de última geração. Nestas técnicas mais modernas é comum o uso de programas computacionais complexos, que proporcionam ganho de tempo e redução de desperdício de energia e material, conhecidos como CAD/CAM.

Quando as peças são forjadas procura-se alterar principalmente a elasticidade e a plasticidade dos metais.

No forjamento é fundamental ter precisão na quantidade de material. Pouco material implica falta de enchimento da cavidade. Muito material causa sobrecarga no molde, com a probabilidade de danos ao mesmo e na prensa.

Na maquinagem há uma perda em volume do material bastante elevada, já na conformação as perdas são de aproximadamente 6% em volume.

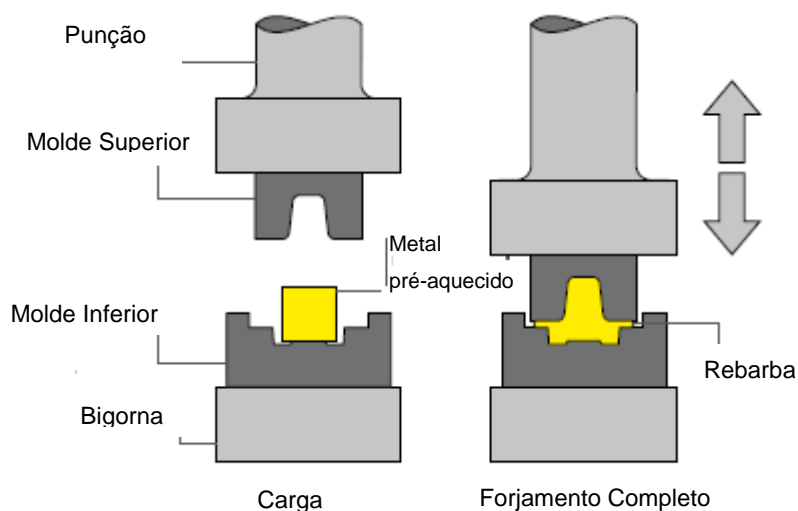


Figura 2.25 - Processo de forjamento

O forjamento pode ser a quente ou a frio. No forjamento a quente, o processo ocorre a uma temperatura acima da temperatura de recristalização do material. Na etapa de conformação final, ocorre a formação de rebarba, devido ao excesso de material. No forjamento convencional a quente o peso do forjado pode atingir o dobro do maquinado, e a rebarba representa de 20 a 40% do seu peso, aumentando os custos com a compra de material, sua manipulação, armazenagem, aquecimento até temperatura de forjamento e maquinagem para melhor acabamento superficial.

O processo de forjamento a quente geralmente começa pelo corte das barras, em guilhotina, para obtenção dos tarugos. Os tarugos passam por um forno contínuo para serem aquecidos e posteriormente forjados em prensa. O forjamento deverá ocorrer em duas ou mais etapas que permitam o preenchimento adequado das matrizes. As rebarbas do forjado são retiradas, numa operação de corte, imediatamente após o forjamento. Após o corte, os forjados são tratados termicamente para obter-se uma microestrutura adequada à maquinagem.

No forjamento a frio não há remoção de material, apresentando uma elevada precisão dimensional. Consiste num amassamento de um corpo rígido, que é levado a uma forma desejada pelo deslocamento relativo das partículas do material sólido. O volume do material que participa da conformação permanece inalterado, portanto não há perda de material.

**Defeitos no processo de forjamento:**

- Penetração incompleta do metal na cavidade da ferramenta. Isso altera o formato da peça e acontece quando são usados golpes rápidos e leves do martelo/punção;
- Fendas superficiais: causadas por trabalho excessivo na periferia da peça em temperatura baixa, ou por alguma fragilidade a quente;
- Fendas nas rebarbas: causadas pela presença de impurezas nos metais ou porque as rebarbas são pequenas. Elas iniciam-se nas rebarbas e podem penetrar na peça durante a operação de rebarbação;
- Fendas internas: originam-se no interior da peça, como consequência de tensões originadas por grandes deformações;
- Gotas frias: são descontinuidades originadas pela dobra de superfícies, sem a ocorrência de soldagem. Elas são causadas por fluxos anormais de material quente dentro das matrizes, incrustações de rebarbas, colocação inadequada do material na matriz;
- Incrustações de óxidos: causadas pela camada de óxidos que se formam durante o aquecimento. Essas incrustações normalmente desprendem-se, mas ocasionalmente, podem ficar presas nas peças;
- Descarbonização: caracteriza-se pela perda de carbono na superfície do aço, causada pelo aquecimento do metal;
- Queima: gases oxidantes penetram nos limites dos contornos dos grãos, formando películas de óxidos. É causada pelo aquecimento próximo ao ponto de fusão.

**Vantagens do processo de forjamento:**

- Controlando a deformação durante o processo de forjamento, pode-se melhorar as propriedades mecânicas da peça produzindo um alinhamento direcional, melhorando assim propriedades de tensões, ductilidade, impacto e resistência a fadiga.

**Desvantagens do processo de forjamento:**

- As peças a serem forjadas geralmente necessitam de maquinagem depois do processo de forjamento
- Os equipamentos são muito caros

**b) Maquinagem**

As peças fabricadas por fundição ou conformação podem em alguns casos ser produzidas com as dimensões finais ou próximas da final, mas normalmente estas peças precisam sofrer operações complementares para chegar às dimensões finais com a tolerância dimensional especificada. A tolerância é utilizada para garantir a funcionalidade do produto e principalmente permitir o intercâmbio das peças. De um modo geral, os processos de fundição ou conformação não podem produzir de forma economicamente viável o produto na sua totalidade. Um aspeto importante na seleção de processos de fabrico é determinar as partes a serem geradas em cada processo e com que tolerância, de modo a minimizar os custos de fabrico.

A maquinagem propriamente dita, é um processo de fabrico com arranque de apara. Este processo permite a produção de peças com formas complexas, com apertadas tolerâncias geométricas e dimensionais e também com um bom acabamento superficial.

A utilização da tecnologia CAD-CAM, aceleraram o fabrico e também, tornam o processo de maquinagem mais flexível, facilitando alterações de projeto ou fabrico adequadas às necessidades de componente.



**Figura 2.26 - Sequência de operações CAD-CAM**

Os processos de maquinagem possuem as seguintes vantagens:

- São relativamente mais precisos que os processos de conformação e fundição;
- Podem produzir geometrias complexas que são difíceis de serem obtidas por outros processos;
- São adequados para operações posteriores aos tratamentos térmicos, para corrigir distorções causadas por estes;
- Podem gerar superfícies com padrões especiais;
- Dependendo do tamanho do lote, para lotes pequenos é mais económico produzir as peças por maquinagem.

Por outro lado apresenta as seguintes limitações ou desvantagens:

- Maior gasto de matéria-prima, trabalho, tempo e energia;
- Não melhora e pode até degradar as propriedades mecânicas da peça.

### **c) Anodização**

A anodização consiste num processo eletrolítico. O metal a anodizar é ligado a um polo elétrico positivo e mergulhado num banho eletrolítico. Neste processo, o metal a anodizar é transformado no ânodo eletrolítico, formando-se à sua superfície um óxido que será a película protetora. O polo negativo é ligado a uma peça de carbono, aço inoxidável ou outro metal não sensível à reação (cátodo). Este processo de anodização pode ser aplicado a vários metais. A anodização do alumínio conduz à formação do óxido de alumínio convertendo a superfície do alumínio numa superfície extremamente dura com as seguintes propriedades:

- Resistência à corrosão;
- Resistência à abrasão;
- Dureza;
- Resistência à água;
- Resistência elétrica. (16)

Este tipo de processo é utilizado em alguns tipos de “*triple clamps*”, de modo a melhorar a sua durabilidade, qualidade superficial e estética. A maior parte dos produtos anodizados têm um tempo de vida extremamente longo oferecendo vantagens significativas do ponto de vista económico e de manutenção. O exterior da camada anódica é bastante estável aos raios ultravioleta sem lascar nem descascar. A anodização oferece um largo leque de polimentos e de colorações. A anodização do alumínio permite manter o aspeto metálico da peça. (16)

**Aplicações típicas:**

- Indústria automóvel;
- Construção de edifícios;
- Aviação;
- Joalharia;
- Eletrónica;
- Armamento;
- Marinha;
- Aparelhagem médica;
- Indústria têxtil.



**Figura 2.27** - Exemplo de triple clamp anodizados



**Figura 2.28** - Exemplo de componentes anodizados

### 3 Projeto e Simulação Numérica

O design de um Triple Clamp em materiais compósitos é um compromisso entre a tecnologia inerente aos processos de fabrico e as propriedades mecânicas do material.

A indústria automóvel e dos motociclos é uma área onde o baixo peso tem um grande significado e valor. Os meios de transporte rápidos e modernos são geralmente sinónimo de estruturas leves, frequentemente feitas de alumínio. A redução de peso resulta em reduzidos consumos de combustível, velocidades mais elevadas, maiores cargas suportadas e um reduzido impacto ambiental. Contudo, um sistema estrutural efetivo também impõe grandes exigências no que diz respeito à resistência do material e plasticidade, no facto de ser fácil de unir/juntar, a tratamentos de superfície, absorção de energia aquando de impactos, resistência à corrosão e muito mais. Muitos passos podem ser dados para melhorar o consumo de combustível e reduzir emissões tóxicas, mas a grande contribuição hoje em dia ainda vem da redução de peso nas estruturas e componentes.

Devem ser considerados os seguintes requisitos no design/produção de um triple clamp:

- Redução massa
- Resistência ao impacto
- Resistência à fadiga
- Redução vibrações
- Processo de fabrico
- Etapas de produção
- Tempo produção
- Custo produção
- Custo final

Este capítulo será dividido da seguinte forma:

- Análise de forças num motociclo;
- Estudo/simulação do componente original em alumínio;
- Escolha do material compósito;
- Análise do componente com o material escolhido;
- Identificação e análise das frequências naturais;
- Considerações de projeto.

### 3.1 Análise de Forças num Motociclo

Um trabalho deste género pode tomar muito tempo com diversas pessoas a trabalhar nele, uma vez que existem vários conceitos e soluções a serem estudadas, tais como, geometria, cinemática, dinâmica, impacto...

Portanto, neste projeto vão ser tomadas algumas hipóteses simplificativas de forma a poder ser atingido o objetivo do trabalho.

#### Hipóteses simplificativas:

- Considerar suspensão rígida. Apesar de assim o valor das forças que atuam nos triple clamps serem maiores, uma vez que a suspensão não está a funcionar, o componente vai ser verificado em condições críticas. Logo se corresponder nestas condições, certamente irá corresponder em circunstâncias normais;
- Todas as massas do motociclo estão concentradas no centro de gravidade deste. O centro de gravidade do motociclo será igual ao do quadro;
- O centro de gravidade nunca está fixo, uma vez que o condutor se mexe durante a sua condução. Quando está a acelerar vai para a parte traseira, enquanto aquando da travagem transfere-se para a parte dianteira, além disso durante as curvas/viragens é transferido para baixo. Também o nível de combustível afeta o centro de gravidade. Neste projeto, o centro de gravidade irá ser considerado constante;
- A transferência de carga durante a aceleração e travagem é considerada constante;
- O piso é considerado plano e em boas condições, por isso as forças produzidas por irregularidades na estrada não vão ser tidas em conta porque são muito difíceis de caracterizar e cada uma tem a sua particularidade específica.

Para o cálculo das forças externas foram estudadas as seguintes situações:

- Aceleração Máxima;
- Travagem máxima na roda dianteira;
- Travagem máxima na roda traseira;
- Quando a moto está dentro da curva com limite de aderência dos pneus.

### 3.1.1 Aceleração Máxima

Algumas hipóteses particulares serão consideradas nesta parte:

- A força de resistência ao rolamento é zero;
- A força de sustentação aerodinâmica também é considerada zero;
- A superfície da estrada é plana.

A aceleração máxima ocorre quando no limite a roda traseira começa a perder o contacto com o piso. A partir deste momento duas vias podem ser seguidas:

- O motociclo gira em torno do ponto de contacto traseiro se este limite não for ultrapassado;
- O momento antes de a roda traseira começar a deslizar., é o momento em que a roda dianteira perde contacto com o piso.

As seguintes forças atuam num motociclo:

- O peso  $mg$  atua no seu centro de gravidade;
- A força motriz  $T$ , que o piso aplica ao motociclo no ponto de contacto com a roda traseira;
- As forças de reação verticais  $N_d$  e  $N_t$  trocadas entre os pneus e o plano do piso/estrada.

Carga dinâmica na roda dianteira:

$$N_d = N_{sd} - N_{tr} = mg \times \frac{b}{p} - T \times \frac{h}{p} \quad (3.1)$$

Carga dinâmica na roda traseira:

$$N_t = N_{st} - N_{tr} = mg \times \frac{p-b}{p} - T \times \frac{h}{p} \quad (3.2)$$

As forças de reação verticais são compostas por dois elementos:

- O primeiro termo (carga estática na roda) depende da distribuição do peso:

$$N_{sd} = mg \times \frac{b}{p} \quad (3.3)$$

$$N_{st} = mg \times \frac{p-b}{p} \quad (3.4)$$

- O segundo termo (transferência de carga), é diretamente proporcional à força motriz  $T$  e à altura  $h$  do centro de gravidade, e inversamente proporcional à distância entre eixos  $p$ .

$$N_{tr} = T \times \frac{h}{p} \quad (3.5)$$

A relação normal  $\frac{h}{p}$  num motociclo varia entre 0,3 e 0,45.

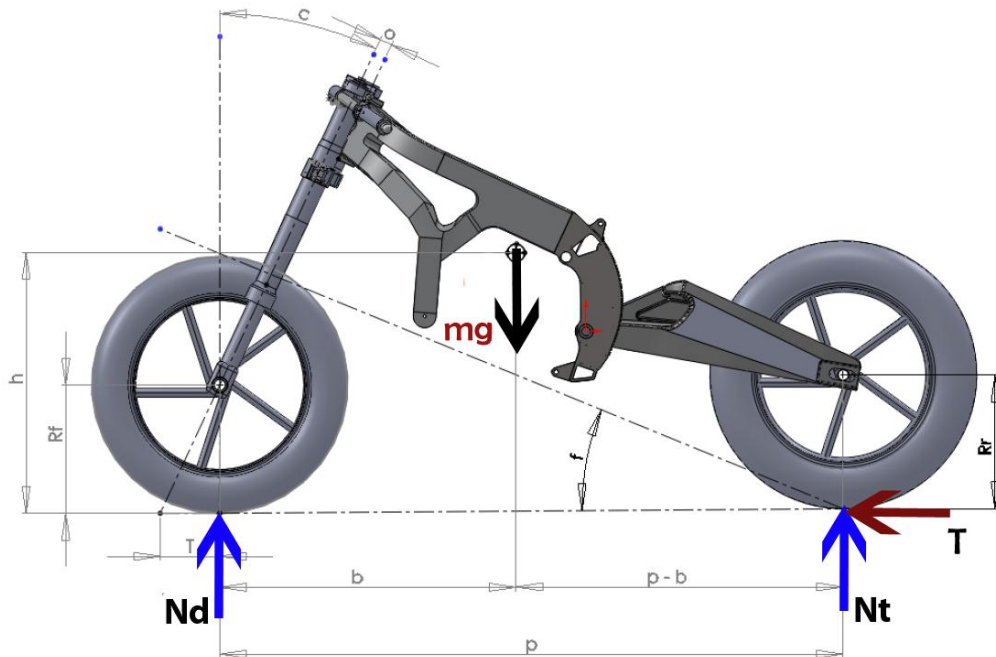


Figura 3.1 - Esquema de forças aceleração máxima. Adaptado de (17)

Tal como dito anteriormente, a condição de máxima aceleração é quando a roda da frente perde o contacto com o piso. Esta condição é traduzida por:

$$N_d = mg \times \frac{b}{p} - T \times \frac{h}{p} = 0 \quad (3.6)$$

Portanto:

$$N_t = mg \quad (3.7)$$

$$T = mg \times \frac{p-b}{h} \quad (3.8)$$

### 3.1.2 Máxima Travagem na Roda Dianteira

Este caso é similar ao da aceleração máxima. Travagem máxima na roda dianteira é quando a roda traseira se começa a levantar do chão. Esta condição é traduzida por:

$$N_t = mg \times \frac{b}{p} - F \times \frac{h}{p} = 0 \quad (3.9)$$

Portanto:

$$N_d = mg \quad (3.10)$$

$$F = mg \times \frac{b}{h} \quad (3.11)$$

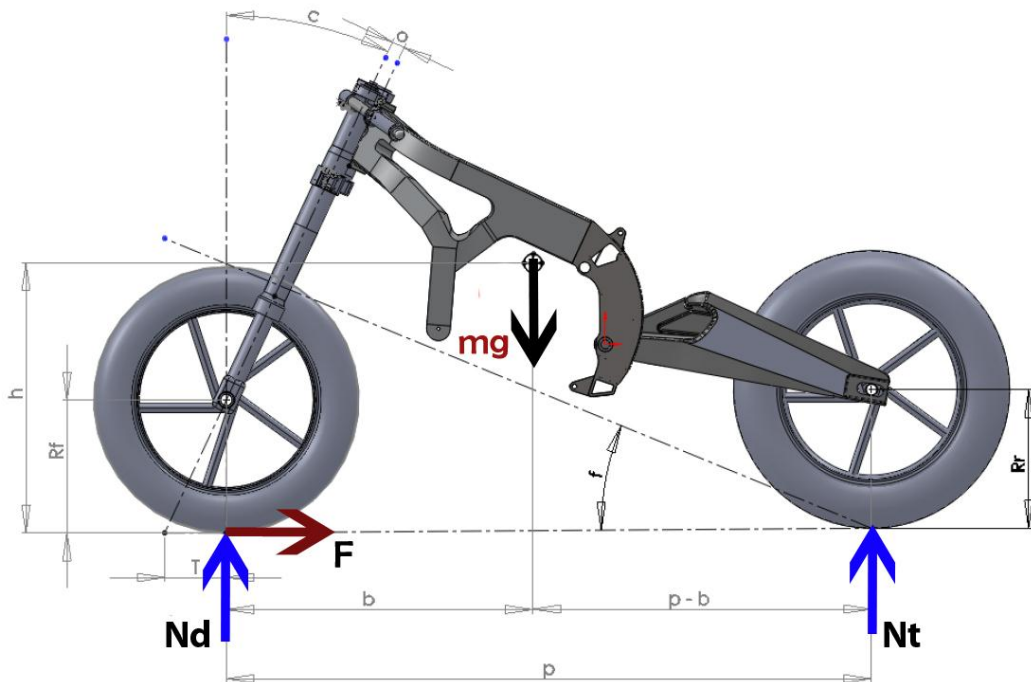


Figura 3.2 - Esquema de forças máxima travagem na roda dianteira. Adaptado de (17)

### 3.1.3 Máxima Travagem na Roda Traseira

De modo a poder avaliar o papel do travão traseiro durante o ato de travagem no limite do escorregamento, é preciso levantar alguns pontos em relação às forças que atuam num motociclo.

Durante a desaceleração produzida pela roda traseira, a carga na roda dianteira aumenta cerca de 20%, enquanto na roda traseira diminui. Ambas as rodas estão sempre em contacto com o piso. Apenas muda a transferência de carga. Em últimos momentos, existe derrapagem

quando a força de travagem é superior à força de atrito dinâmico entre a roda e o piso. Neste caso, vai ser pressuposto um coeficiente igual a 0,9 entre o piso e a roda.

Muitos condutores de motociclos tendem a se esquecer do travão traseiro, que em certas circunstâncias fornece uma útil contribuição. O seu uso correto é importante quando se entra numa curva e durante o movimento retilíneo quando aparece um obstáculo repentino na frente do motociclo e o piso não está em boas condições (não há boa aderência). A presença da força de travagem traseira gera um binário que tende a alinhar e a estabilizar o veículo.

$$N_t = mg \times \left(\frac{100 - a}{100}\right) \times \left(\frac{tcspt}{100}\right) \quad (3.12)$$

Onde:

- $mg$  é peso;
- $a$  é % de transferência de carga da roda traseira para a dianteira. ( $a=20\%$ );
- $tcspt$  é a transferência de carga na posição estática (roda traseira).

$$tcspd = \frac{p - b}{p} \quad (3.13)$$

$$tcspt = 1 - tcspd \quad (3.14)$$

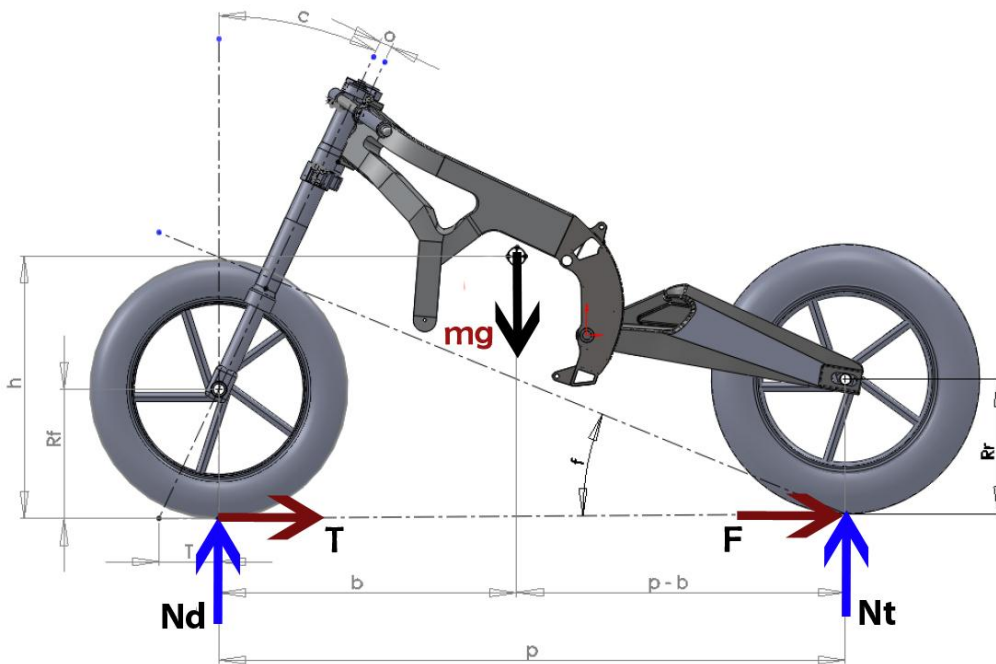


Figura 3.3 - Esquema de forças máxima travagem na roda traseira. Adaptado de (17)

Portanto:

$$F = N_t \times \mu \quad (3.15)$$

$$N_d = mg - N_t \quad (3.16)$$

$$T = N_d \times \mu \quad (3.17)$$

### 3.1.4 Quando o motociclo está em curva

Vamos considerar um motociclo em curva e em regime permanente. O equilíbrio dos momentos de forças que atuam no centro de massa mostra que a força lateral normalizada necessária para assegurar o equilíbrio do motociclo é igual à tangente do ângulo de rolamento, conforme mostra a próxima figura.

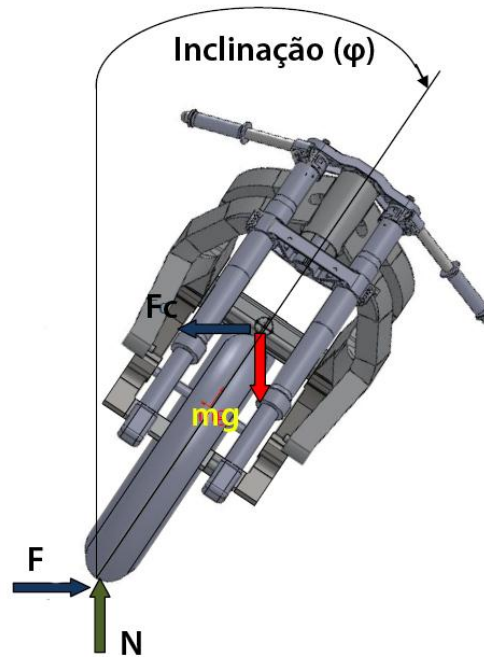


Figura 3.4 - Esquema de forças do motociclo em curva. Adaptado de (17)

Dependendo do tipo de pneu usado há um intervalo desde  $0^\circ$  até  $X^\circ$  onde a força lateral precisa para o equilíbrio é menor que a força de impulsão gerada pela inclinação em si. Uma vez que a força lateral gerada deve ser exatamente igual à necessária ao equilíbrio, a diminuição das forças laterais é obtida através de um ângulo de derrapagem negativo. Devido a isto, a roda apresenta uma componente de velocidade lateral em direção ao interior da curva.

Para valores do ângulo de inclinação superiores a  $X^\circ$ , a força lateral produzida pela inclinação em si não é suficiente para o equilíbrio do motociclo e por isso, o aumento da força lateral é obtido com o deslizamento lateral do pneu.

Este comportamento é característico dos pneus dos motociclos onde a força lateral gerada é quase sempre inteiramente devida à componente de inclinação, apresentando um papel fundamental na sua segurança.

$$N_d = tcspd \times mg \quad (3.18)$$

$$F = \mu \times N_d \quad (3.19)$$

E sendo assim:

$$N_t = tcspt \times mg \quad (3.20)$$

$$T = \mu \times N_t \quad (3.21)$$

A força F também pode ser obtida pela força centrífuga onde:

$$F_c = m \times r_c \times \Omega^2 \quad (3.22)$$

Onde:

$r_c$  - raio de curvatura

$\Omega$  – velocidade angular

### 3.1.5 Forças externas (Resumo)

De acordo com as secções anteriores e o ANEXO C, temos:

	Regime Estacionário	Aceleração Máxima	Travagem máxima roda dianteira	Travagem máxima roda traseira	Curva
$N_d$ [N]	1937,48	0	3874,95	2324,97	1937,48
$N_t$ [N]	1937,48	3874,95	0	1549,98	1937,48
$F$ [N]	0	0	4914,14	1394,48	1743,73
$T$ [N]	0	4914,14	0	2092,47	1743,73

Tabela 3.1 - Resumo de forças externas

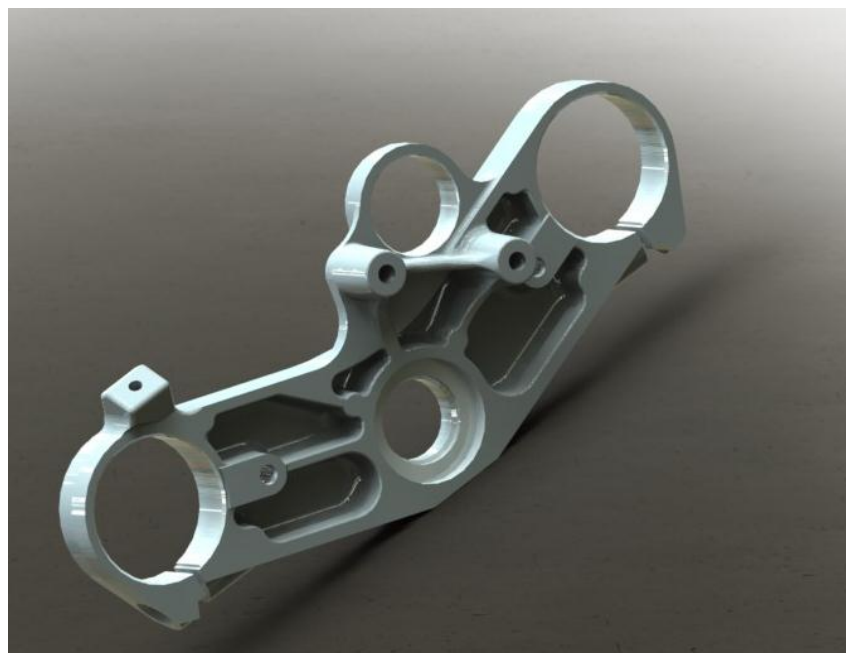
Após uma breve análise da TABELA 3.1, pode-se facilmente constatar que a situação que acarreta maiores esforços no conjunto dianteiro é a de travagem máxima na roda dianteira.

## 3.2 Triple Clamp Testado

O triple clamp testado, nomeadamente o triple clamp superior, pertence ao modelo Yamaha YZF-R1 2000. Este componente foi obtido em (18), sob o formato de modelação 3D em SolidWorks.

Este componente tem como principais especificações:

- Offset = 35 mm;
- Diâmetro dos tubos da forquilha = 51 mm;
- Distância entre os centros dos tubos da forquilha = 210 mm.



**Figura 3.5** - Triple Clamp Superior Yamaha R1 2000. Adaptado de (18)

### 3.3 Materiais Testados

Nesta secção será referida a descrição, propriedades e aplicações típicas dos materiais testados no presente trabalho.

Criar ou modificar componentes para um motociclo ou outro tipo de veículo, é uma ação bastante séria cujas consequências devido a falhas mecânicas podem acarretar danos sérios tanto ao motociclo como ao seu condutor. (19)

Hoje em dia, existe uma larga gama de materiais que podem ser aplicados nos diversos tipos de componentes. Selecionar o material certo para um design/projeto específico é provavelmente uma das decisões mais importantes. Apesar de existirem outros fatores, para uma correta escolha do material a utilizar, devem ser respondidas as seguintes questões:

- Será que vai funcionar? A resposta a esta questão recai sobre a correspondência de critérios dominantes ou primários, tais como, resistência, dureza, comportamento elástico, propriedades magnéticas, condutividade elétrica e térmica.
- Será que vai durar? Esta pergunta é respondida pelos critérios importantes de corrosão e resistência ao calor, bem como a resistência ao desgaste, carregamento dinâmico, choque e fluência.
- Pode ser feito? Esta questão refere-se à fundibilidade, maquinabilidade e acabamento superficial (revestimento, galvanização e anodização).
- Pode ser feito dentro dos limites especificados? As principais limitações da maioria dos componentes de engenharia ou estruturas são o peso e o custo. De forma a estas restrições serem cumpridas, precisa-se de uma ideia de custos e pesos relativos. (19)

### 3.3.1 Al 6061-T6

O Al 6061 é uma liga de alumínio, que contém como principais elementos de liga o magnésio e o silício. Tem boas propriedades mecânicas e apresenta uma boa soldabilidade. É uma das ligas de alumínio mais comuns para fins de uso geral, especialmente estruturas de alta resistência que requerem um bom comportamento à corrosão.

Normalmente está disponível num grau pré-temperado, como o 6061-O (recozido), e em grau temperado como o 6061-T6 e o 6061-T651. Neste caso, o grau T6 significa que o alumínio foi tratado por solubilização e então envelhecido artificialmente.

Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Outros
95.8 -	0.04 -	0.15 -	Max	0.8 -	Max	0.4 -	Max	Max	Max
98.6	0.35	0.4	0.7	1.2	0.15	0.8	0.15	0.25	0.15

Tabela 3.2 - Composição química Al 6061 (20)

$\rho$ [ $kg/m^3$ ]	2700
Módulo de Young [GPa]	68.9
Tensão de cedência [MPa]	276
Tensão de rutura [MPa]	310
Coefficiente de Poisson	0.33
Tensão limite de fadiga [MPa]	96.5 para $5 \times 10^9$ ciclos
Maquinabilidade [%]	50
Temperatura de Fusão [ $^{\circ}C$ ]	582 - 652

Tabela 3.3 - Propriedades Mecânicas e Térmicas Al6061-T6 (20)

#### Aplicações típicas

- Usado na construção de estruturas de aviões, como asas e fuselagens;
- Construção de iates, incluindo pequenas embarcações;
- Garrafas de ar comprimido para mergulhos e equipamentos de respiração assistida;
- Construção de quadros e outros componentes de bicicletas;
- Carretos de pesca.

### 3.3.2 Al 7075-T6

O Al 7075 é uma liga de alumínio que contém como principal elemento de liga o zinco. Tem boas propriedades mecânicas, apresentando uma resistência comparável a vários aços, boa resistência à fadiga mas uma menor resistência à corrosão que outras ligas de alumínio. É uma das ligas de alumínio mais comuns para fins de uso geral, especialmente estruturas de alta resistência que requeiram um bom comportamento à corrosão.

Normalmente está disponível num grau pré-temperado, como o 7075-O (recozido), e em grau temperado como o 7075-T6 e o 7075-T651 Neste caso, o grau T6 significa que o alumínio foi tratado por solubilização e então envelhecido artificialmente.

Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Outros
87.1 - 91.4	0.18 - 0.28	1.2 - 2	Max 0.5	2.1 - 2.9	Max 0.3	Max 0.4	Max 0.2	5.1 - 6.1	Max 0.15

Tabela 3.4 - Composição química Al 7075 (21)

$\rho$ [ $kg/m^3$ ]	2810
Módulo de Young [GPa]	71.7
Tensão de cedência [MPa]	503
Tensão de rutura [MPa]	572
Coefficiente de Poisson	0.33
Tensão limite de fadiga [MPa]	159 para $5 \times 10^9$ ciclos
Maquinabilidade [%]	70
Temperatura de Fusão [°C]	477-635

Tabela 3.5 - Propriedades Mecânicas e Térmicas Al7075-T6 (21)

Aplicações típicas:

- Componentes de bicicletas;
- Moldes;
- Construção de aviões militares, barcos e alguns componentes de automóveis;
- Equipamentos de lacrosse e escalada.

### 3.3.3 HexMC

O HexMc é um composto de moldação baseado em pré-impregnados de fibras descontínuas curtas, neste caso, fibra de carbono. Este material é distribuído pela empresa Hexcel (22), sob a forma de rolo.

Este composto é especialmente concebido para ser utilizado na moldação por compressão, permitindo rápidos ciclos de processamento. Durante o processo de fabrico, não existe desperdício de material. A sua matriz é de epoxy e apresenta um volume de fibra de carbono de alta resistência (HS Carbon) de 57%. O comprimento das fibras é de 50 mm (23). As fibras estão distribuídas aleatoriamente, daí este tipo de material ser considerado quasi-isotrópico.



Figura 3.6 - Distribuição aleatória das fibras curtas

Na seguinte tabela, poderão ser consultadas algumas das propriedades do material.

$\rho$ [ $kg/m^3$ ]	1550
Módulo de Young [GPa]	30
Tensão de cedência [MPa]	300
Tensão de rutura [MPa]	500

Tabela 3.6 - Propriedades HexMC (23)

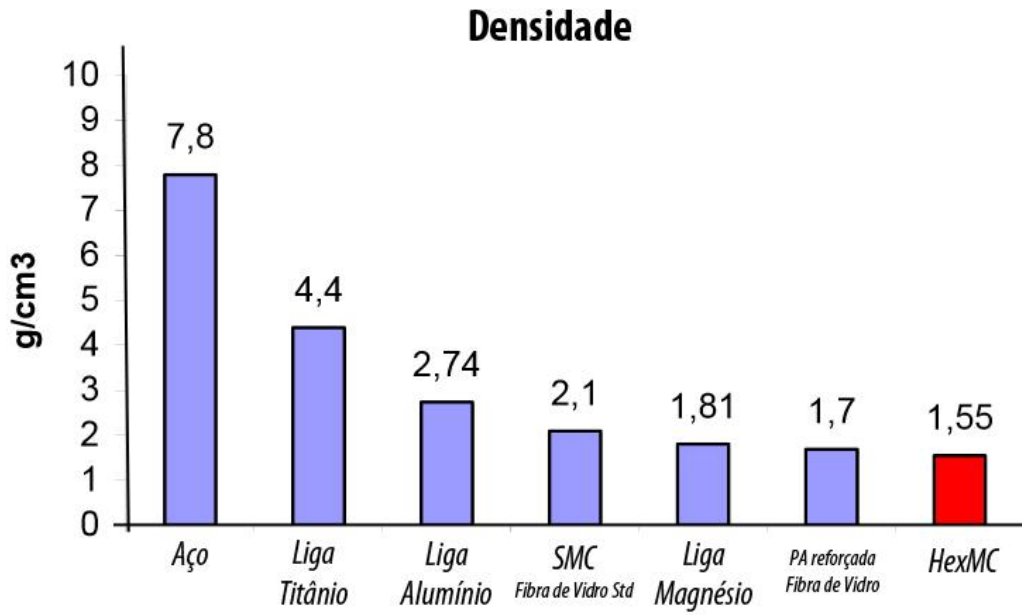


Figura 3.7 - Comparação da densidade do HexMC com outros materiais. Adaptado de (24)

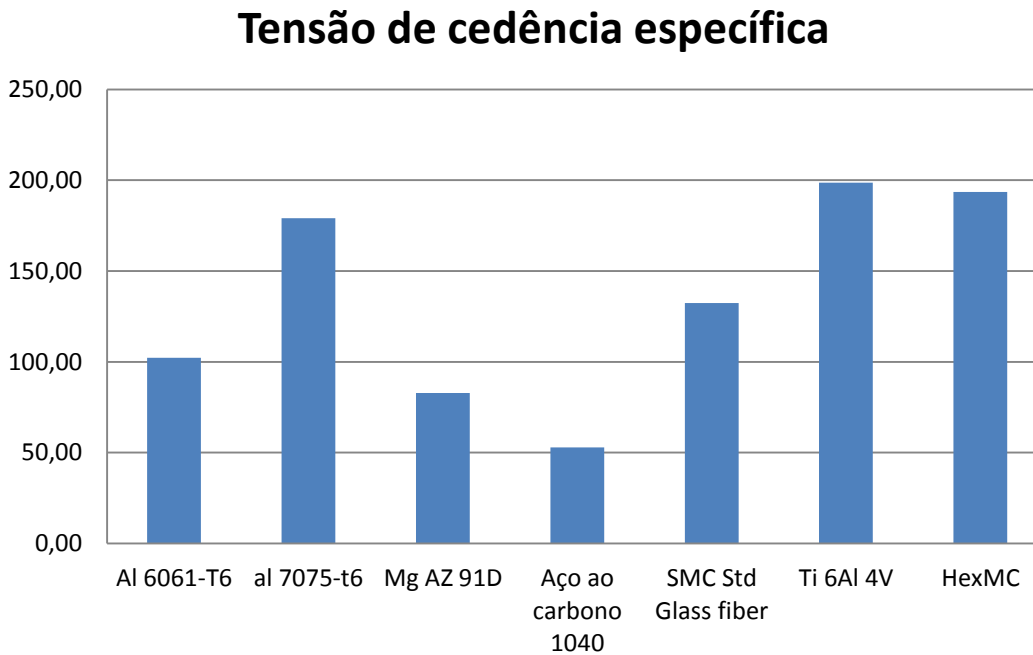
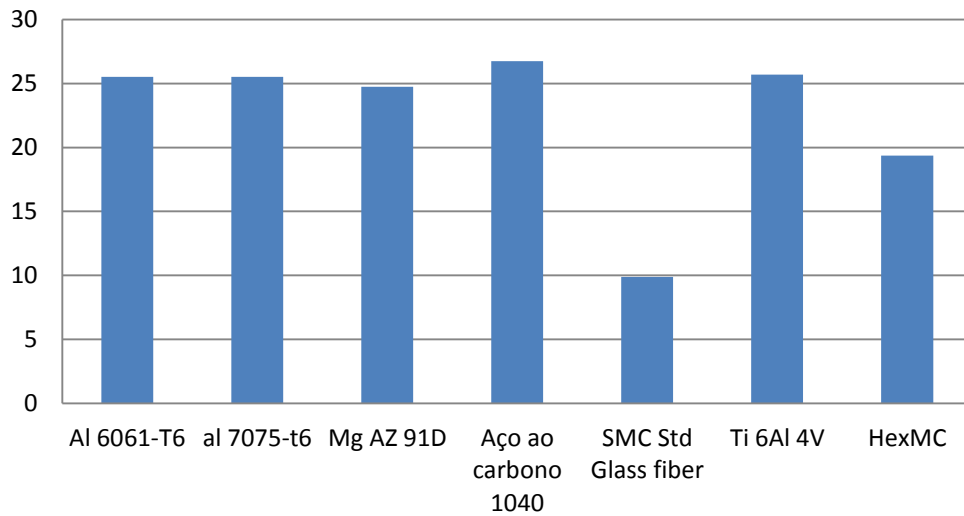


Figura 3.8 - Comparação da tensão de cedência específica do HexMC com outros materiais. Adaptado de (24)

## Módulo específico



**Figura 3.9** - Comparação do módulo específico do HexMC com outros materiais. Adaptado de (24)

A tensão de cedência específica do HexMC é quase duas vezes superior à do Al6061-T6 e ligeiramente superior à do Al7075-T6. Pode ser equiparado neste capítulo a uma das ligas de titânio mais utilizadas, o Ti-6Al-4V (grau 5).

Quando ao módulo específico, este é inferior ao dos alumínio testados, o que se irá traduzir em maiores deslocamentos no componente.



**Figura 3.10** - Exemplos de aplicação de compostos de moldação

### 3.4 Aplicação de Elementos Finitos

Após o cálculo das forças aplicadas nas diferentes situações, agora é o momento de as aplicar no componente e testá-lo com os diferentes materiais. A engenharia tem como um dos seus objetivos tentar compreender o comportamento de um sistema e transformá-lo num modelo matemático. Através dos modelos matemáticos, podemos prever o que pode vir a acontecer em determinada situação e após isso tentar melhorar a performance do sistema.

Hoje em dia, através dos *softwares* de simulação numérica este processo é bastante mais simplificado, intuitivo e fácil de utilizar. No caso do presente trabalho, o *software* utilizado foi o *Abaqus*.

Contudo, é importante de se perceber que os resultados finais obtidos pelos *softwares* de elementos finitos não são a situação real, sendo apenas uma aproximação dependendo das decisões do engenheiro/projetista. Os resultados finais podem ser mais ou menos precisos, obtidos de uma forma mais ou menos rápida, dependendo da capacidade do computador em processar as diversas operações.

Os programas de elementos finitos apresentam diferentes passos no seu processo global para ser obter os resultados finais:

- Necessária uma geometria para ser analisada. Neste caso, a geometria foi realizada no *software SolidWorks* e posteriormente importada para a área de trabalho do *Abaqus*;
- Definir o material do componente nas suas várias secções e o tipo de elemento (Casca, Compósito ou Homogéneo);
- Definir o tipo de estudo a ser feito: Caso Estático ou Dinâmico;
- Definir as condições de fronteira, ou seja, especificar onde não existe deslocamento ou outras condições;
- Colocar as forças externas no componente;
- Definir a malha da geometria a analisar;
- Submeter os dados e recolher os resultados da análise.

Este processo é iterativo, uma vez que por vezes temos que voltar a definir alguns parâmetros e otimizar o processo de forma aos resultados obtidos estarem de acordo com o esperado.

### 3.5 Resultados obtidos

O caso estudado foi um caso estático, com uma malha de elementos tetraédricos. O número de elementos utilizados foi de 12496 e o número de nós 27554.

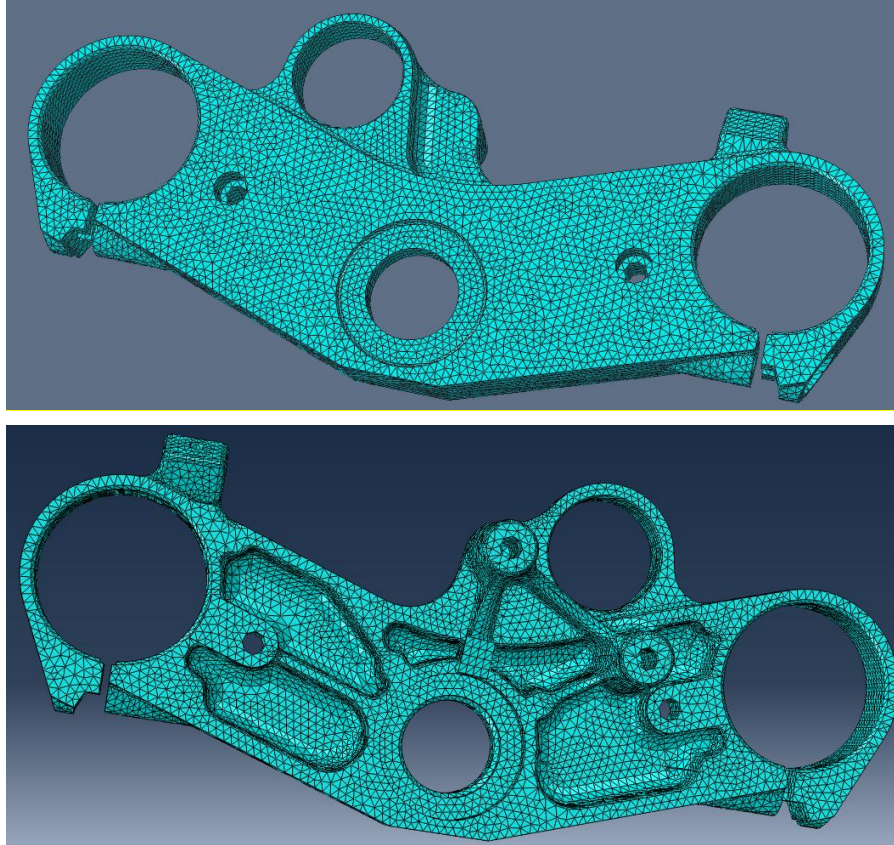


Figura 3.11 - Malha de elementos finitos utilizada

No que diz respeito às condições de fronteira, foi considerado que a zona do eixo da direção estava encastrada assim como a zona onde se encontram os parafusos para o ajuste dos tubos da forquilha. As cargas existentes foram introduzidas nas zonas dos tubos da forquilha.

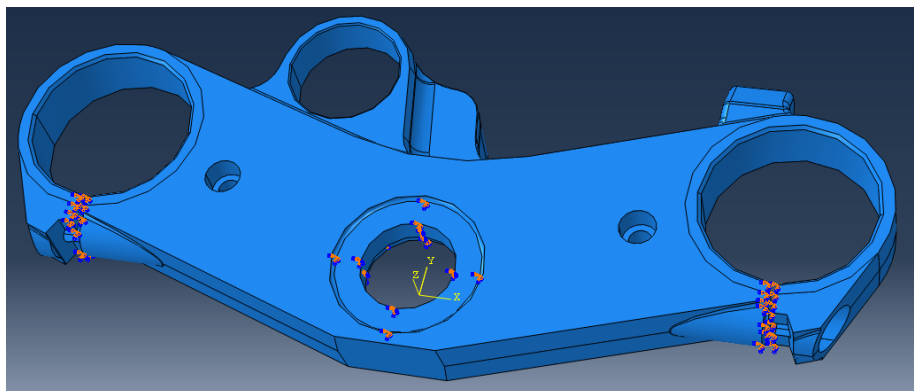


Figura 3.12 - Condições de fronteira do modelo

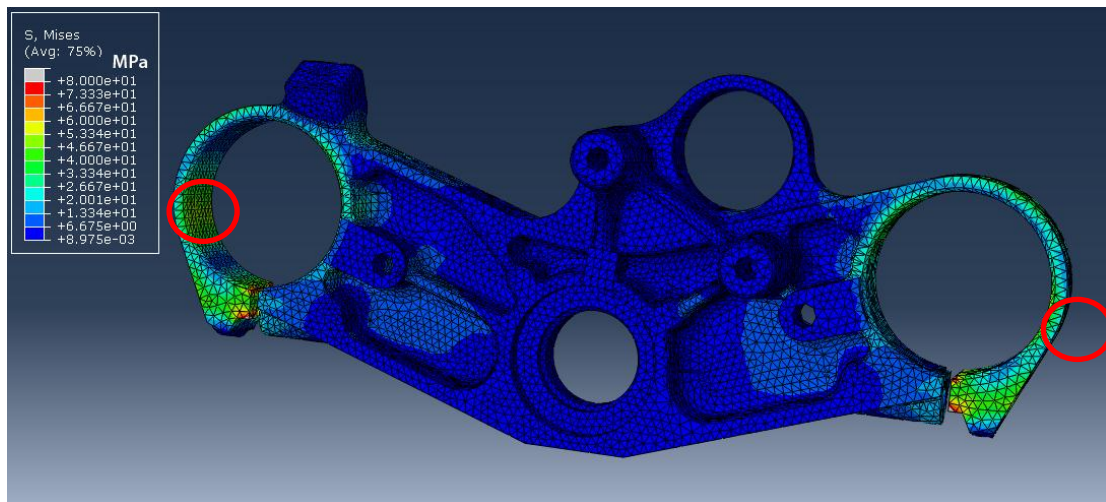
Em todos os casos, foi considerado o material do componente como isotrópico, mesmo para o HexMC. Esta aproximação do HexMc deve-se às suas propriedades quasi-isotrópicas.

Tendo em conta dos dados da **SECÇÃO 3.1.5**, a situação mais crítica para o conjunto dianteiro é a situação de travagem máxima na roda dianteira.

Após aplicação de elementos finitos ao modelo geométrico do componente, com a devida colocação das condições de fronteira e forças externas calculadas no **ANEXO D.1**, foram obtidos os seguintes resultados:

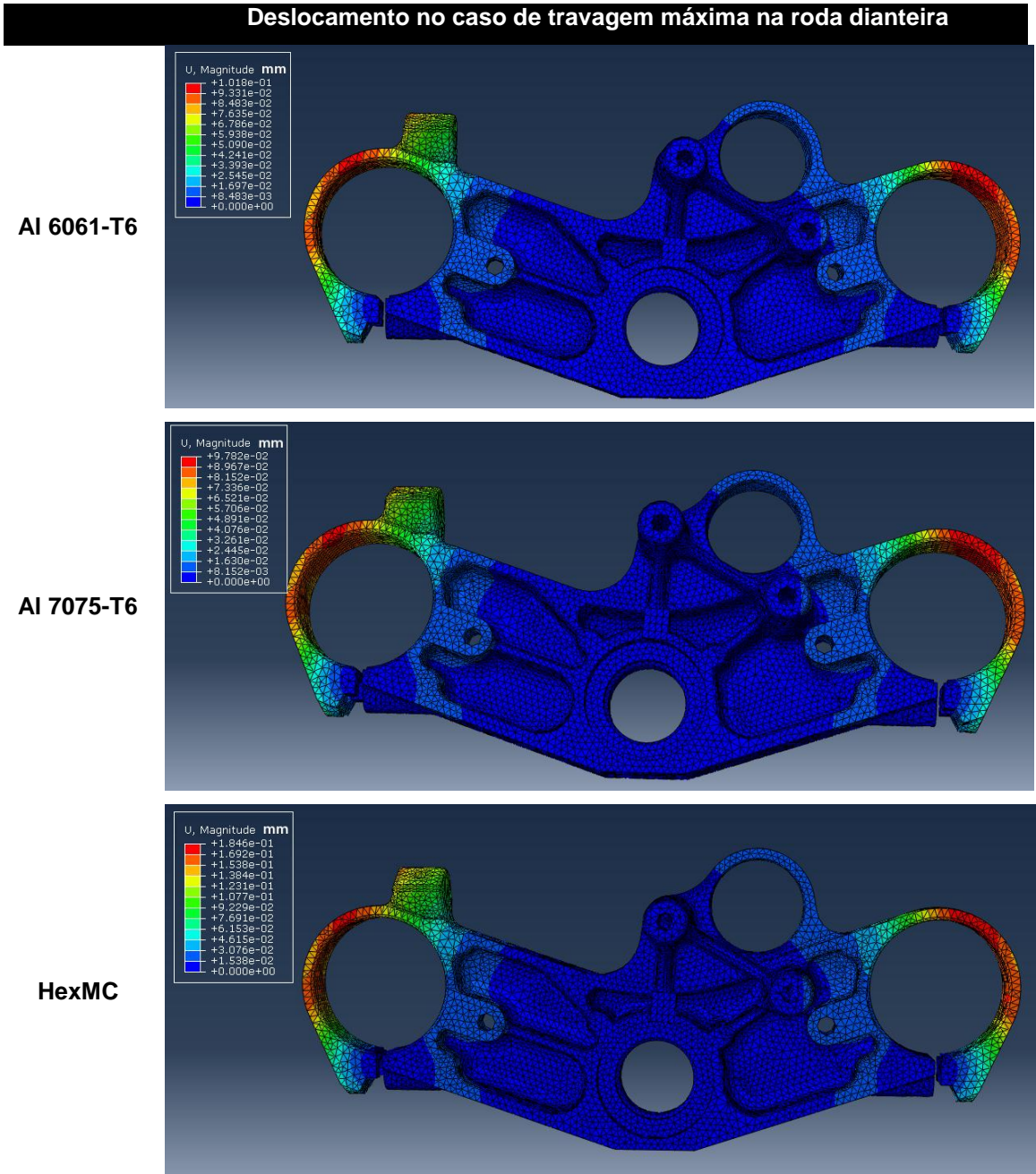
	Al 6061-T6	Al 7075-T6	HexMC
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	72,2	72,2	72,2
$\sigma_{ced}$ [MPa]	276	503	300
$n$	3,82	6,97	4,16
$u$ [mm]	$1,018 \times 10^{-1}$	$9,782 \times 10^{-2}$	$1,846 \times 10^{-1}$

**Tabela 3.7** - Resultados obtidos para o caso de travagem máxima na roda dianteira



**Figura 3.13** - Distribuição de tensões no caso de travagem máxima na roda dianteira e identificação das zonas críticas

Através da **FIGURA 3.13**, é possível verificar que a tensão máxima verificada no componente é de 72,2 MPa. As zonas críticas para esta situação situam-se na zona onde são inseridos os tubos da forquilha.



**Tabela 3.8** - Deslocamento no caso de travagem máxima na roda dianteira para os vários materiais

A nível de deslocamentos, como seria de prever, o HexMC apresenta deslocamentos maiores do que os alumínios testados, devido ao seu módulo de Young inferior.

### 3.6 Identificação das frequências naturais

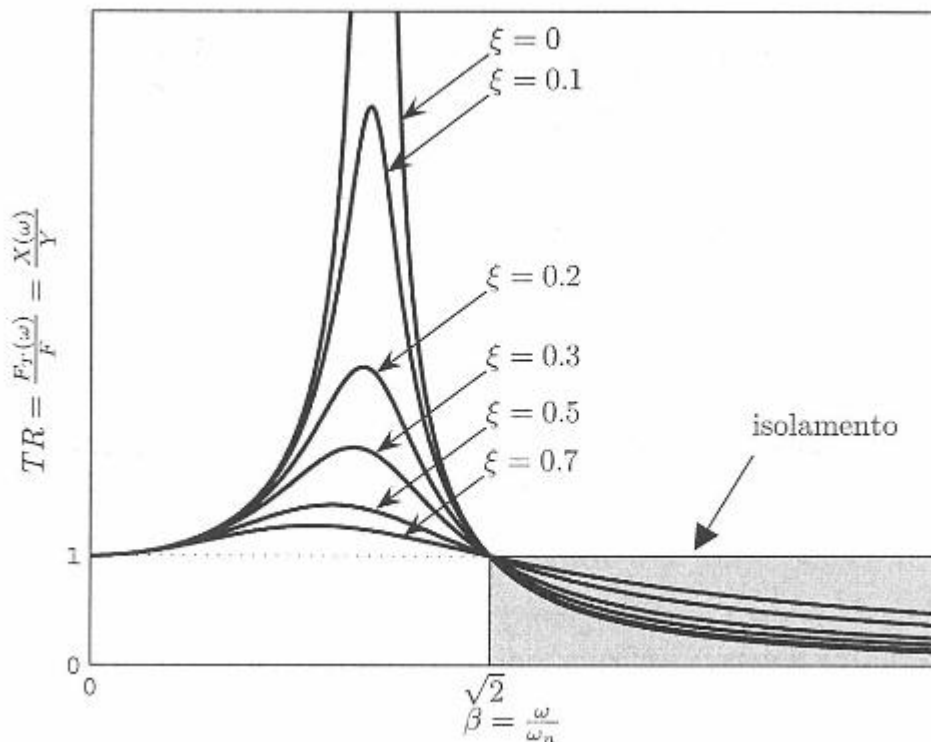
Hoje em dia, uma característica principal dos veículos – especialmente os de duas rodas – é o conforto do condutor e dos seus passageiros, que, infelizmente, pode ser afetado por vibrações indesejáveis.

Apesar de as vibrações mecânicas serem maioritariamente provenientes da má qualidade do piso, o uso de pneus de qualidade superior e de bons sistemas de suspensão pode ajudar a reduzir os efeitos nefastos destas vibrações. Para além disto, o conforto do condutor e dos passageiros pode também ser afetado por vibrações mecânicas causadas pelo motor, onde por vezes, as vibrações não são suficientemente filtradas pelos seus apoios. (25)

As frequências naturais são realmente importantes para serem estudadas e identificadas. Através desta identificação, é possível saber quando o sistema pode vibrar, podendo alguns problemas dinâmicos ser corrigidos ou diminuídos durante a fase de design ou processos de teste, modificando a estrutura original.

Em geral, o isolamento de vibrações consiste em reduzir a grandeza de forças dinâmicas transmitidas por componentes móveis ou equipamentos para as suas fundações de suporte (transmissão ativa), ou em reduzir o movimento transmitido para os equipamentos por bases móveis (transmissão passiva). (26)

A transmissibilidade de força representa a fração da amplitude de força de excitação que é transmitida à base. Na **FIGURA 3.14**, apresenta-se a representação paramétrica da transmissibilidade para diferentes valores da razão de amortecimento  $\xi$ .



**Figura 3.14** – Transmissibilidade em função da razão de frequência. Retirado de (26)

A análise da variação da transmissibilidade em função da frequência de excitação  $\omega$ , ou da razão de frequências  $\beta$ , permite-nos concluir o seguinte:

- A região de isolamento de vibrações, em que a transmissibilidade é inferior a 1, verifica-se para  $\frac{\omega}{\omega_n} > \sqrt{2}$ . Assim, para uma dada frequência de excitação  $\omega$ , os apoios devem ser selecionados de modo a que a frequência natural  $\omega_n$  do sistema seja inferior a  $\frac{\omega}{\sqrt{2}}$ . Como  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , e a massa dos apoios é geralmente muito menor do que a massa do sistema, apoios adequados de isolamento são normalmente selecionados na base da sua rigidez;
- Como a transmissibilidade, na região de isolamento, diminui à medida que  $\frac{\omega}{\omega_n}$  aumenta, quanto menos rígidos os apoios maior será a eficiência de isolamento, é, no entanto, desejável a presença de amortecimento para atenuar o pico de resposta quando o sistema passa pela frequência de ressonância durante as fases de arranque e de paragem;
- Para  $\frac{\omega}{\omega_n} > 3$ , as curvas de transmissibilidade são praticamente idênticas para um amortecimento  $\xi < 0.2$  (20%), de modo que nesta zona a transmissibilidade de força ou do movimento da base é praticamente independente do amortecimento.

Mediante esta análise, pode-se concluir que se deve proceder ao design dos componentes de suspensões de motocicletas atendendo ao facto de que estes devem possuir frequências naturais baixas. Com frequências naturais baixas, mediante as diversas frequências de excitação que um motociclo sofre, consegue-se um melhor isolamento de vibrações e consequente melhor conforto para o condutor.

Na **FIGURA 3.15**, podem ser consultadas as cinco primeiras frequências naturais do componente para o Al6061/Al7075 e HexMC, obtidas através do *software Abaqus*. As frequências do Al6061 e do Al7075 são idênticas uma vez as suas densidades são aproximadamente iguais e a geometria do componente é igual em ambos os casos.

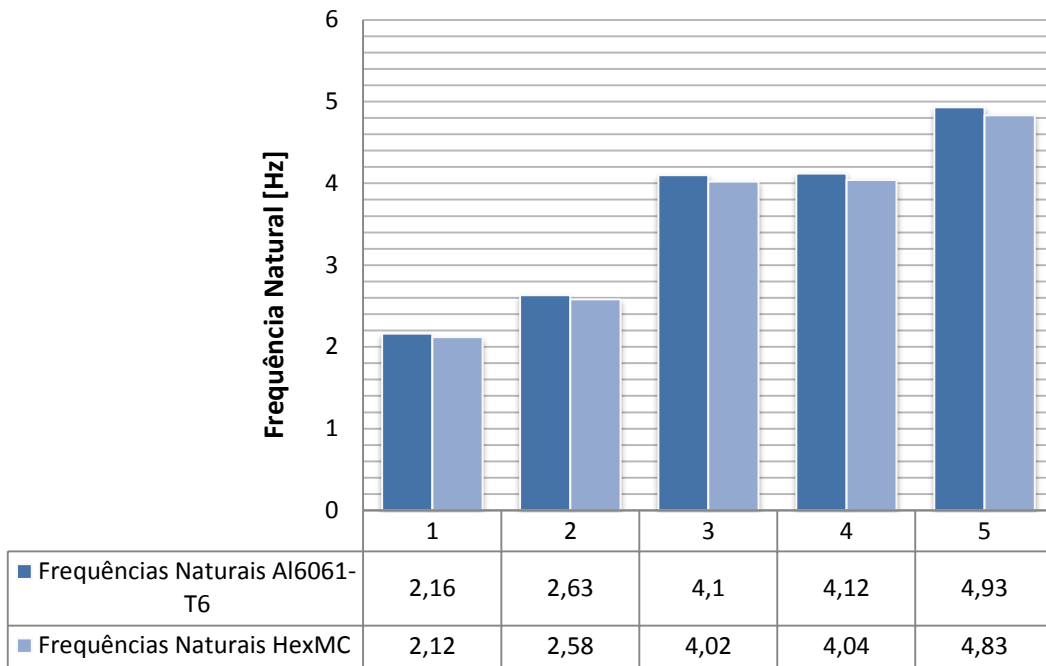


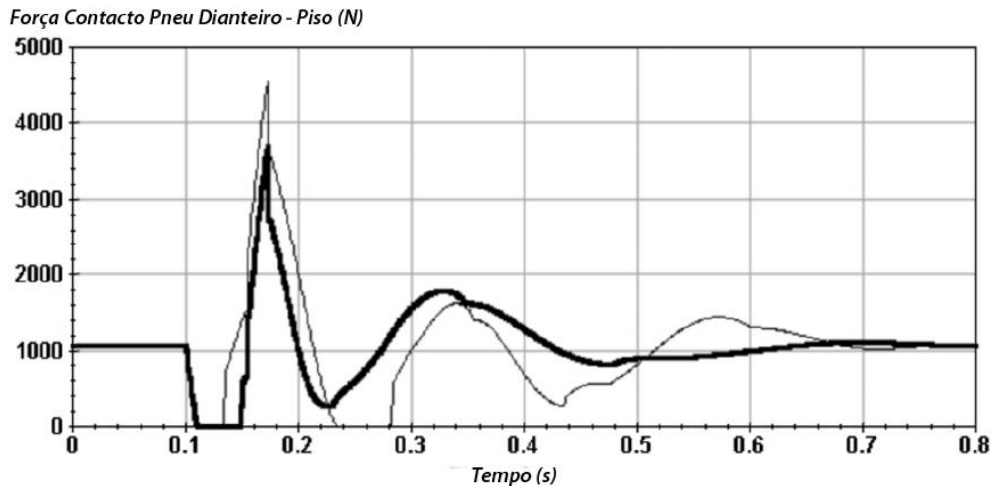
Figura 3.15 - Frequências naturais Al 6061 e HexMC

Da análise da figura anterior, pode-se observar que nos dois casos as frequências obtidas são baixas. Para material HexMC as suas frequências naturais são ligeiramente mais baixas que as dos alumínios testados. Isto é importante perante o que já foi dito anteriormente, uma vez que com frequências naturais baixas entramos na zona de isolamento de vibrações.

Deste modo, pode-se assim afirmar que o material HexMC proporciona um melhor isolamento de vibrações transmitidas, tendo em conta que a sua frequência natural é ligeiramente mais baixa.

### 3.7 Impacto

As situações de impacto são bastante complexas de serem traduzidas por modelos matemáticos e de se caracterizar. Foi encontrado em (6), um gráfico que mostra a força de contacto pneu dianteiro/piso, quando o motociclo passa por um degrau/queda de 0,05 metros a 100 km/h. O gráfico pode ser consultado na seguinte figura.



**Figura 3.16** - Força Contacto Pneu Dianteiro – Piso durante passagem em degrau/queda com 0.05 m a 100 km/h. Adaptado de (6)

No caso da **FIGURA 3.16**, podemos verificar que a força de contacto pneu dianteiro – piso, em estado estacionário é de cerca 1100N. Entre os 0,1 e os 0,16 segundos a roda dianteira está no ar, ou seja, a força de contacto com o piso é igual a 0, como esperado. No momento em que a roda volta a entrar em contacto com o piso, a força de contacto dispara para o valor de aproximadamente 3600 N. A flutuação da força ao longo do tempo após o impacto é devida ao amortecimento, que é considerado neste caso. A dissipação das forças de impacto dependem muito das características quer da suspensão, quer do pneu

Após aplicação de elementos finitos ao modelo geométrico do componente, com a devida colocação das condições de fronteira e forças externas, nomeadamente força de impacto e força transmitida ao triple clamp, calculadas no **ANEXO D.2**, foram obtidos os seguintes resultados:

	Al 6061-T6	Al 7075-T6	HexMC
$\sigma_{m\acute{a}x} [MPa]$	82	82	82
$\sigma_{ced} [MPa]$	276	503	300
$n$	3,37	6,13	3,66
$u [mm]$	$2,772 \times 10^{-1}$	$2,664 \times 10^{-1}$	$5,027 \times 10^{-1}$

**Tabela 3.9** - Resultados obtidos para o caso de impacto

Onde:

$$n = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{m\acute{a}x}} - \text{coeficiente de seguran\c{c}a}$$

Estes resultados foram obtidos com uma  $F_{impacto} = 6393,668 N$  e uma corresponde  $F_{tripleclamp} = 6998,74 N$ .

De modo a tentar obter tensões máximas próximas das tensões de cedências dos materiais, através de um processo iterativo, foi-se aumentado o valor da carga aplicada e retirando o valor da tensão de Von Mises máxima instalada.

Os resultados foram os seguintes:

$F_{impacto} [N]$	$F_{tripleclamp} [N]$	$\sigma_{vonmises max. [MPa]}$
21925,09	24000	282,207
23752,18	26000	305,729
27406,36	30000	352,762
36541,82	40000	470,349
38368,91	42000	493,871
40196	44000	517,394
45677,27	50000	587,949
63948,18	70000	823,123

Tabela 3.10 - Resultados obtidos para situação de impacto via processo iterativo

Estes resultados foram obtidos com o *software* de elementos finitos de acordo com o ANEXO D.2, onde se considera que a força de impacto corresponde à força de contacto roda-piso. Através destas considerações e da TABELA 3.9, foi elaborado o seguinte gráfico:

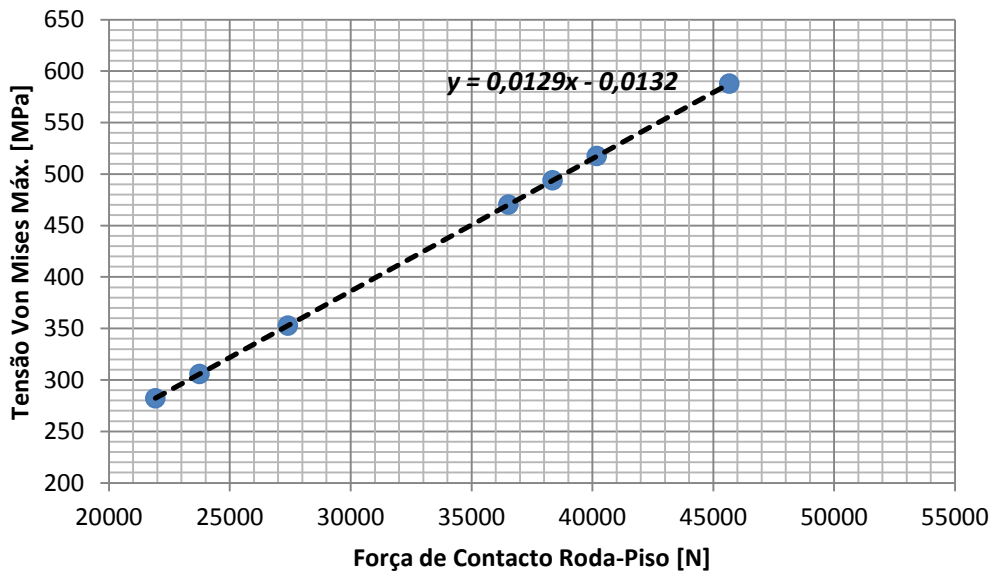


Figura 3.17 – Gráfico força de contacto vs. Tensão de Von Mises máxima

Através do gráfico da **FIGURA 3.17**, foi obtida a linha de tendência cuja equação é:

$$y = 0,0129x - 0,0132$$

Em que:

y – tensão de Von Mises máxima [MPa]

x – força de contacto roda piso [N]

Sendo assim, foi calculada a força de contacto/ força de impacto a partir da qual se chega à tensão de cedência em cada um dos três materiais:

	Al 6061-T6	Al 7075-T6	HexMC
$\sigma_{ced} = \sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	276	503	300
$F_{impacto}$ [N]	21396,372	38993,271	23256,837
$u$ [mm]	$9,279 \times 10^{-1}$	1,625	2,316

Tabela 3.11 - Resultados obtidos para o caso de força de impacto máxima

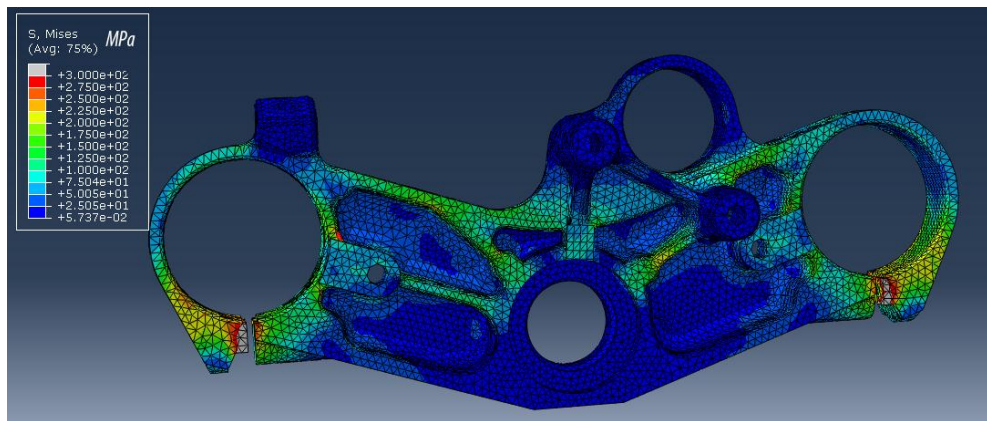


Figura 3.18 - Distribuição de tensões para o HexMC em situação de impacto máximo

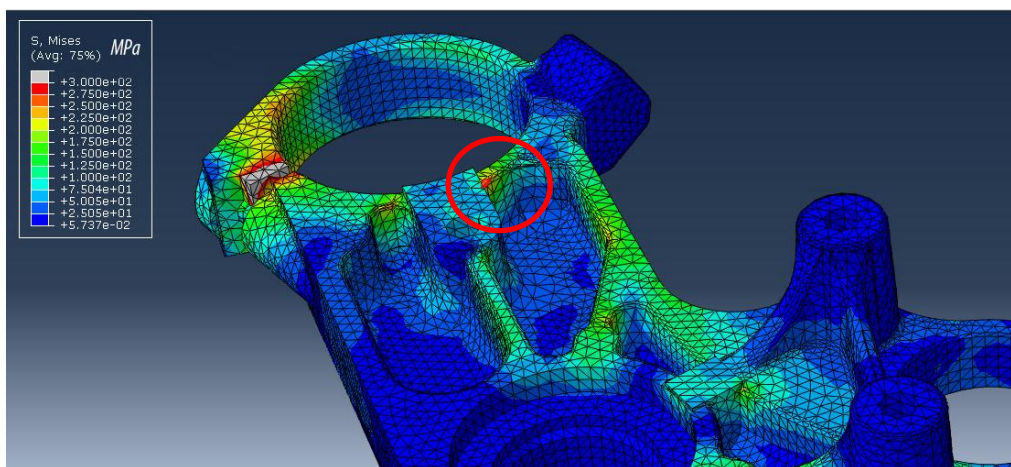


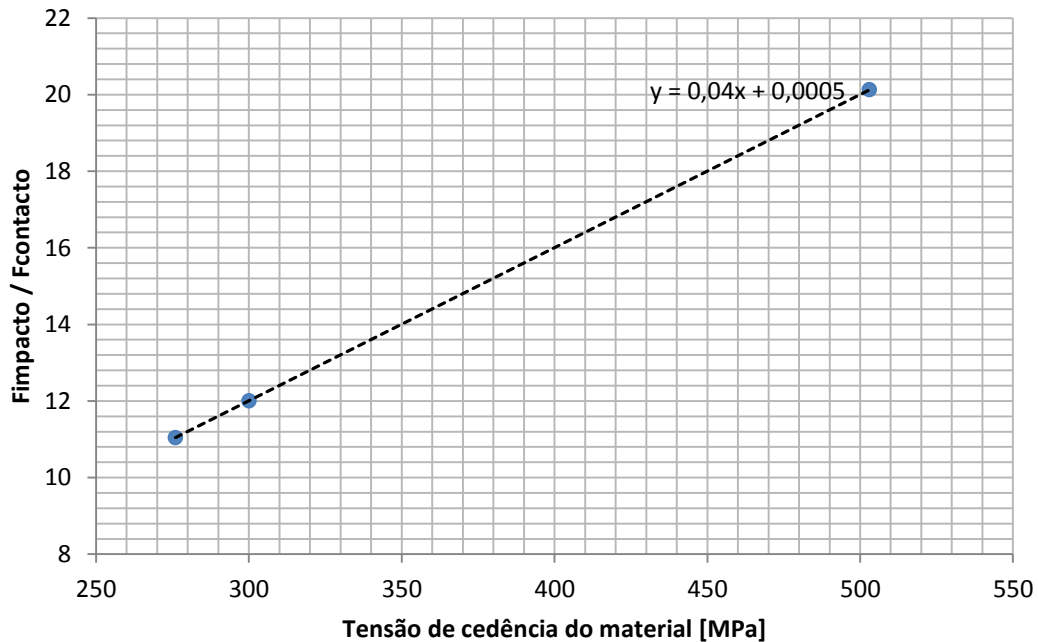
Figura 3.19 - Identificação da zona crítica em situação de impacto máximo

Mais uma vez com se pode observar pela **Tabela 3.11**, o valor dos deslocamentos no caso do HexMC é o maior de todos os materiais testados. Apesar disso, o valor obtido 2,316 mm, é um valor que não põe a estrutura em risco.

Segundo o **ANEXO D.2**, o valor da força de contacto roda dianteira – piso em regime estacionário é de 1937,475 N.

	Al 6061-T6	Al 7075-T6	HexMC
$\sigma_{ced} = \sigma_{m\acute{a}x} [MPa]$	276	503	300
$\frac{F_{impacto}}{F_{contacto}}$	11,043	20,126	12,004

**Tabela 3.12** - Força de impacto / Força de contacto em regime estacionário



**Figura 3.20** - Força de impacto / Força de contacto em regime estacionário vs. Tensão de cedência do material

No caso de impacto podemos afirmar que o HexMC suporta aproximadamente 12 vezes a força de contacto do pneu dianteiro em regime estacionário. Este valor é ligeiramente superior ao do Al6061-T6.

### 3.8 Considerações de projeto

O projeto de componentes com compostos de moldação estruturais deve levar em conta:

- Forma do componente e requisitos funcionais;
- Pré-forma de carga para o molde;
- Projeto do molde (determinação da carga de carregamento, como o fluxo irá ocorrer e como o componente será removido);
- O efeito do projeto nos custos de produção globais. (14)

Cada um destes pontos deverá ser considerado, de forma a atingir o melhor design, que corresponda às necessidades de peso, performance e custo.

Para além do referido, devem ser evitadas mudanças bruscas de espessura no projeto da peça. Isto pode causar, com que as fibras acabem numa transição, resultando em concentração de tensões. Isto é particularmente indesejável nos cantos, pelo que devem ser consideradas transições com raios generosos. (14)

Nas áreas onde são aplicadas cargas, nomeadamente nos locais onde existem parafusos para fixação e onde se inserem os tubos da forquilha e o eixo de direção, devem ser colocados insertos metálicos. Isto devido à reação galvânica existente entre o carbono e o alumínio, nas zonas em que estes entram em contato. (14)

Este aspeto é bastante importante durante a escolha do processo, uma vez que é necessário garantir uma correta colocação do inserto durante a fase de cura.



## 4 Processos de Fabrico e Análise de Custos

Neste capítulo irá ser abordado o processo de fabrico do componente com o material compósito escolhido, assim como será feita uma análise de custos simples de forma a se poder comparar os diferentes materiais e processos inerentes.

### 4.1 Processo de fabrico HexMC

O HexMC é um material que se encontra adequado à produção em massa. Para tal, é necessário o uso de moldes metálicos devido às elevadas pressões e temperaturas para moldar e curar o HexMC. Os moldes são tipicamente feitos em aço ao carbono. A superfície do molde pode ser revestida em níquel ou cromada, para um ótimo acabamento superficial. O design do molde e a sua tecnologia de fabrico são bastante semelhantes às usadas para o processamento do SMC.

Existem várias combinações de temperatura e tempos de cura, mas na maioria dos casos é utilizada a maior temperatura de cura possível de forma a minimizar o tempo do material na prensa e conseqüentemente minimizar o tempo de produção. As características que podem afetar o tempo de moldação são a espessura da peça e a instalação da pré-forma.

Os insertos metálicos necessários são integrados no processo de moldação, evitando assim processos adicionais.

O ciclo típico de cura para por exemplo um componente com espessura de 4 mm é dado pela seguinte tabela.

Temperatura	Tempo de cura
120°C	8 min
130°C	6 min
140°C	4 min
150°C	3 min

**Tabela 4.1** - Temperatura e tempo de cura para o HexMC para espessura de 4 mm (23)

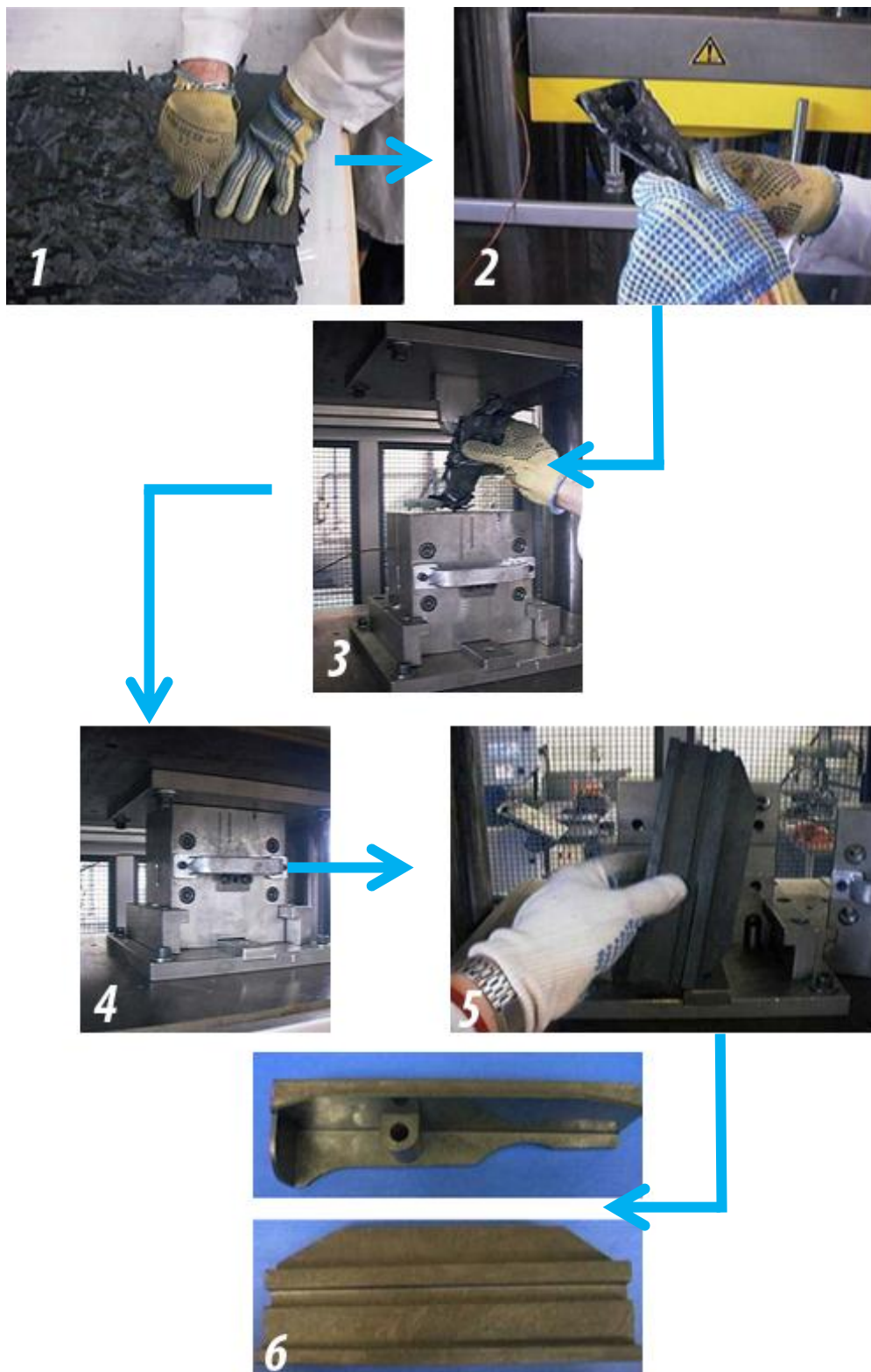


Figura 4.1 - Etapas do processo de fabrico do HexMC. Adaptado de (24)

**Etapas do processo de fabrico:**

1. O HexMC é fornecido em rolo. Deve ser retirado da câmara frigorífica e permitir que aqueça até à temperatura ambiente para um mais fácil manuseio. Após remoção do filme protetor, o material é cortado e pesado conforme as necessidades do componente a produzir;
2. Dependendo do componente a ser moldado, a pressão deve-se situar entre 50 e 150 bar e a temperatura entre 110°C e 125°C;
3. A carga/pré-forma é colocada no interior do molde de compressão. É recomendado que aproximadamente 80% da área do molde esteja coberta. Deve ser aplicado um desmoldante ao molde também;
4. Sob temperatura e pressão, o material flui e preenche o molde. Dá-se aqui o tempo de cura necessário. O tempo e a temperatura de cura varia de acordo com a espessura do componente. Um ciclo típico de cura é 15 minutos a 120°C.
5. Após a cura, deve-se retirar o componente. É aconselhado um molde equipado com pinos de ejeção para ajudar à desmoldação. O HexMC é formulado com um desmoldante interno, por isso o molde apenas necessita de ser revestido a cada 5 componentes moldados;
6. Exemplo de componente final após desmoldação.

## 4.2 Análise de Custos

A análise de custos é um fator muito importante no processo de desenvolvimento de produto, uma vez que pode aprovar ou inviabilizar uma hipotética solução ou projeto.

O custo de produção de um componente é a totalidade de custos incorridos na sua produção durante um determinado período tempo. É composto por três elementos: materiais diretos, mão-de-obra direta e custos indiretos de fabrico.

- **Materiais diretos:** referem-se a todo material que se integra no produto e que possa ser incluído diretamente no cálculo do custo do produto. Ex: matéria-prima, componentes secundário, material de embalagens;
- **Mão-de-obra direta:** é o custo de qualquer trabalho executado no produto alterando a forma e natureza do material de que se compõe. Ex: gasto total com salários e encargos com a mão-de-obra relacionada diretamente ao produto;
- **Custos indiretos de fabrico:** são os outros demais custos necessários para a operação da fábrica. Ex: materiais indiretos, mão-de-obra indireta, energia elétrica, seguro e aluguer da fábrica, depreciação de máquinas.

A análise feita irá apenas incidir sobre a componente dos materiais diretos, nomeadamente, sobre o custo da matéria-prima em cada processo.

O preço dos alumínio foi obtido junto da empresa “Lanema” e do HexMC junto da empresa “Hexcel”.

	Preço [€/kg]
Al 6061-T6	6,60
Al 7075-T6	7,80
HexMC	105

Tabela 4.2 – Preço [€/kg] de cada material testado

	Massa Componente [kg]
Al 6061-T6	0,516
Al 7075-T6	0,537
HexMC	0,296

Tabela 4.3 - Massa final do componente para cada material testado

Como se pode observar através da TABELA 4.3, existe uma redução bastante significativa na massa do componente. Em relação ao Al6061-T6 existe uma redução de 42,6% e no Al7075-T6 de 44,9%.

De forma a poder maquinar o componente é necessária uma placa com as seguintes dimensões: 269,92 x 112,95 x 41 mm.

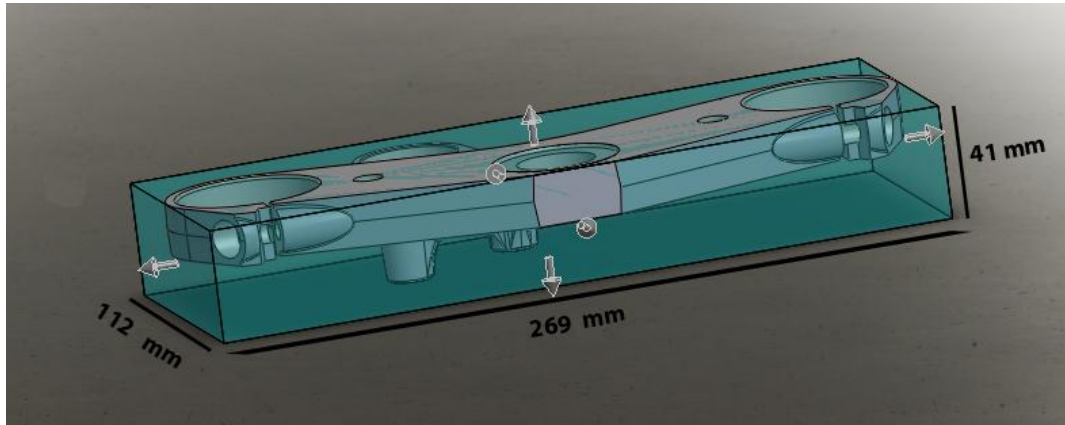


Figura 4.2 - Placa necessária para maquinar o componente

Maquinagem	Massa Necessária [kg]	Preço Matéria Prima /Peça[€]
Al 6061-T6	3,375	22,28
Al 7075-T6	3,513	27,40

Tabela 4.4 - Preço Matéria-Prima/Peça [€] para processo de maquinagem

Na maquinagem existe um grande desperdício de matéria-prima, neste caso existe um desperdício de material de aproximadamente 84,7%. Temos assim um preço de matéria-prima por peça de 22,28€ para o Al6061-T6 e de 27,40 para o Al7075-T6. A maior parte dos “triple clamps” maquinados pertencem a um mercado mais de personalização, onde os condutores tentam substituir o componente original por outro com diferente valor de “offset”, mudando assim as características do motociclo.

Como referido na SECÇÃO 2.5.7, no forjamento entre 20 a 40% do material é rebarba, logo à massa final do componente temos de adicionar este aumento. Considerando o valor mais alto, temos:

$$\text{massa necessária} = \text{massa final do componente} + 0,4 \text{ massa necessária}$$

Forjamento	Massa Necessária [kg]	Preço Matéria Prima /Peça[€]
Al 6061-T6	0,860	5,68
Al 7075-T6	0,895	6,98

Tabela 4.5 - Preço Matéria-Prima/Peça [€] para processo de forjamento

Neste caso temos um preço de matéria-prima por peça de 5,68€ para o Al6061-T6 e de 6,98€ para o Al7075-T6. Após o processo de forjamento, é sempre necessária uma etapa de maquinagem, de modo a melhorar a qualidade superficial do componente e a proceder a alguns ajustes, o que irá aumentar o preço final da peça.

No processo de moldação por compressão não existe desperdício de material, o que é uma das suas principais vantagens. Outra vantagem, apesar do custo da matéria-prima, é o facto de o produto após moldação, não necessitar de mais operações. Sendo assim, o preço da matéria-prima por peça é de 31,08€.

<b>Moldação por compressão</b>	<b>Massa Necessária [kg]</b>	<b>Preço Matéria Prima /Peça[€]</b>
<b>HexMC</b>	0,296	31,08

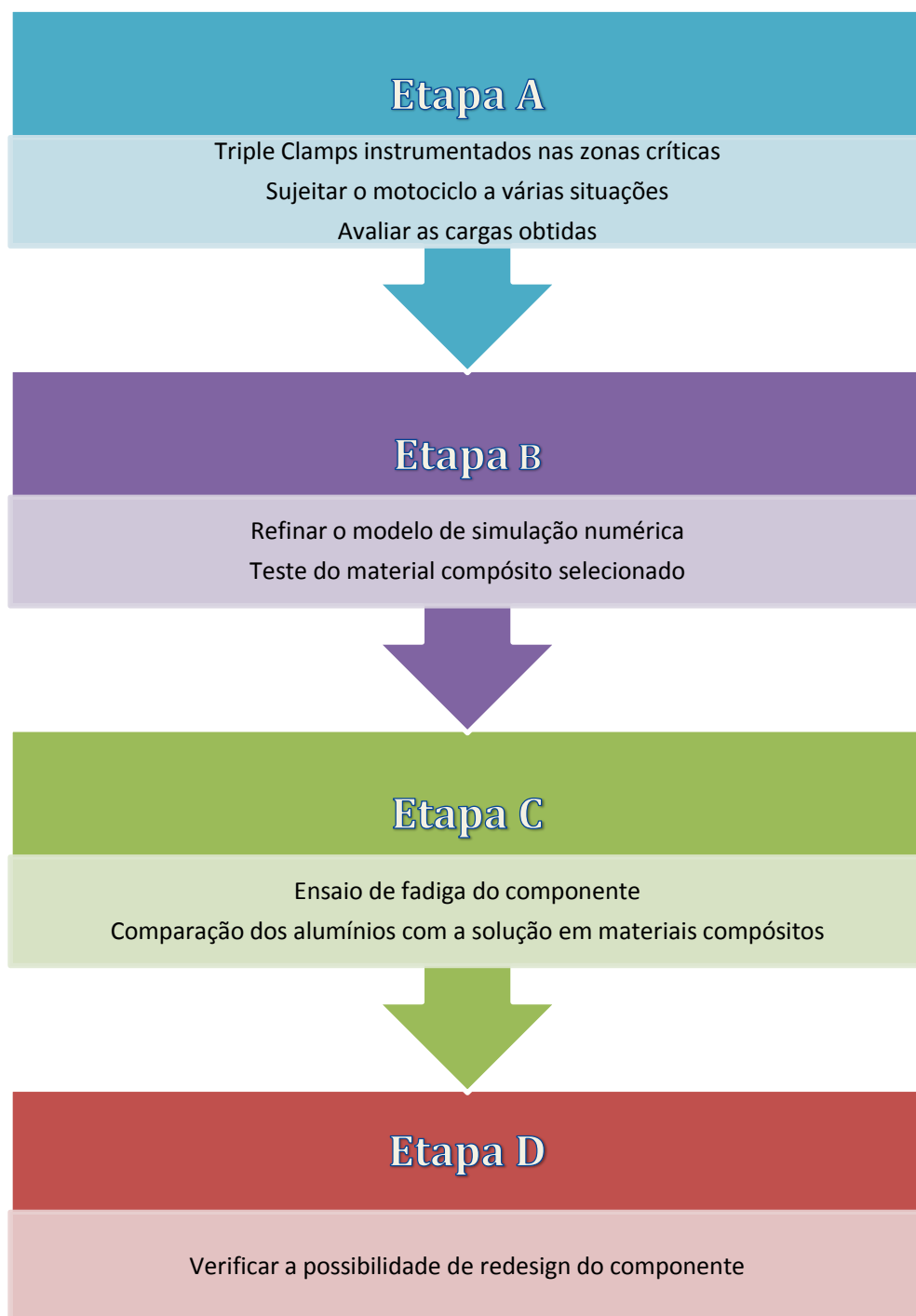
**Tabela 4.6** - Preço Matéria-Prima/Peça [€] para processo de moldação por compressão

## 5 Discussão de Resultados e Trabalhos Futuros

Uma das principais dificuldades no presente trabalho foi a caracterização das cargas a aplicar no modelo de elementos finitos para simulação numérica. Especialmente devido ao facto, do componente testado pertencer a um conjunto onde se integra a suspensão do motociclo, com as suas características específicas de rigidez e amortecimento. As situações de impacto também são difíceis de caracterizar, sendo talvez o método utilizado não muito adequado. Contudo deu para se obter uma primeira impressão dos valores que se podem atingir. Ao nível dos materiais, deveriam ser testadas outras possibilidades de materiais cujo custo da matéria-prima fosse mais baixo e que fossem viáveis de produzir por outros processos, tais como, o RRIM, SRIM ou RTM. A nível de análise de custos seria também importante ter uma melhor ideia do custo final de cada processo, não só do preço da matéria-prima por componente mas também dos custos associados ao processo de fabrico em si. Só deste modo é que poderia ser feita uma melhor avaliação da viabilidade do material testado.

No que diz respeito a trabalhos futuros, estes deverão ser divididos em 4 etapas. A primeira etapa a ser considerada (A) engloba a instrumentação do triple clamp superior e inferior de um motociclo nas zonas previamente consideradas com críticas, isto é, sujeitar o motociclo a diversas situações típicas, travagem, curva, aceleração e impacto. Mediante a avaliação das cargas obtidas, deverá ser refinado o modelo de simulação numérica e proceder ao teste do material compósito escolhido (etapa B). Como este componente está sujeito a vários ciclos de travagem e de outras solicitações cíclicas durante uma viagem, é importante testar este componente à fadiga. Esta é a etapa C, onde se devem comparar e analisar os resultados obtidos nos diferentes tipos de material. A última etapa (D), é a verificação da possibilidade de redesign do componente. Neste redesign, deve ter-se em conta como principal objetivo a redução de peso, mantendo as principais especificações do triple clamp original, nomeadamente:

- Offset;
- Distância entre tubos;
- Diâmetro dos tubos da forquilha e da coluna de direção.



**Figura 5.1** - Etapas para trabalhos futuros

## 6 Conclusões

Como uma nova forma de material, os compostos de moldação baseados em pré-impregnados de fibra curta, apresentam uma boa solução na substituição do alumínio. No caso do presente trabalho, o composto de moldação HexMC oferece uma boa oportunidade de substituir o Al 6061-T6 neste tipo de componente, alcançando uma boa economia no peso, mas mantendo os requisitos de resistência do material. As capacidades de moldação e os elevados requisitos de resistência fazem do HexMC um bom candidato para atender às especificidades da substituição do alumínio. Uma das suas desvantagens é o elevado custo da matéria-prima, o que poderá inviabilizar a sua utilização.

Com a crescente demanda na utilização de compósitos em aplicações estruturais, há uma real necessidade de substituição dos componentes de interface, de forma a não se criar reação galvânica com o carbono. Com esta substituição dos componentes de interface, não haverá tão grande necessidade de colocação de insertos metálicos, diminuindo assim o custo global do componente. Quando se fala em componentes de interface neste caso, está a fazer-se referência aos tubos da forquilha e eixo da coluna de direção. Uma boa possibilidade de estudo seria uma suspensão dianteira integralmente feita em compósitos com fibra de carbono ou outros materiais compósitos adequados à situação.

Ao nível do trabalho realizado uma das principais dificuldades foi a realização de simulações em elementos finitos, uma vez que as situações de impacto são bastante difíceis de se caracterizar e modelizar. A informação existente para a análise deste tipo de solicitações é bastante escassa, contudo os principais objetivos do trabalho foram cumpridos.

Quanto a trabalhos futuros é importante tentar avaliar as cargas existentes no componente nas diversas situações durante uma viagem, refinar/melhorar o modelo de elementos finitos, testar o componente à fadiga, verificar a possibilidade de redesign e melhorar o modelo de análise de custos.



## Referências

1. **Universidade Federal de Santa Catarina: UFSC.** *Núcleo de desenvolvimento integrado de produtos - Slides.*
2. **Cossalter, Vittore.** *Motorcycle Dynamics.* 2006.
3. *The stability of the bicycle.* **Jones, David E. H.** 4, s.l. : Physics Today, 1970, Vol. 23, pp. 34-40.
4. *A bicycle can be self-stable withoy gyroscopic or caster effects.* **J. D. G. Kooijman, J. P. Meijaard, J. M. Papadopoulos, A. Ruina, and A. L. Schwab.** s.l. : Science, 2011, Vol. 332, pp. 339-342.
5. *Single-Track Vehicle Modeling and Control: Bicycles, Motorcycles, and Models.* **Limebeer, D. J. N. e Sharp, R. S.** s.l. : IEEE Control Systems Magazine, 2006, pp. 34-61.
6. **Foale, Tony.** *Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science.* 2002.
7. Motorcycle rake, trail and offset explained. [Online] <http://bikearama.com/theory/motorcycle-rake-trail-explained/>.
8. **Alessandro Airoidi, Simone Bertoli, Luca Lanzi, Marco Sirna, Giuseppe Sala.** Design of a Motorcycle Composite Swing-Arm by Means of Multi-objective Optimisation. *Applied Composite Materials.* 2012, Vol. 19, 3-4, pp. 599-618.
9. **Moreira, Anabela Mendes.** *Materiais de Construção I - Materiais Compósitos (Apontamentos da Disciplina).* s.l. : Instituto Politécnico de Tomar, 2008/2009.
10. *Materiais Compósitos - Slides da disciplina.* **Freitas, Manuel e Silva, Arlindo.** s.l. : Instituto Superior Técnico.
11. **Gay, Daniel e V.Hoa, Strong.** *Composite Materials - Design and Applications.* 2007.
12. *Composite structures for automobiles.* **Beardmore, P.** s.l. : Composite Structures, 1986, Vol. 2, pp. 163-176.
13. *Design and production of composites in the automotive industry.* **Smith, G.F.** s.l. : Composites Manufacturing, 1990, Vol. 1, pp. 112-116.
14. *Chopped prepregs- A compelling performance and cost alternative material form.* **D. Fudge, Jack.** s.l. : Tencate Advance Composites.
15. **Universidade de Coimbra.** *Slides da Disciplina - Processamento de materiais compósitos.*
16. **Martins, Laura.** Anodização e coloração de Peças em Alumínio. FEUP//DEEC.

## Referências

---

17. **Moré, Joan Locutura i.** *Comparison between a tubular frame and a beam frame - Master Thesis.* s.l. : Politecnico di Milano; Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2011.
18. <http://thetrxproject.blogspot.pt/>. *TRX Project.* [Online]
19. **S., Bozic, Gombac, E. e Harmel, A.** *Redesign of Motorcycle Rear Suspension with CAD Technology.* Slovenia : The Faculty of Maritime Studies and Transport.
20. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061t6>. *Aluminum 6061-T6.* [Online]
21. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6>. *Al 7075-T6.* [Online]
22. Hexcel Website. [Online] <http://www.hexcel.com/>.
23. **Hexcel.** Datasheet HexMC. [Online] <http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Molding-Data-Sheets/EUVersion.pdf>.
24. —. User guide HexMC. [Online] [http://www.hexcel.com/Resources/UserGuides/HexMC\\_UserGuide.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/UserGuides/HexMC_UserGuide.pdf).
25. *An innovative multi dof TMD system for motorcycle handlebars designed to reduce structural vibrations and human exposure.* **Agostini, S., et al., et al.** Milano, Italy : Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, Vol. 31, pp. 298-315.
26. **Rodrigues, José Dias.** *Apointamentos de Vibrações de Sistemas Mecânicos.* Porto : FEUP.
27. **Lanema.** ALUMÍNIOS TÉCNICOS . [Online] <http://www.lanema.pt/>.
28. **Yamaha.** User Manual Yamaha R1 2000. [Online] [http://www.yamaha-motor.com/assets/service/manuals/2000/lit-11626-13-46\\_112.pdf](http://www.yamaha-motor.com/assets/service/manuals/2000/lit-11626-13-46_112.pdf).
29. **O'Dea, Nigel.** Motorcycle swingarm redesigned in carbon composite. *Reinforced Plastics.* Novembro/Dezembro de 2011, pp. 38-41.
30. **Oyaga, Mikel Burgui e Rubio, Alfred Ursúa.** *Analysis and Design of a Motorbike Chassis.* Pamplona : Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2011.
31. **Dwyer, Forrest, Shaw, Adrian e Tombarelli, Richard.** *Material and Design Optimization for an Aluminum Bike Frame.* s.l. : WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2012.
32. *"Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review".* **J. P. Meijaard, J. M. Papadopoulos, A. Ruina, and A. L. Schwab.** 2084, 2007 : . Proc. R. Soc. A, 2007, Vol. 463, pp. 1955-1982.
33. **International Standard.** *Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration.*
34. **Hexcel.** Brochura HexMC. [Online] <http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/HexMC.pdf>.

# Anexo A Parâmetros geométricos de um motociclo

Os parâmetros geométricos mais usados para descrever motocicletas são os seguintes:

- Distância entre eixos;
- Ângulo rake ou ângulo da suspensão/forquilha ;
- Trail.

Estes parâmetros são medidos com o motociclo na posição vertical e com um ângulo de direção no guiador igual a zero.

A distância entre eixos é a distância entre os pontos de contacto dos pneus na estrada. O ângulo rake é o ângulo entre o eixo vertical e o eixo de rotação da parte dianteira (eixo da coluna de direção). O trail é a distância, medida no plano do piso, entre o ponto de contacto da roda dianteira e o ponto de intersecção do eixo do cabeçote de direção com a estrada.

Estes parâmetros são importantes para definir a manobrabilidade de um motociclo. Não é comum, contudo, analisar os efeitos produzidos apenas por um parâmetro geométrico, independentemente dos outros, devido à forte interação entre eles. Em seguida vão ser apresentadas algumas considerações sobre o modo como estes parâmetros influenciam o comportamento dinâmico e cinemático dos motociclos.

O valor da distância entre eixos varia de acordo com o tipo do motociclo.

Distância entre eixos	Tipo de Motociclos
<1200 mm	Scooters
Entre 1200 e 1350	Motociclos pequenos (125 cc)
Entre 1350 e 1600	Motociclos de média dimensão (250 cc)
>1600	Motociclos touring

**Tabela A.1** - Variação da distância entre eixos em função do tipo de motociclo. Adaptado de (2)



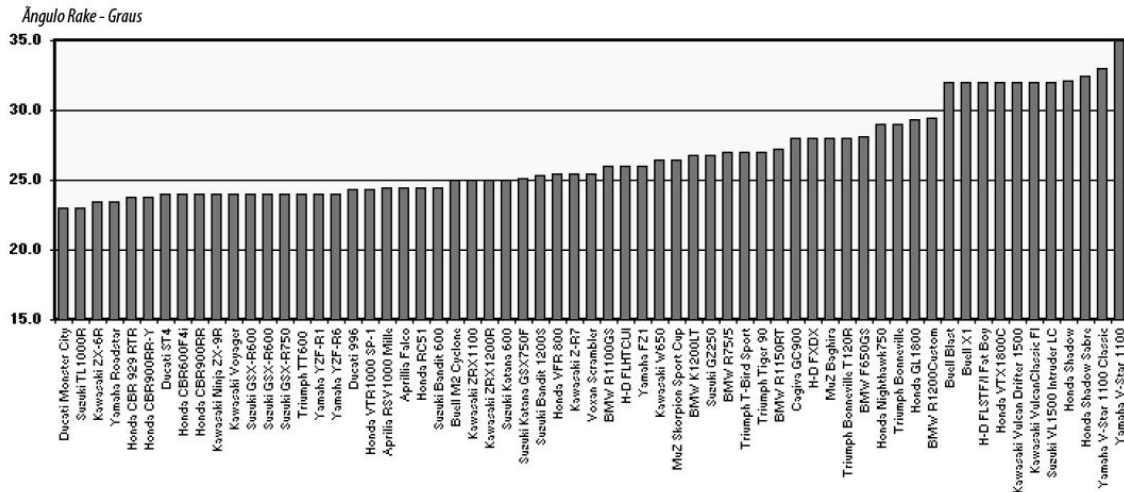


Figura A.2 - Valores típicos do ângulo rake (6)

O valor do ângulo rake (ângulo da forquilha) está intimamente relacionado com o valor do trail. Em geral, de modo ao motociclista ter um boa sensação de manobrabilidade, um aumento do ângulo rake deve ser acoplado com um correspondente aumento do trail.

O valor do trail depende do tipo de motociclo e da sua distância entre eixos.

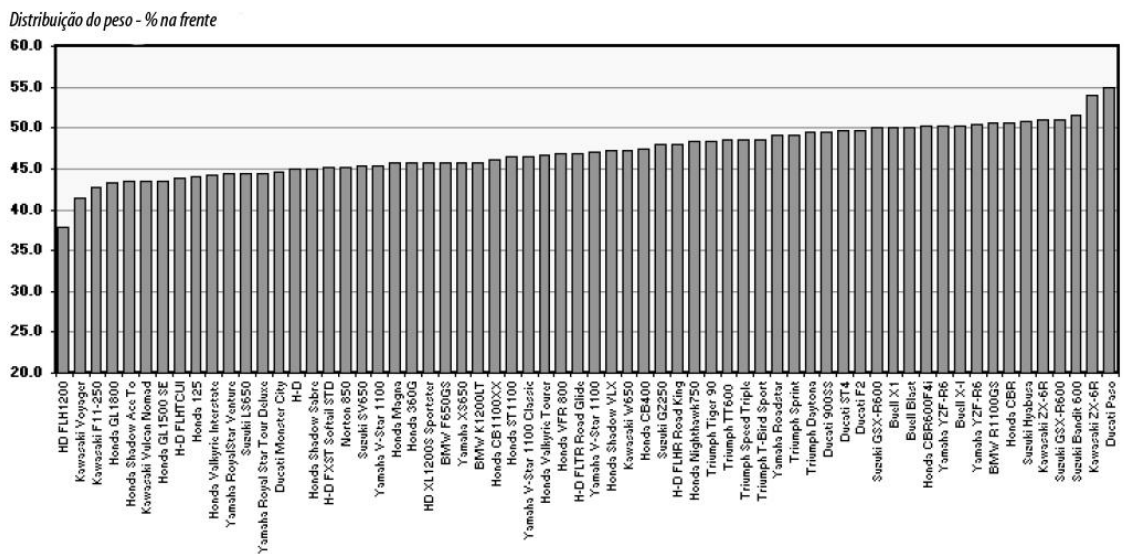


Figura A.3 - Valores típicos da distribuição do peso - % na roda da frente (6)

Anexo A – Parâmetros geométricos de um motociclo

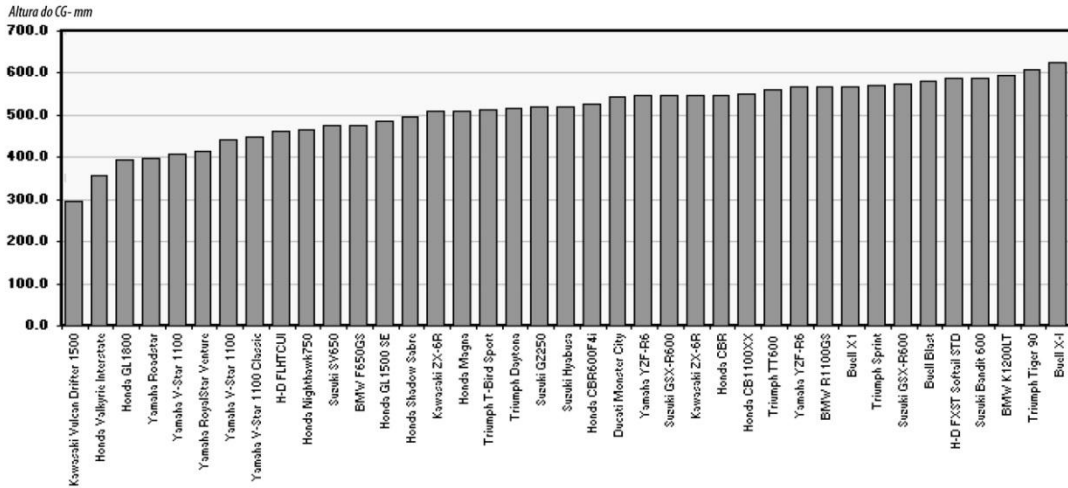


Figura A.4 - Valores típicos da altura do centro de gravidade (6)

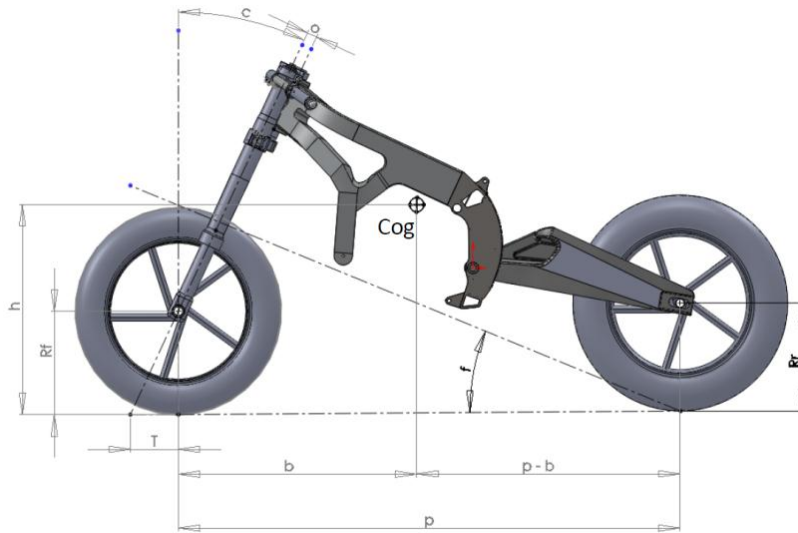


Figura A.5 - Esquema de motociclo e identificação dos seus principais parâmetros geométricos. Adaptado de (17)

Símbolo	Parâmetro	Símbolo	Parâmetro
<b>Cog</b>	Centro de gravidade	<b>h</b>	Altura do cog
<b>p</b>	Distância entre eixos	<b>c</b>	Angulo de rake
<b>b</b>	Distância do cog para a frente	<b>o</b>	Offset
<b>p-b</b>	Distância do cog para trás	<b>T</b>	Trail
<b>Rf</b>	Raio roda frente	<b>f</b>	Ângulo de transferência de carga
<b>Rr</b>	Raio roda atrás		

Tabela A.2 - Simbologia e identificação de parâmetros da FIGURA A.5

## Anexo B Características Yamaha YZF-R1 2000

Comprimento total	2035 mm
Largura total	695 mm
Altura total	1105 mm
Altura do assento	815 mm
Distância entre eixos	1395 mm
Altura Centro de Gravidade	550 mm
Trail	92 mm
Offset da forquilha	35 mm
Rake	24°
Peso seco (sem óleo nem combustível)	175 kg
Peso	194 kg
Carga máxima (condutor+passageiro+acessórios...)	201 kg
Raio roda dianteira	300 mm
Raio roda traseira	311 mm
Tipo suspensão dianteira	Forquilha telescópica
Curso dos garfos suspensão	135 mm
Comprimento livre da mola de suspensão	255 mm
Comprimento instalado	242,4 mm
Constante rigidez da mola	7,35 N/mm
Curso da mola	0 – 135 mm

Tabela B.1 - Características Yamaha YZF-R1 2000 (28)



## Anexo C Cálculo de Forças Externas

### C.1 Regime estacionário

Em primeiro lugar, irão ser calculadas as forças de contacto do motociclo em regime estacionário.

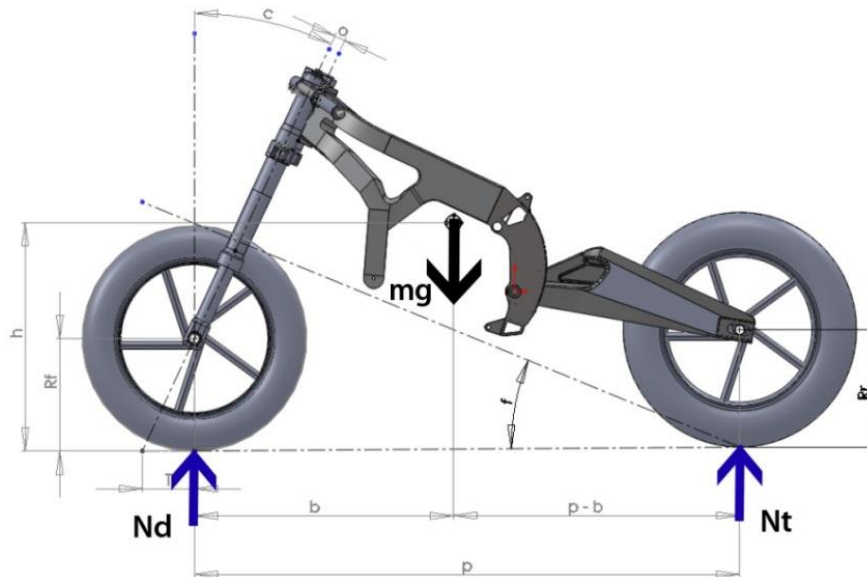


Figura C.1 - Esquema de forças motociclo em estado estacionário. Adaptado de (17)

$$N_d = \frac{(p - b)mg}{p} \quad (\text{C.1})$$

$$N_t = \frac{bmg}{p} \quad (\text{C.2})$$

Considerando os valores apresentados no **ANEXO B**, temos:

$$N_d = \frac{(1,395 - 0,6975) \times (201 + 194) \times 9,81}{1,395} = 1937,475 \text{ N} \quad (\text{C.3})$$

$$N_t = \frac{0,6975 \times (201 + 194) \times 9,81}{1,395} = 1937,475 \text{ N} \quad (\text{C.4})$$

## C.2 Aceleração Máxima

Segundo as equações 3.7 e 3.8 e a SECÇÃO 3.1.1, considera-se que para a aceleração máxima:

$$N_t = mg \quad (C.5)$$

$$N_d = 0 \quad (C.6)$$

$$T = mg \times \frac{p - b}{h} \quad (C.7)$$

Tendo em conta os parâmetros do ANEXO B:

$$N_t = (201 + 194) \times 9,81 = 3874,950 \text{ N} \quad (C.8)$$

$$N_d = 0 \quad (C.9)$$

$$T = (201 + 194) \times 9,81 \times \frac{(1,395 - 0,6975)}{0,55} = 4914,14 \text{ N} \quad (C.10)$$

## C.3 Máxima travagem na roda dianteira

Segundo as equações 3.10 e 3.11 e a SECÇÃO 3.1.2, considera-se que para a condição de máxima travagem na roda dianteira:

$$N_t = 0 \quad (C.11)$$

$$N_d = mg \quad (C.12)$$

$$F = mg \times \frac{b}{h} \quad (C.13)$$

Tendo em conta os parâmetros do ANEXO B:

$$N_t = 0 \quad (C.14)$$

$$N_d = (201 + 194) \times 9,81 = 3874,95 \text{ N} \quad (C.15)$$

$$F = (201 + 194) \times 9,81 \times \frac{0,6975}{0,55} = 4914,14 \text{ N} \quad (C.16)$$

## C.4 Máxima travagem na roda traseira

Segundo as equações 3.12 a 3.17 e a SECÇÃO 3.1.3 considera-se que para a condição de máxima travagem na roda traseira:

$$N_t = mg \times \left( \frac{100 - a}{100} \right) \times \left( \frac{tcspt}{100} \right) \quad (C.17)$$

$$F = N_t \times \mu \quad (C.18)$$

$$N_d = mg - N_t \quad (C.19)$$

$$T = N_d \times \mu \quad (C.20)$$

Em que:

- $a$  é % de transferência de carga da roda traseira para a dianteira. ( $a=20\%$ );
- $tcspt$  é a transferência de carga na posição estática (roda traseira);
- $tcspd$  é a transferência de carga na posição estática (roda dianteira).;

$$tcspd = \frac{p - b}{p} \quad (C.21)$$

$$tcspt = 1 - tcspd \quad (C.22)$$

- $\mu = 0,9$ .

Tendo em conta os parâmetros do ANEXO B:

$$tcspd = \frac{1,395 - 0,6975}{1,395} = 0,5 = 50\% \quad (C.23)$$

$$tcspt = 1 - 0,5 = 0,5 = 50\% \quad (C.24)$$

$$N_t = (201 + 194) \times 9,81 \times \left( \frac{100 - 20}{100} \right) \times \left( \frac{50}{100} \right) = 1549,98 \text{ N} \quad (C.25)$$

$$F = 1549,98 \times 0,9 = 1394,98 \text{ N} \quad (C.26)$$

$$N_d = (201 + 194) \times 9,81 - 1549,98 = 2324,97 \quad (C.27)$$

$$T = 2324,97 \times 0,9 = 2092,47 \quad (C.28)$$

## C.5 Quando o motociclo está em curva

Segundo as equações 3.18 a 3.21 e a SECÇÃO 1.1.1, quando o motociclo está em curva, considera-se que:

$$N_d = tcspd \times mg \quad (C.29)$$

$$F = \mu \times N_d \quad (C.30)$$

$$N_t = tcspt \times mg \quad (C.31)$$

$$T = \mu \times N_t \quad (C.32)$$

Tendo em conta os parâmetros do ANEXO B e os valores para as transferências de carga calculadas anteriormente:

$$N_d = 0,5 \times (201 + 194) \times 9,81 = 1937,48 \text{ N} \quad (C.33)$$

$$F = 0,9 \times 1937,48 = 1743,73 \text{ N} \quad (C.34)$$

$$N_t = 0,5 \times (201 + 194) \times 9,81 = 1937,48 \text{ N} \quad (C.35)$$

$$T = 0,9 \times 1937,48 = 1743,73 \text{ N} \quad (C.36)$$

# Anexo D Cálculo de Forças para aplicação no software de Elementos Finitos

## D.1 Máxima travagem na roda dianteira

Tal como visto em 3.1, a solicitação onde ocorrem os maiores esforços no conjunto dianteiro, é o caso da máxima travagem na roda dianteira. Seguidamente, serão calculados as várias forças para posterior aplicação em *Abaqus*.

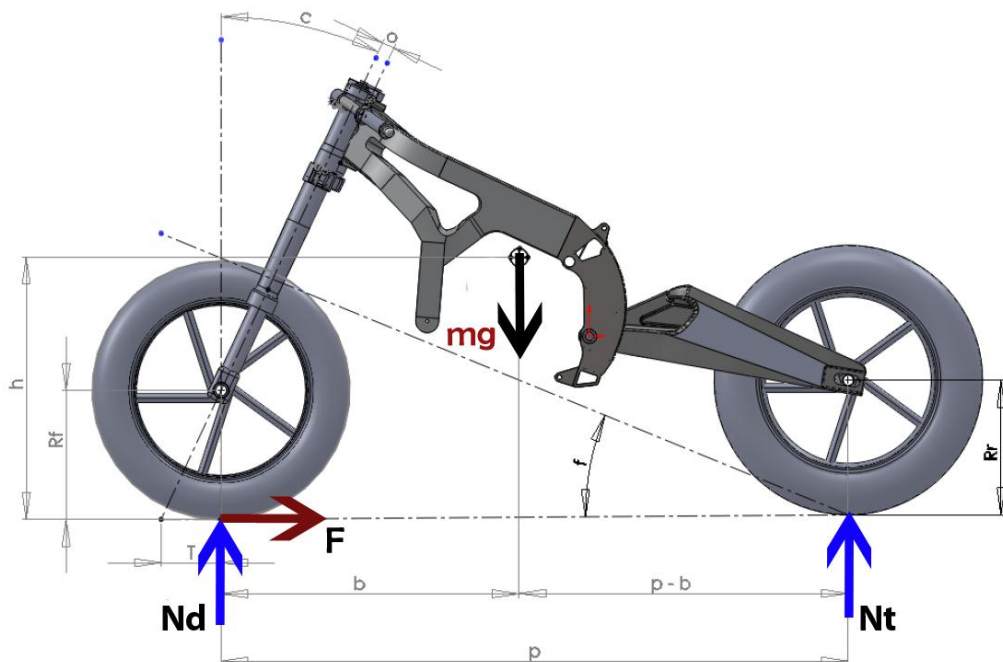


Figura D.1 - Esquema de forças travagem máxima na roda dianteira. Adaptado de (17)

Segundo a SECÇÃO 3.1.5 temos:

$$N_d = 3874,95 \text{ N} \quad (\text{D.1})$$

$$F = 4914,14 \text{ N} \quad (\text{D.2})$$

Seguidamente temos que calcular os esforços no eixo do pneu dianteiro:

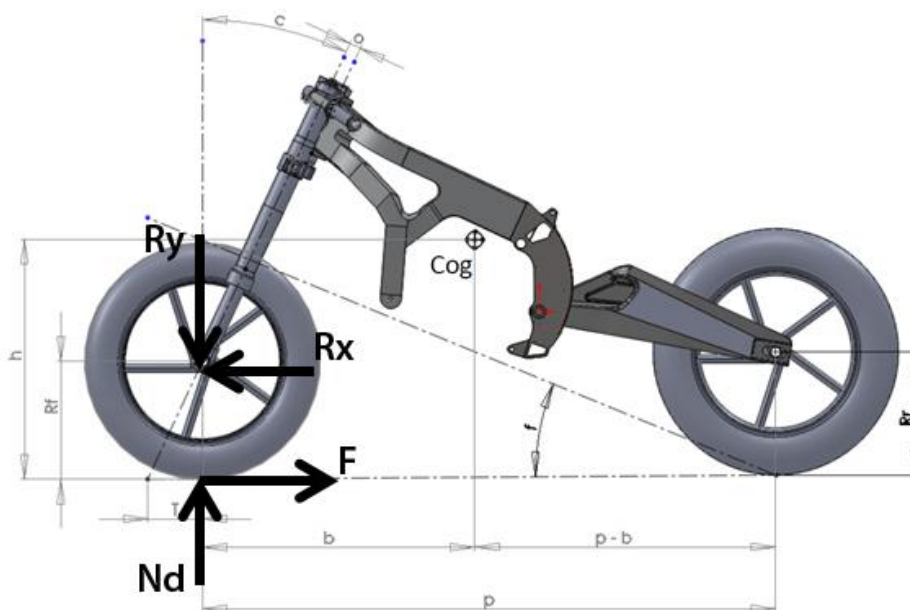


Figura D.2 - Forças na roda dianteira. Adaptado de (17)

Da imagem anterior, podemos retirar que:

$$N_d = R_y \quad (D.3)$$

$$F = R_x \quad (D.4)$$

Procedendo a uma análise do conjunto dianteiro, temos o seguinte diagrama de corpo livre:

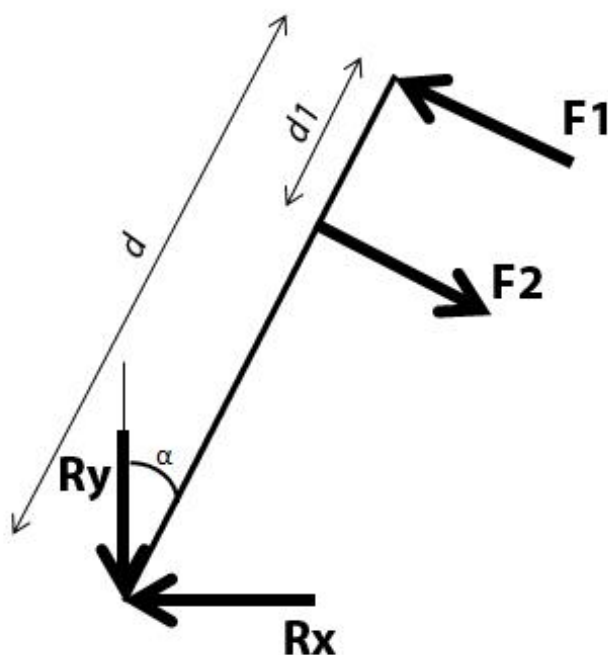


Figura D.3 - Esquema para cálculo de forças nos triple clamps

$$\sum M_1 = 0 \therefore d1 \times F2 + d \times \sin \alpha \times R_y - d \times \cos \alpha \times R_x = 0 \quad (D.5)$$

$$F2 = \frac{d \times \cos \alpha \times R_x - d \times \sin \alpha \times R_y}{d1} \quad (D.6)$$

$$\sum M_2 = 0 \therefore d1 \times F1 + (d - d1) \times \sin \alpha \times R_y - (d - d1) \times \cos \alpha \times R_x = 0 \quad (D.7)$$

$$F1 = \frac{(d - d1) \times \cos \alpha \times R_x - (d - d1) \times \sin \alpha \times R_y}{d1} \quad (D.8)$$

Considerando os seguintes valores e as equações anteriores temos:

- $\alpha = 24^\circ$
- $d = 734 \text{ mm}$
- $d1 = 150 \text{ mm}$

$$F2 = \frac{0,734 \times \cos 24^\circ \times 4914,14 - 0,734 \times \sin 24^\circ \times 3874,95}{0,150} = 14255,289 \text{ N} \quad (D.9)$$

$$F1 = \frac{(0,734 - 0,150) \times \cos 24^\circ \times 4914,14 - (0,734 - 0,150) \times \sin 24^\circ \times 3874,95}{0,150} \quad (D.10)$$

$$= 11342,082 \text{ N}$$

## D.2 Impacto

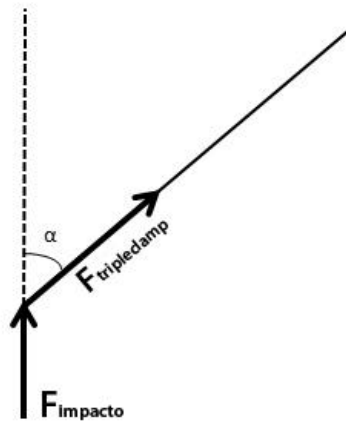
Analisando a **FIGURA 3.16** pode-se observar que para o caso apresentado a força de contacto no pneu dianteiro passa de aproximadamente 1100 N para 3600 N, aumentando cerca de 3,3 vezes. Portanto, para esta análise vai se considerado o seguinte:

$$F_{\text{impacto}} = 3,3 \times N_d \quad (\text{D.11})$$

Tendo em conta os valores calculados anteriormente temos:

$$F_{\text{impacto}} = 3,3 \times 1937,475 = 6393,668 \text{ N} \quad (\text{D.12})$$

Para este caso, será assumido que a força de impacto será totalmente suportada pelo triple superior.



**Figura D.4** - Esquema de forças para cálculo de força de impacto nos triples clamps

$$F_{\text{triplectamp}} = \frac{F_{\text{impacto}}}{\cos \alpha} \quad (\text{D.13})$$

Considerando os valores apresentados anteriormente e no **ANEXO B**, temos:

$$F_{\text{triplectamp}} = \frac{6393,668}{\cos 24} = 6998,74 \text{ N} \quad (\text{D.14})$$

Deste modo, a força a aplicar no triple clamp superior para esta situação de impacto será de 6998,74 N.