

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Marta que sempre me apoiou e sem a sua insistência este trabalho não seria concluído.

Aos meus pais que sempre me ajudaram e apoiaram, mesmo em momentos mais complicados.

À minha família e em particular ao meu avô António Nogueira, já falecido, que sei que ficaria feliz com esta realização.

Ao Sr. António Pinto da AJP, fundador da empresa, que com o seu esforço e empenho permitiu que este trabalho fosse realizado. Sem sua ajuda e esclarecimentos prestados este trabalho não seria realizado.

Ao Nuno Viriato e Jaime Monteiro do INEGI, cuja colaboração foi essencial no desenrolar deste trabalho e sem o seu esforço não seria possível desenvolver todas as actividades realizadas.

Por último e não menos importante, muito pelo contrário, ao Prof. Mário Vaz gostaria de agradecer principalmente a sua paciência ao longo dos anos que se passaram até ser possível a realização deste trabalho. Os seus conhecimentos foram fundamentais para não haver dispersão de objectivos e a sua orientação determinante para o cumprimento dos objectivos traçados.

A todos muito obrigado!

## RESUMO

Apresenta-se um novo chassis para um novo motociclo, conjugando uma base em aço com duas novas traves em alumínio. Desenvolveu-se um novo braço oscilante a partir de experiência anterior. Definiram-se métodos de validação do novo chassis, através da simulação por elementos finitos, testes em laboratório e testes realizados em pista, obtendo dados por telemetria.

Este trabalho deveu-se à necessidade sentida pela AJP MOTOS de validar uma nova solução para o chassis de um novo modelo, designado de PR3, através de métodos científicos, que permitissem testar o novo chassis e fundamentalmente perceber como reage o chassis aos esforços a que está sujeito.

Foi colocada a seguinte questão: será possível utilizando técnicas já conhecidas, definir uma metodologia de testes para validar um chassis de um motociclo?

Para responder a esta questão solicitou-se a colaboração do INEGI, mais concretamente do LOME, com o qual se definiram os testes em laboratório e mais relevante a forma como se iria testar o motociclo numa situação real, utilizando um sistema de telemetria para transmissão de dados em tempo real. Estes testes iriam revelar-se fundamentais para a compreensão e resolução de um problema grave detectado nos testes.

Em função dos conhecimentos que a AJP MOTOS já possuía no desenvolvimento de motociclos, bem como de experiências realizadas no projecto e execução de alguns moldes, nomeadamente de peças de alumínio obtidas pelo processo de fundição de areia, foram desenvolvidos novos componentes em computador, que respeitassem as funções que lhes estavam destinados, bem como terem um processo produtivo mais simples e económico quando comparado com componentes utilizados em modelos anteriores.

Foi feita uma pesquisa que cobriu as evoluções sofridas pelos motociclos desde a sua invenção, destacando-se as soluções desenvolvidas para o chassis e para a suspensão traseira, cujos componentes constituem a base deste trabalho. A pesquisa estendeu-se para os motociclos de Enduro, categoria na qual se insere o novo modelo PR3.

Foi feito um enquadramento da AJP no panorama motociclistico português, tendo-se apresentado os modelos de fabricantes nacionais já extintos no segmento do Enduro.

## **ABSTRACT**

It is presented a new frame for a new motorcycle, mating a steel frame with two new aluminium side parts. A new swing arm was developed from previous experience. Validation methods for a new frame were defined, through finite element simulation, experimental tests and track tests, receiving data from a telemetry system.

This work came from the need of AJP MOTOS to validate a new frame solution for a new model, called by PR3, through scientific methods, which allow to test the new frame and to understand how frame reacts to efforts.

The following question was raised: is it possible by using known techniques, to define a new test methodology to validate a motorcycle frame?

To answer this question it was asked the help of INEGI, namely LOME, and together laboratory tests were defined and more relevant, the way how it should be tested the motorcycle in real conditions, using a telemetry system to data transmission in real time. These tests would later reveal fundamental to understand and solve a serious problem detect on the tests.

Considering the knowledge that AJP MOTOS had on motorcycle development, as same previous experiences made on mould project and building, namely aluminum parts made by sand casting, same new parts were design in computer, which could respect its design functions, and also a simple production process and more economic compared with parts used on previous motorcycles.

A research was made that covered motorcycle evolution since invention, giving more attention to the solution developed to frame and rear suspension, which parts are the base for this work. Research extended to Enduro motorcycles, a category where new PR3 motorcycle belongs to.

The history of Portuguese Enduro motorcycles was shown and where and how AJP MOTOS stands on Portuguese motorcycle industry.

## Índice Geral

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUÇÃO.....                                                                  | 1  |
| 1. VEÍCULOS DE DUAS RODAS.....                                                   | 3  |
| 2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....                                                       | 5  |
| 2.1. Quadro.....                                                                 | 7  |
| 2.1.1. A evolução do quadro.....                                                 | 8  |
| 2.2. Suspensão Traseira.....                                                     | 11 |
| 2.2.1. A Evolução da Suspensão Traseira.....                                     | 13 |
| 2.2.2. Suspensão traseira progressiva com mono amortecedor.....                  | 17 |
| 2.2.3. Comparação entre as várias soluções de<br>suspensão traseira actuais..... | 18 |
| 3. MOTO DE ENDURO.....                                                           | 22 |
| 3.1. O Início.....                                                               | 22 |
| 3.2. O Enduro no pós-guerra.....                                                 | 23 |
| 3.3. A actualidade.....                                                          | 28 |
| 4. INDÚSTRIA EM PORTUGAL.....                                                    | 30 |
| 4.1. Modelos de motos de Enduro produzidos em Portugal.....                      | 31 |
| 4.1.1. CASAL.....                                                                | 31 |
| 4.1.2. FUNDADOR.....                                                             | 31 |
| 4.1.3. SIS.....                                                                  | 32 |
| 4.1.4. FAMEL.....                                                                | 32 |
| 4.1.5. ANFESA.....                                                               | 33 |
| 4.1.6. MACAL.....                                                                | 33 |
| 4.1.7. VILAR.....                                                                | 35 |
| 4.1.8. FORVEL.....                                                               | 35 |
| 4.1.9. MVM.....                                                                  | 35 |
| 5. AJP MOTOS.....                                                                | 36 |
| 5.1. AJP ARIANA 125.....                                                         | 36 |
| 5.2. AJP GALP 50.....                                                            | 38 |
| 5.3. AJP PR4 125.....                                                            | 42 |
| 5.4. AJP PROTO 400.....                                                          | 47 |
| 5.5. Bielas da suspensão traseira em alumínio.....                               | 50 |
| 6. VALIDAÇÃO ESTRUTURAL DE UM NOVO CONCEITO DE CHASSIS.....                      | 52 |
| 6.1. Validação da estrutura de um veículo de duas rodas.....                     | 53 |
| 6.2. Identificação dos aspectos principais do projecto.....                      | 55 |
| 6.2.1. O quadro.....                                                             | 55 |
| 6.2.2. Simulação numérica da trave.....                                          | 60 |
| 6.2.3. Braço oscilante.....                                                      | 65 |



|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 6.2.4. Progressividade da suspensão traseira..... | 66 |
| 6.2.5. Simulação numérica do braço.....           | 68 |
| 6.3. Ensaaios experimentais .....                 | 70 |
| 6.3.1. Ensaaios estáticos em laboratório .....    | 72 |
| 6.4. Testes em pista.....                         | 76 |
| 6.4.1. Preparação da moto.....                    | 77 |
| 6.4.2. Primeiro teste em pista.....               | 78 |
| 6.4.3. Segundo teste em pista .....               | 81 |
| 6.4.4. Terceiro teste em pista.....               | 82 |
| 6.4.5. Acções realizadas após os testes.....      | 88 |
| 6.4.6 Quarto teste em pista .....                 | 93 |
| 6.5. Soluções implementadas para produção.....    | 94 |
| 7. CONCLUSÕES.....                                | 95 |
| 8. REFLEXÃO CRÍTICA DO TRABALHO REALIZADO.....    | 97 |
| 9. PROPOSTAS PARA O FUTURO.....                   | 98 |
| BIBLIOGRAFIA.....                                 | 99 |

### Índice de figuras

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1 - Bicicleta a vapor de Sylvester Roper.....                          | 5  |
| Fig. 2 - Réplica do primeiro motociclo com motor a gasolina de Daimler..... | 6  |
| Fig. 3 - NSU – 1914.....                                                    | 7  |
| Fig. 4 - Indian Hendee Special – 1914.....                                  | 7  |
| Fig. 5 - Hildebrandt & Wolfmüller de 1894.....                              | 7  |
| Fig. 6 - Indian 1901.....                                                   | 7  |
| Fig. 7 - Humber 1902.....                                                   | 8  |
| Fig. 8 - BMW R11 – 1929.....                                                | 8  |
| Fig. 9 - Jawa 175 – 1932.....                                               | 8  |
| Fig. 10 – Scooter Lambretta.....                                            | 9  |
| Fig. 11 - Quadro Norton 1950.....                                           | 9  |
| Fig. 12- Solicitação de torção.....                                         | 9  |
| Fig. 13 - Quadro em Treliza -Ducati 600 SS.....                             | 10 |
| Fig. 14 - Quadro Deltabox – Yamaha.....                                     | 10 |
| Fig. 15 – Esquema de suspensão telescópica de uma Norton de 1947.....       | 12 |
| Fig. 16 – Suspensão traseira telescópica de uma Jawa125cc.....              | 12 |
| Fig. 17 - NSU 1911.....                                                     | 13 |

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 18 - Wilkinson 1909.....                                                                                                                | 13 |
| Fig. 19 - ASL – 1909.....                                                                                                                    | 14 |
| Fig. 20 - Matchless H2 – 1922.....                                                                                                           | 14 |
| Fig. 21 – Moto Guzzi 250 1935 .....                                                                                                          | 14 |
| Fig. 22 - DKW RT 175.....                                                                                                                    | 15 |
| Fig. 23 - Norton 1947.....                                                                                                                   | 15 |
| Fig. 24 - Esquema da suspensão traseira de uma <i>scooter</i> .....                                                                          | 16 |
| Fig. 25 – <i>Monolever</i> da BMW - 1980.....                                                                                                | 16 |
| Fig. 26 - <i>Paralever</i> da BMW- 1987.....                                                                                                 | 16 |
| Fig. 27 – <i>Pro-Link</i> da Honda.....                                                                                                      | 17 |
| Fig. 28 – <i>Uni-trak</i> da Kawazaki.....                                                                                                   | 17 |
| Fig. 29 – <i>Full Floater</i> da Suzuki.....                                                                                                 | 18 |
| Fig. 30 – <i>Monocross</i> da Yamaha.....                                                                                                    | 18 |
| Fig. 31 – <i>Pro-lever</i> da Kawazaki.....                                                                                                  | 18 |
| Fig. 32 – Posição de repouso da suspensão traseira.....                                                                                      | 19 |
| Fig. 33 – Posição de fim de curso da suspensão traseira.....                                                                                 | 20 |
| Fig. 34 – Representação gráfica dos deslocamentos da extremidade<br>do amortecedor para as 3 situações esquematizadas nas figs. 31 e 32..... | 20 |
| Fig. 35 – Gráfico da relação incremento do curso do amortecedor/curso<br>da roda dos sistemas de suspensão traseira.....                     | 21 |
| Fig. 36 - Jawa Springer 250 de 1947.....                                                                                                     | 23 |
| Fig. 37 - Gilera Giubileo 98.....                                                                                                            | 24 |
| Fig. 38 - BSA Goldstar 1959.....                                                                                                             | 24 |
| Fig. 39 - Hercules 50 1970.....                                                                                                              | 25 |
| Fig. 40 - Bultaco Matador 250 – 1970.....                                                                                                    | 25 |
| Fig. 41 - Honda XR 650.....                                                                                                                  | 26 |
| Fig. 42 – Yamaha XT 350.....                                                                                                                 | 26 |
| Fig. 43 – Suzuki DR 350.....                                                                                                                 | 27 |
| Fig. 44 – Kawasaki KLX 250.....                                                                                                              | 27 |
| Fig. 45 – Quadro da Honda CR 250 de 2007.....                                                                                                | 27 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 46 - Aprilia RXV 450.....                                    | 29 |
| Fig. 47 - BMW G450 X.....                                         | 29 |
| Fig. 48 – Casal 50 que bateu o recorde mundial de velocidade..... | 30 |
| Fig. 49 - Casal K 188.....                                        | 31 |
| Fig. 50 - Casal K 176 125cc.....                                  | 31 |
| Fig. 51 - Casal K 176 175cc.....                                  | 31 |
| Fig. 52 - Casal K506 50cc Enduro.....                             | 31 |
| Fig. 53 - Fundador MRE 50 .....                                   | 32 |
| Fig. 54 - Fundador MRE 50 .....                                   | 32 |
| Fig. 55 - SIS Sachs ST 50.....                                    | 32 |
| Fig. 56 - SIS Sachs RE 50.....                                    | 32 |
| Fig. 57 - Famel TT 50.....                                        | 32 |
| Fig. 58 - Famel FX 50 Enduro .....                                | 32 |
| Fig. 59 - Anfesa RT 125cc.....                                    | 33 |
| Fig. 60 - Anfesa RV 50cc.....                                     | 33 |
| Fig. 61 - Anfesa RX 175cc.....                                    | 33 |
| Fig. 62 - Anfesa RV 250cc.....                                    | 33 |
| Fig. 63 - Macal Cross.....                                        | 34 |
| Fig. 64 - Macal Enduro Competição.....                            | 34 |
| Fig. 65 - Macal TT 50.....                                        | 34 |
| Fig. 66 - Macal Trail.....                                        | 34 |
| Fig. 67 - Macal Dakar Junior.....                                 | 34 |
| Fig. 68 - Macal Trail II.....                                     | 34 |
| Fig. 69 - Vilar Cross.....                                        | 35 |
| Fig. 70 - Forvel Cross.....                                       | 35 |
| Fig. 71 - MVM Challenge 50cc.....                                 | 35 |
| Fig. 72 - AJP ARIANA 125.....                                     | 36 |
| Fig. 73 – Quadro da AJP ARIANA.....                               | 37 |
| Fig. 74 – Braço oscilante da AJP ARIANA.....                      | 37 |
| Fig. 75 – Bielas da suspensão traseira da AJP.....                | 38 |

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 76 – Bielas da suspensão traseira da AJP.....          | 38 |
| Fig. 77 - AJP GALP 50.....                                  | 38 |
| Fig. 78 – Quadro da AJP GALP 50.....                        | 39 |
| Fig. 79 – Braço oscilante da AJP GALP 50.....               | 40 |
| Fig. 80 – Bielas suspensão traseira da AJP GALP 50.....     | 41 |
| Fig. 81 – Bielas suspensão traseira da AJP GALP 50.....     | 41 |
| Fig. 82 – AJP GALP 50 em competição.....                    | 41 |
| Fig. 83 - AJP PR4 125.....                                  | 42 |
| Fig. 84 – Braço oscilante da AJP PR4.....                   | 43 |
| Fig. 85 – Quadro da AJP PR4.....                            | 43 |
| Fig. 86 – Colocação do depósito na AJP PR4.....             | 44 |
| Fig. 87 – Comparação do efeito da posição do depósito ..... | 45 |
| Fig. 88 – AJP 400cc PROTO.....                              | 47 |
| Fig. 89 – Fixação superior das traves ao berço.....         | 48 |
| Fig. 90 – Fixação inferior das traves ao berço.....         | 48 |
| Fig. 91 - Trave AJP PROTO 400.....                          | 48 |
| Fig. 92 – Braço oscilante AJP PROTO 400.....                | 48 |
| Fig. 93 - Moldação inferior do braço da PROTO 400.....      | 49 |
| Fig. 94 - Caixas de machos do braço da PROTO 400.....       | 49 |
| Fig. 95 - Bielas da AJP PROTO 400.....                      | 49 |
| Fig. 96 - Bielas da AJP PR4.....                            | 49 |
| Fig. 97 - Imagem bielas em aço.....                         | 50 |
| Fig. 98 - Esquema de bielas em alumínio.....                | 50 |
| Fig.99 - Tensões na biela do quadro em alumínio.....        | 51 |
| Fig. 100 - Tensões na biela do braço em alumínio.....       | 51 |
| Fig. 101 – Trave direita AJP PR3.....                       | 52 |
| Fig. 102 – Trave esquerda da AJP PR3.....                   | 52 |
| Fig. 103 - Braço oscilante traseiro da AJP PR3.....         | 53 |
| Fig. 104 – Quadro da AJP PR4.....                           | 55 |
| Fig. 105 – Pormenor do Quadro da AJP PR4.....               | 55 |

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 106 – 1ª iteração da trave.....                                                                                                       | 56 |
| Fig. 107 – Iteração da trave prototipada.....                                                                                              | 56 |
| Fig. 108 – Configuração global da trave.....                                                                                               | 57 |
| Fig. 109 – Fixações na zona inferior da trave.....                                                                                         | 57 |
| Fig. 110 – Fixações na zona superior da trave.....                                                                                         | 57 |
| Fig. 111 – Fixações na ligação à coluna de direcção.....                                                                                   | 57 |
| Fig. 112 – Traves da PR3 em SLS.....                                                                                                       | 58 |
| Fig. 113 – Montagem 1º protótipo.....                                                                                                      | 58 |
| Fig. 114 – Molde das traves realizado pela Firmago.....                                                                                    | 58 |
| Fig. 115 – Molde da trave obtido na AJP por maquinagem em resina.....                                                                      | 59 |
| Fig. 116 – Traves da PR3 em bruto – exterior.....                                                                                          | 59 |
| Fig. 117 – Traves da PR3 em bruto exterior.....                                                                                            | 59 |
| Fig. 118 - <i>Gabari</i> construído para maquinagem das traves .....                                                                       | 60 |
| Fig. 119 – Traves da PR3 maquinadas – exterior.....                                                                                        | 60 |
| Fig. 120 – Traves da PR3 maquinadas – interior.....                                                                                        | 60 |
| Fig. 121 - Malha de elementos finitos utilizada na simulação numérica em ANSYS®.                                                           | 61 |
| Fig. 122 - Geometria do elemento SOLID187 da biblioteca ANSYS®.....                                                                        | 61 |
| Fig. 123 - Cargas utilizadas na simulação em Ansys.....                                                                                    | 63 |
| Fig. 124 - Distribuição de Tensões de Von Mises (parte externa) .....                                                                      | 64 |
| Fig. 125 - Distribuição de tensões de Von Mises (parte interna).....                                                                       | 64 |
| Fig. 126 - Detalhe da distribuição de tensões de Von Mises na vizinhança do<br>apoio de ligação da trave a estrutura de aço do quadro..... | 64 |
| Fig. 127 - Comparação das dimensões e geometria dos braços dos modelos<br>PR3 e PR4.....                                                   | 66 |
| Fig. 128 – Relação curso da roda/Curso do amortecedor.....                                                                                 | 67 |
| Fig. 129 - Moldação superior molde braços da PR3.....                                                                                      | 67 |
| Fig. 130 – Moldes dos machos molde braços da PR3.....                                                                                      | 67 |
| Fig. 131 - Malha utilizada na modelação do braço .....                                                                                     | 68 |
| Fig. 132 - Posição da suspensão simulada numericamente.....                                                                                | 68 |
| Fig. 133 - Tensões de Von Mises obtidas na simulação do braço.....                                                                         | 69 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 134 - Corte na distribuição dimensional das tensões para<br>mostrar a região mais solicitada.....                           | 69 |
| Fig. 135 – Estrutura para testes laboratoriais. Pontos de colocação de extensómetros.                                            | 71 |
| Fig. 136 – Pontos de carga no quadro da PR4.....                                                                                 | 71 |
| Fig. 137 – Roseta a 45° no braço e indicação do referencial utilizado.....                                                       | 72 |
| Fig. 138 – Deformações no braço, ponto 1 para cargas alternadas<br>do lado direito/esquerdo.....                                 | 73 |
| Fig. 139 – Tensões no braço instaladas no braço, ponto 1,<br>obtidas a partir das medições representadas na figura anterior..... | 74 |
| Fig. 140 – Tensão resultante de Von Mises no braço, ponto 1.....                                                                 | 75 |
| Fig. 141 – Tensões medidas no quadro, pontos 2 e 3.....                                                                          | 75 |
| Fig. 142 – Comparação das tensões obtidas nos três pontos 1, 2 e 3.....                                                          | 76 |
| Fig. 143 – Equipamento de transmissão de dados.....                                                                              | 77 |
| Fig. 144 – Equipamento de recepção de dados.....                                                                                 | 77 |
| Fig. 145 – PR3 equipada com o sistema de telemetria. ....                                                                        | 78 |
| Fig. 146 – O sistema de telemetria durante a fase de ajuste .....                                                                | 78 |
| Fig. 147 – Sistema de telemetria aplicado na traseira.....                                                                       | 79 |
| Fig. 148 – Mota preparada para os testes de pista.....                                                                           | 79 |
| Fig. 149 – Parte inferior do quadro mostrando a rotura da biela do braço .....                                                   | 79 |
| Fig. 150 – Aspecto da moto após rotura da biela do braço.....                                                                    | 79 |
| Fig. 151 – Superfícies de rotura.....                                                                                            | 80 |
| Fig. 152 – Rotura da biela do braço.....                                                                                         | 80 |
| Fig. 153 – Deformações medidas durante o 1º teste.....                                                                           | 80 |
| Fig. 154 – Tensões medidas durante o 1º teste.....                                                                               | 81 |
| Fig. 155 – Rotura na trave do lado direito.....                                                                                  | 81 |
| Fig. 156 – Rotura na trave do lado esquerdo.....                                                                                 | 82 |
| Fig. 157 - Colocação de roseta na trave direita.....                                                                             | 83 |
| Fig. 158 - Colocação de roseta próximo da fixação superior do amortecedor.....                                                   | 83 |
| Fig. 159 – Rotura na trave do lado direito.....                                                                                  | 84 |
| Fig. 160 - Medições de velocidade e altitude com GPS.....                                                                        | 85 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 161 – Deformações registadas ao longo do 3º teste.....                                                                | 85 |
| Fig. 162 – Tensões calculadas a partir dos valores recolhidos ao longo do 3º teste.....                                    | 86 |
| Fig. 163 – Tensões resultantes na fase de rotura.....                                                                      | 86 |
| Fig. 164 - Sobreposição do campo de tensões de Von Mises calculado<br>com o ANSYS com uma fotografia da trave partida..... | 87 |
| Fig. 165 - Posição dos elementos da malha de elementos finitos e da colocação do<br>extensómetro na trave.....             | 87 |
| Fig. 166 – Colocação do extensómetro em relação à superfície de fractura da trave.....                                     | 88 |
| Fig. 167 - Comparação geometria anterior/alterada.....                                                                     | 89 |
| Fig. 168 - Comparação da trave PR3.....                                                                                    | 89 |
| Fig. 169 - Distribuição de tensões de Von Mises em ambos os lados da nova<br>trave após introdução de sobreespessura.....  | 89 |
| Fig. 170 - Curso máximo da roda traseira revelando alinhamento das bielas.....                                             | 90 |
| Fig. 171 – Posição da suspensão traseira sem curso.....                                                                    | 91 |
| Fig. 172 – Posição da suspensão traseira no curso máximo da roda traseira.....                                             | 91 |
| Fig. 173 – Comparação entre o ângulo das bielas da geometria antiga e nova.....                                            | 92 |
| Fig. 174 – Relação curso da roda / curso do amortecedor.....                                                               | 92 |
| Fig. 175 – Relação curso roda / ângulo entre bielas.....                                                                   | 93 |
| Fig. 176 – Comparação entre as bielas antigas e actuais.....                                                               | 94 |
| Fig. 177 – Coquilha da biela do braço.....                                                                                 | 94 |
| Fig. 178 – Coquilha da biela do braço.....                                                                                 | 94 |

### Índice de tabelas

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Distribuição de peso sobre o eixo dianteiro e traseiro em função<br>da quantidade de combustível no depósito ..... | 46 |
| Tabela 2 – Comparação de tensões entre as bielas em aço e alumínio.....                                                       | 50 |
| Tabela 3 – Características e problemas do quadro da AJP PR4.....                                                              | 55 |
| Tabela 4 – Características e objectivos do quadro da AJP PR3.....                                                             | 65 |
| Tabela 5 – Características e problemas do braço oscilante da AJP PR4.....                                                     | 65 |
| Tabela 6 – Características e objectivos do braço oscilante da AJP PR3.....                                                    | 57 |
| Tabela 7 – Comparação das dimensões das bielas antigas e novas.....                                                           | 91 |
| Tabela 8 – Relação curso da roda / ângulo entre bielas .....                                                                  | 93 |

# **VALIDAÇÃO ESTRUTURAL DE UM NOVO CONCEITO DE CHASSIS DE MOTOCICLO**

## **INTRODUÇÃO**

A presente dissertação insere-se no mestrado em Engenharia Mecânica e as suas linhas condutoras regem-se pela sequência de Desenvolvimento – Prototipagem – Teste – Validação. Todas estas áreas estão relacionadas com a actividade de Engenharia e fazem parte da actividade profissional do autor, que após a licenciatura em Engenharia Mecânica, iniciou a sua carreira profissional na indústria, tendo lidado desde o início com as actividades de desenvolvimento, prototipagem e execução de ferramentas.

Desde 2001 que o autor colabora com a AJP MOTOS, de início como prestador de serviços externos, tendo a sua relação com o fabricante de motociclos evoluído de tal forma que em 2003 desenhou e executou vários moldes e protótipos para a construção de um protótipo de motociclo apresentado no salão de Milão de 2003.

Em 2006 foi lançado o desafio de desenvolver um novo modelo, baseado na filosofia de design do protótipo atrás referido e no seguimento das actividades de desenvolvimento surgiu a questão de haver necessidade de se estudar mais aprofundadamente o comportamento dos componentes que faziam parte do chassis, que é a estrutura que suporta toda a moto e definir testes estáticos em laboratório e testes dinâmicos em pista, que comprovassem as soluções definidas.

### **O problema**

Este estudo tem como finalidade demonstrar que é possível definir uma metodologia para o desenvolvimento, prototipagem, teste e validação de novos componentes para um chassis de um motociclo. As duas primeiras actividades já eram de alguma forma dominadas pelo autor e pela AJP MOTOS, dada a experiência ganha com o protótipo de 2003.

Os testes realizados em modelos anteriores consistiam em experimentar um protótipo em situação real, sendo testado em percursos fora de estrada. Este protótipo participava igualmente em algumas competições, sendo pilotado por pilotos experientes, para que se pudesse ter uma ideia mais precisa quanto à performance do protótipo.

Estas participações em competição serviam também para validar as soluções que tinham sido desenvolvidas, algumas das quais inovadoras como o braço oscilante em alumínio obtido em fundição de areia apresentado na GALP 50 de 1995. Este modelo foi campeão de Enduro na categoria de 50cc durante 5 anos seguidos, o que atesta não só a validade das soluções, bem como a utilização da competição realizar essas mesmas validações.

No entanto, apesar de esta metodologia ter dado resultados, não permite quantificar a qualidade da solução, ou seja, um componente pode estar exageradamente sobredimensionado, com implicações ao nível do custo do componente e peso elevado.

Foi no sentido de se obter uma quantificação em termos de resistência dos componentes que se definiu a metodologia que se encontra descrita neste trabalho.



## Estrutura da dissertação

O primeiro capítulo situa os motociclos em relação a todos os restantes veículos automóveis, descrevendo algumas das suas principais características e conceitos.

O segundo capítulo apresenta as principais evoluções que os motociclos sofreram desde a sua criação no séc. XIX. Foram destacadas as evoluções ao nível do chassis e da suspensão traseira.

O terceiro capítulo consiste na história dos motociclos da categoria de Enduro. São apresentadas as principais características dos modelos mais relevantes que contribuíram para o desenvolvimento desta categoria.

O quarto capítulo é dedicado aos principais modelos de Enduro que foram desenvolvidos e comercializados pelos fabricantes portugueses de motociclos e ciclomotores.

O quinto capítulo contém os modelos que foram desenvolvidos e produzidos pela AJP MOTOS, sendo referido as suas características e as inovações que iam sendo desenvolvidas e aplicadas nos modelos de produção

O sexto capítulo descreve todas as actividades, testes e resultados que foram realizadas no âmbito deste trabalho.

No sétimo capítulo apresentam-se as conclusões deste trabalho.

O Oitavo capítulo pretende ser uma reflexão crítica sobre as actividades realizadas neste trabalho

O nono capítulo inclui uma reflexão final sobre o trabalho bem como o papel que pode desempenhar como ponto de partida para outros trabalhos

Por fim são listadas as referências bibliográficas e anexos.

## 1. VEÍCULOS DE DUAS RODAS

Os veículos de duas rodas, normalmente designados por motociclos, têm adquirido importância crescente, quer como meio de transporte em áreas urbanas, quer em actividades de lazer. Trata-se de veículos cujo tipo de utilização exige pesos reduzidos e boa manobrabilidade sempre em condições de segurança. Para alcançar estes objectivos os vários fabricantes destes veículos têm concebido diversas soluções mecânicas e sistemas electrónicos mais ou menos sofisticados que as complementam.

Os veículos de duas rodas caracterizam-se pelas suas óptimas características de mobilidade, especialmente em circulação urbana. Graças às suas reduzidas dimensões e a uma baixa relação peso/potência, que favorece as acelerações, estes veículos são muito manobráveis e permitem aos condutores experimentar sensações pouco habituais em automóveis.

Em termos de segurança passiva estes veículos oferecem menor protecção que um automóvel. Por isso é fundamental que sejam apetrechados com sistemas auxiliares de controlo, tais como: sistemas de apoio à travagem, controlo de suspensão e sistemas auxiliares para a direcção.

A distribuição de peso também assume um carácter relevante, quer na manutenção das condições de equilíbrio, quer na condução do veículo. Com uma sobrecarga no eixo dianteiro as mudanças de direcção tornam-se extremamente difíceis. No entanto, se o eixo traseiro estiver sobrecarregado a direcção torna-se instável.

Em Portugal, após a abertura do mercado nacional, a indústria de motociclos não conseguiu suportar a forte concorrência dos fabricantes externos e sucumbiu. No entanto, um pequeno fabricante continua a produzir veículos cujas características de qualidade e desempenho os tornam competitivos, mesmo no exigente mercado europeu. A AJP (**A**ntónio e **J**orge **P**into) é o único fabricante que tem conseguido manter a sua competitividade à custa da introdução de novos conceitos e soluções inovadoras. Estas soluções derivam normalmente da experiência na utilização dos modelos produzidos e das capacidades de produção da empresa. Os modelos produzidos têm-se afirmado pela sua robustez, pela facilidade de utilização e pela estética equilibrada que os caracteriza.

Embora construídos com elevadas exigências de segurança e fiabilidade, testadas em exaustivos ensaios de estrada e pista, não foi até ao momento realizado um completo programa de ensaios e testes experimentais que permita validar antecipadamente as soluções adoptadas. Este trabalho permitiu criar as condições necessárias para a AJP poder mais rapidamente validar novas soluções, aumentando assim as suas capacidades de inovação. Recorrendo à simulação numérica do comportamento estrutural dos novos componentes e a ensaios de pista foi possível melhorar o seu desempenho. Estes, por sua vez, foram concebidos de forma a dar corpo a um novo conceito de quadro que se espera venha optimizar o desempenho dos futuros modelos.

Para melhor enquadrar os veículos produzidos pela AJP no mercado de veículos automóveis deve referir-se que em termos legais, em Portugal e em vários países da União Europeia, existem basicamente duas categorias de veículos de duas rodas com motor: ciclomotores e motociclos.

Os ciclomotores são veículos com motor cuja cilindrada não excede os 50cc e cuja velocidade máxima está limitada a 45 km/h.

Os motociclos são todos os veículos de duas rodas que não são considerados ciclomotores, ou seja, têm motor com mais de 50cc ou que atingem uma velocidade máxima superior a 45 km/h.

Tendo como denominador comum serem veículos com duas rodas e possuírem um motor para mobilidade própria, existem actualmente vários tipos de veículos, cada qual com uma utilização distinta. A produção da AJP recai totalmente sobre a segunda categoria - motociclos. Ainda que inicialmente tenha produzido alguns veículos de 50cc de cilindrada, actualmente a empresa só constrói veículos com motorizações de cilindrada igual 125cc e 200cc. Esta opção é imposta pela estratégia comercial sendo que actualmente esteja em desenvolvimento um veículo com motor de maior cilindrada.

## 2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA

O primeiro veículo de duas rodas utilizados no transporte de pessoas terá sido construído no início do século XIX e não possuía motorização. Este veículo é actualmente muito popular e conhecido por bicicleta. Com o surgimento dos primeiros motores foi possível conceber veículos com capacidade para se movimentarem pelos seus próprios meios e surgiram os motociclos.

O primeiro motociclo conhecido foi inventado em simultâneo nos Estados Unidos e na França, por Sylvester Roper e Louis Perreaux [1] respectivamente, sem conhecimento mútuo. Decorria o ano de 1869, quando ambos adaptaram a uma bicicleta um motor a vapor. Na fig. 1 mostra-se uma fotografia do exemplar construído por Sylvester Roper.



A invenção do motociclo com motor de combustão interna é atribuída a Gottlieb Daimler, que com a ajuda de Wilhelm Maybach, em 1885, instalou um motor a gasolina monocilíndrico, leve e rápido, numa bicicleta de madeira adaptada [1]. Este inventor tinha como objectivo testar o novo motor e construiu o veículo que se mostra na fig. 2. O primeiro piloto de um motociclo com motor de combustão interna foi Paul Daimler, filho de Gottlieb. Apesar de pioneiro nos motociclos, Daimler nunca mais se interessou pelas duas rodas, enveredando pelo mundo automóvel.



No início do desenvolvimento destes veículos houve uma grande variedade de soluções para a colocação do motor e só no início do século XX os construtores chegaram a um consenso, colocando o motor na parte interna do quadro.

A primeira fábrica de motociclos surgiu em 1894, na Alemanha, e chamava-se Hildebrandt & Wolfmüller. Foi o primeiro construtor a disponibilizar um modelo de venda ao público. Como principais características este modelo apresentava um motor de 1488cc de quatro tempos, com dois cilindros, uma potência máxima de 2.5 cv às 240 r.p.m. Este motociclo tinha um peso de 60Kg, atingia 40 km/h de velocidade máxima e possuía um quadro tubular, o que era inovador para a época.

No ano seguinte construiu-se na Alemanha a fábrica Stern e em 1896 apareceram a Bougery, na França e a Excelsior, na Inglaterra. No início do século XX já existiam cerca de 43 fábricas espalhadas pela Europa. Muitas indústrias pequenas surgiram desde então e, já em 1910, existiam 394 empresas do ramo em todo o mundo, sendo que 208 delas se situavam na Inglaterra.

Tamanha era a concorrência que fabricantes do mundo inteiro começaram a introduzir inovações e melhorias, cada um deles tentando ser mais original. Estavam disponíveis motores de um a cinco cilindros, de dois e quatro tempos. As suspensões foram aperfeiçoadas para oferecer maior conforto e segurança. A fábrica alemã NSU já oferecia, em 1914, a suspensão traseira do tipo mono amortecedor usado até hoje, e que pode ver-se na fig. 3. Mas a moto mais confortável existente em 1914 e durante toda a década era a Indian de 998cm<sup>3</sup> - que se mostra na fig. 4. Este motociclo possuía braços oscilantes na suspensão traseira e arranque eléctrico, um requinte que só foi adoptado pela generalidade dos fabricantes recentemente.

Uma vez que o trabalho proposto se baseia no estudo de um novo quadro e braço oscilante da suspensão traseira, será dada relevância à evolução destes dois componentes, pelo que se não se continua a referenciar a evolução do motociclo em si.



Fig. 3 - NSU – 1914 [4]



Fig. 4 - Indian Hendee Special – 1914 [5]

## 2.1. Quadro

Nestes veículos a estrutura designada por quadro assume o papel normalmente desempenhado pelo chassi nos automóveis. Este elemento estrutural serve de ancoragem às suspensões e suporte ao motor e caixa de velocidades, além de transportar o condutor e a carga. As propriedades mecânicas, o peso, a distribuição de massa e o comportamento estrutural desta estrutura são de vital importância para o bom desempenho do veículo. Em seguida faz-se uma breve resenha histórica da evolução dos quadros ao longo dos tempos.

No início do século XX foram apresentadas diversas soluções, para o posicionamento do motor. Na Wildebrandt e Wolfmüller de 1894 (representada na fig. 5) o motor estava colocado na posição da pedaleira. Na INDIAN de 1901 (fig. 6) o motor aparecia debaixo do assento. Na Humber de 1902 (fig. 7) o motor estava colocado na ligação entre a coluna e a pedaleira.



Fig. 5 - Hildebrandt & Wolfmüller de 1894 [6]





Fig. 7 - Humber 1902 [8]

#### .2.1.1. A evolução do quadro

A diferenciação relativamente aos quadros de bicicleta começa a surgir quando o reservatório de combustível surge apoiado em dois tubos horizontais na parte superior do quadro – “*Sotocanna*” [9]. Os materiais então usados eram o tubo soldado, aço fundido ou o ferro fundido maleável.

Nos anos trinta começam a surgir quadros com elementos estampados como a BMW R11 de 1929 (fig. 8) e também quadros com tubos soldados de perfil aberto como a JAWA 175 de 1932 (fig).

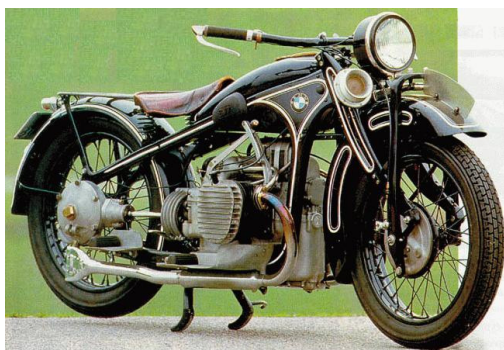


Fig. 9 - Jawa 175 – 1932 [11]

Nos anos 40 do século passado surge um tipo de moto muito divulgada actualmente – a *scooter*- cujo modelo original apresentava um chassis tipo *monocoque*. Nestes veículos existe uma plataforma inferior para apoio dos pés do condutor onde se encontram os pedais e que faz parte da estrutura do quadro.

Nos anos 60 faz escola um quadro desenvolvido pela NORTON denominado “*featherbed*”. Esta solução tubular é construída sob a forma de uma célula fechada de elevada rigidez.





Fig. 10 – Scooter Lambretta [12]

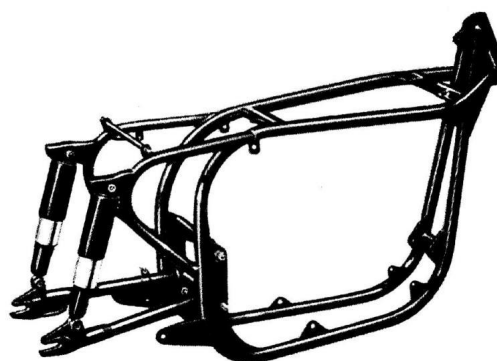


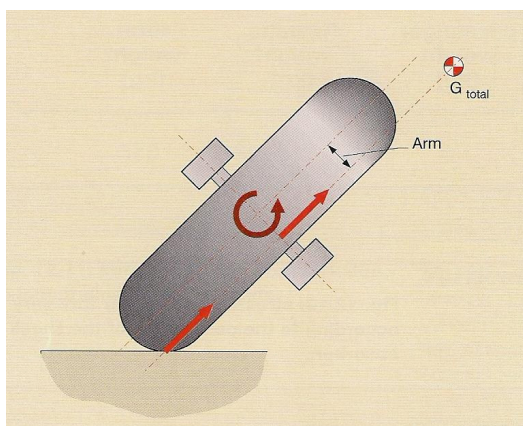
Fig. 11 - Quadro Norton 1950 [13]

Nas sucessivas evoluções do quadro, uma parte preponderante será devida à procura de uma maior rigidez torsional em consequência do aumento da potência dos motores, da maior secção dos pneus e do drástico aumento dos valores de aderência em curva.

Na marcha em linha recta, o veículo é submetido exclusivamente a solicitação de flexão, devido à carga, à acção das rodas resultante das irregularidades do terreno, à aceleração e travagem.

A parte que necessitou maior incremento da rigidez à flexão foi a forqueta telescópica, não só devido ao aumento da potência dos sistemas de travagem mas também pela maior aderência proporcionada pelos pneus.

Mais recentemente é a preocupação com uma maior rigidez à torção que condiciona o dimensionamento dos quadros. Esta solicitação, teoricamente inexistente num veículo de duas rodas em linha, tornou-se importante com o aumento das dimensões dos pneus, que levou o ponto de contacto com o solo para mais longe do plano mediano, como se pode ver na fig. 12.





Em particular o efeito torsional faz-se sentir na entrada em curva, quando o condutor aplica o travão dianteiro e o veículo começa a curvar. Este efeito manifesta-se de modo igual sobre as duas rodas quando o motociclo está inserido em curva. A torção é tanto mais importante quanto maior é a distância da vertical que passa pelo centro de gravidade piloto-motociclo, ao ponto de contacto da roda e terreno. O que significa que quanto maior for a inclinação para descrever uma curva, maior será o efeito da torção. Esta solicitação é inclinada em relação ao eixo do veículo na saída da curva. Com o veículo em aceleração o efeito torsional é maior na secção posterior e em particular no braço oscilante.

Para evitar as torções, tanto o quadro como as suspensões não são mais dimensionados na base das solicitações, isto é, dimensionadas à tensão, mas sim na base da rigidez, dimensionamento à deformação. Deve ainda referir-se que deformações elásticas de maior amplitude provocam respostas elásticas que geram desequilíbrios e, por isso, dificultam a condução.

A rigidez do quadro é testada bloqueando a coluna da direcção, aplicando um binário no suporte do braço oscilante.

Os valores da rigidez torsional atingem valores na ordem dos 7000 Nm no caso de quadros de motos de competição.

A solução encontrada pelos fabricantes que continuam a usar quadros em tubo para aumentar a rigidez torsional foi implementar estruturas tubulares triangulares do tipo treliça como é o caso da solução proposta pela DUCATI – que se mostra na Fig. 13.

Depois da passagem à utilização de mono amortecedores traseiros, foram desenvolvidas estruturas com traves de grande secção em alumínio, soldadas à coluna de direcção e na zona de ancoragem da suspensão traseira de que é exemplo a solução *Deltabox* proposta pela YAMAHA e que se mostra na fig. 14.

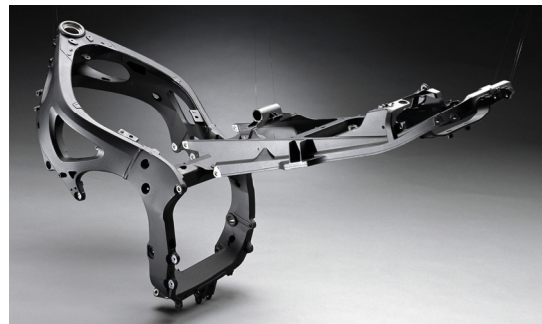


Fig. 14 - Quadro *Deltabox* da Yamaha [16]

No projecto dos quadros, até aos anos 60, era usada a intuição e a comparação com quadros de motos de prestações semelhantes para conceber novas soluções.

No que respeita aos testes de fadiga, recorria-se a verificações experimentais em que, por exemplo, se bloqueava a coluna de direcção com uma haste e se aplica uma massa com vibração excêntrica. Este teste era feito em quadros de trave única, mais sensíveis à rotura por fadiga.

Actualmente o panorama é completamente diferente, seja no projecto, seja nos testes, graças à electrónica e às novas ferramentas de apoio ao projecto.

Com os sistemas de CAD-CAM-CAE é possível desenhar, simular e prototipar componentes e estruturas; é possível determinar para a estrutura e componentes o valor das tensões e deformações resultantes das solicitações consideradas.

Nos testes é possível obter valores medidos de tensões, deformações e cargas aplicadas directamente nos próprios componentes. Estes valores servem não só para validar soluções já desenvolvidas, como também servem para replicar os testes em estrada em banco de ensaios, o que permite efectuar um maior número de ciclos de teste do que seria possível em estrada.

## 2.2. Suspensão Traseira

As suspensões permitem que as rodas tenham movimento em relação ao quadro quando perturbadas por acções verticais resultantes de irregularidades do piso. Com a utilização de elementos elásticos, molas, e elementos dissipativos, amortecedores, constroem-se filtros mecânicos que evitam que movimentos de frequência elevada perturbem os condutores. A inclusão das suspensões veio permitir maior conforto mas também contribuíram para uma maior segurança mesmo para uma condução a velocidades mais elevadas.

Na indústria motociclística, assistiu-se desde cedo à utilização de sistemas de suspensão anterior, o que não aconteceu no caso da suspensão traseira. Este facto, que pode ser considerado surpreendente, pois é na suspensão traseira se apoia a maior parte do peso do condutor, encontra justificação, nos assentos utilizados inicialmente com ampla espuma e amortecimento, no facto de a torção na roda traseira requerer uma certa rigidez no quadro e sobretudo porque com o curso da roda traseira, o comportamento da transmissão secundária não era satisfatório, devido às cintas usadas nas motorizações iniciais.

Será apenas na segunda metade dos anos 30, depois das boas provas dadas pela sua adopção na competição, que a suspensão traseira se difundiu rapidamente, inicialmente em motos de maior cilindrada, sobretudo nos modelos de competição.

Os esquemas adoptados para a suspensão traseira são extremamente variados, mas obedecem a dois tipos fundamentais: aqueles em que a roda, ligada a uma parte do quadro, oscila em torno de um eixo e aqueles, chamados telescópicos, nos quais a roda se move segundo uma trajectória rectilínea. Nas figuras 15 e 16 mostram-se dois exemplos de suspensões telescópicas.

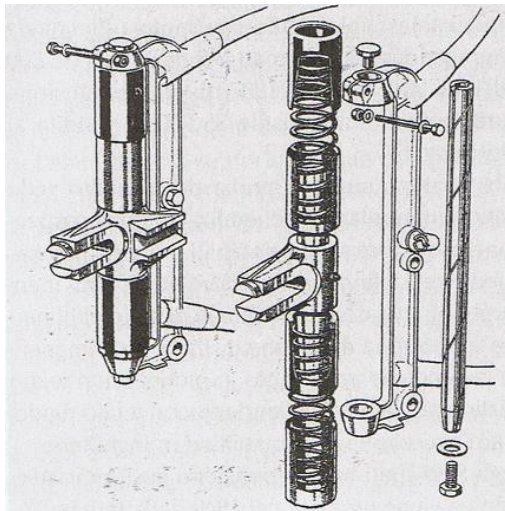
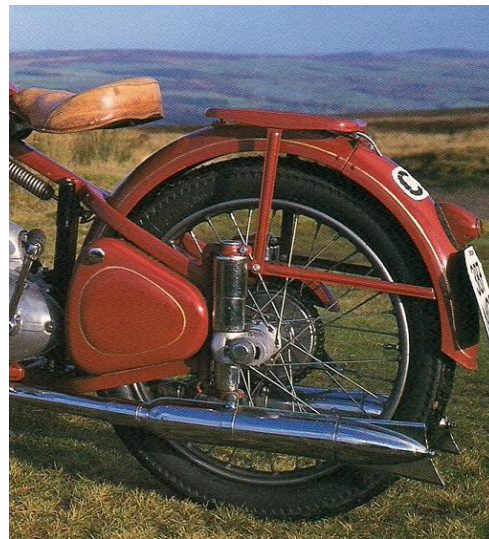


Fig. 15 – Esquema de suspensão telescópica de uma Norton de 1947 [9]



Os primeiros, para além de serem os mais utilizados no início do século XX, são aqueles que se afirmaram após os anos 50, tendo sido abandonados os sistemas telescópicos.

De um ponto de vista funcional, o sistema de braço oscilante concilia-se maioritariamente com transmissões finais de corrente. Neste caso a roda traseira no seu movimento tende a descrever um arco limitando a variação da distância de entre eixos e a consequente falta de concentricidade entre o eixo de rotação da suspensão e o eixo do pinhão da transmissão secundária. Um exemplo deste tipo de suspensão foi aplicado na NSU de 1911 que se pode ver na fig. 17.

Ao contrário, com uma transmissão por *cardan*, como a WILKINSON de 1909 ver fig. 18 a solução telescópica é caracterizada por um deslocamento vertical da roda. Nesta solução, mantém-se o paralelismo entre o eixo do pinhão e o eixo da saída da caixa, garantindo uma homogeneidade cinética da transmissão da moto sem variação do binário aplicado à saída da transmissão.



Fig. 17 - NSU 1911 [18]

### 2.2.1. A Evolução da Suspensão Traseira

A primeira suspensão na roda posterior encontra-se numa bicicleta em 1898, com a roda a oscilar em torno do centro da pedaleira.

A primeira suspensão traseira instalada numa moto apareceu numa Roesler & Jauernigg de 1903. A parte posterior oscilante era triangulada, fechada e ligada superiormente a um cartucho que continha a mola ligada à restante parte do quadro. O dispositivo que continha a mola encontrava-se situado por debaixo do assento.

Em 1907 encontram-se essencialmente duas soluções: a primeira telescópica, da Larquin-Coudert, com dois cartuchos fixos rigidamente à parte posterior do quadro no qual deslizam. A segunda, da Olympia, em que a parte oscilante não é fechada e a mola, colocada debaixo do assento, está ligada à parte posterior inclinada do V onde se encontra a roda.

Nestas primeiras realizações o eixo de rotação do braço oscilante coincide com o centro da pedaleira ou encontra-se pouco desfasado deste, de forma a não ser muito sensível às variações do entre-eixo da corrente.

Por outro lado, o comprimento da linha que liga o eixo motor à roda traseira é tal que garante uma elasticidade suficiente para absorver as reduzidas variações, mesmo tendo em conta os reduzidos cursos da roda traseira naqueles tempos.

Em 1909 surge a primeira suspensão traseira com amortecimento pneumático numa ASL (Air Sping Limited que se pode ver na fig. 18. Nesta solução existe um cilindro pneumático ligado à parte móvel e o amortecimento é obtido pela compressão do ar no interior de uma câmara. Esta solução é abandonada devido a problemas de estanquidade que resultava em perda de pressão e consequentemente do amortecimento.

Em 1922 a Matchless, no modelo H2 apresenta uma solução diferente constituída por dois quadriláteros oscilantes ao lado da roda com elementos verticais que comprimem duas molas apoiadas em dois apoios triangulares situados no quadro. Esta solução é perfeitamente visível na fig. 19.



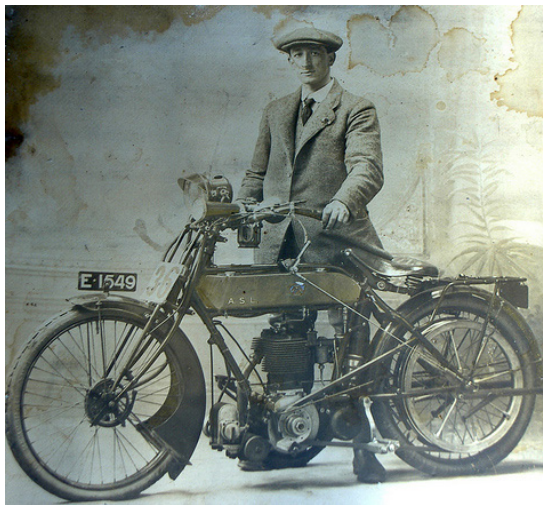


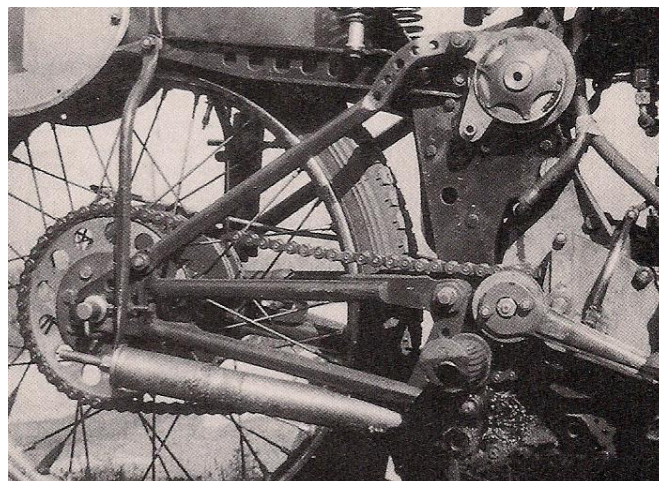
Fig. 19 - ASL – 1909 [20]



Fig. 20 - Matchless H2 – 1922 [21]

Nos anos que se seguiram à I Guerra Mundial a suspensão traseira é eliminada pelos construtores. O principal motivo desta opção deve-se ao aumento da potência e binário dos motores que não era compatível com as suspensões até então desenvolvidas. Assistiu-se assim a um regresso dos quadros rígidos, para dar resposta a essa necessidade de maior rigidez.

Só na segunda metade da década de 30, mais concretamente em 1935, a Moto Guzzi regressa à utilização de uma suspensão traseira no seu modelo 500c.c. e posteriormente instalada também no modelo de 250c.c da fig. 21. Esta suspensão possui um braço oscilante ligado ao quadro através de dois cartuchos contendo as molas que eram comprimidas através de um tirante. Todo este mecanismo encontrava-se inserido no quadro e o amortecimento era realizado por um amortecedor de fricção (amortecimento proporcional ao deslocamento, também designado por amortecimento histerético).



A Moto Guzzi é acompanhada por mais alguns construtores italianos na utilização da suspensão traseira, o mesmo não acontece com os restantes construtores, que apresentam esporadicamente alguns modelos com suspensão, caso da Norton, BMW e DKW.

Nesta fase os modelos de competição com mais de 250c.c. utilizavam frequentemente uma suspensão traseira, enquanto na produção em série só os construtores italianos apresentam algumas opções.

Após a Segunda Guerra Mundial, continuam a surgir soluções, tanto de braço oscilante como de suspensões telescópicas. Estas últimas surgem sobretudo em motas inglesas e alemãs, como na Norton de 1947 e a DKW RT 175, fig. 22 e 23.



Fig. 22 - DKW RT 175 [22]

No entanto, a maior parte dos novos modelos já eram equipados com soluções com braço oscilante, que se generaliza a partir das vitórias alcançadas pela Norton com o quadro *Featherbed*, em que o conjunto mola amortecedor liga directamente o braço ao quadro.

No pós-guerra ganha dimensão um novo segmento nos veículos de duas rodas, as *scooter*. Estes veículos não eram inicialmente dotados de suspensão traseira. Só a partir de 1948 surge uma solução que ainda hoje se mantém, que é a colocação do motor no próprio braço oscilante para eliminar as tensões geradas na corrente de transmissão. Um dos modelos emblemáticos deste tipo de veículo, a Vespa, usa este tipo de solução. Esta solução é visível na fig. 24, onde estão identificados os componentes da suspensão traseira.

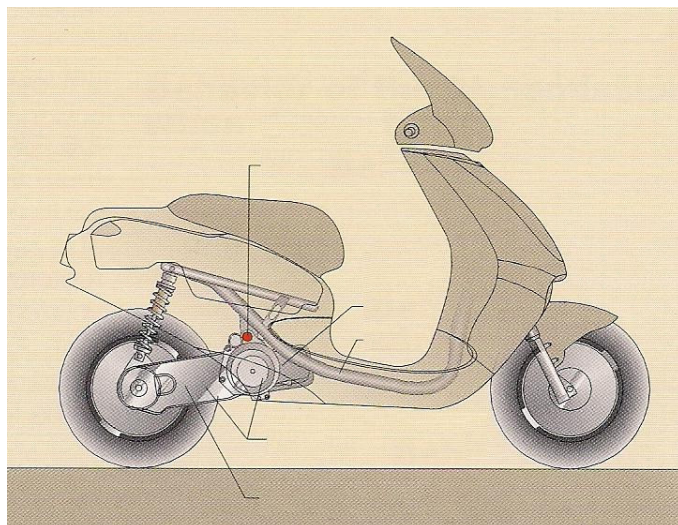


Fig. 24 - Esquema da suspensão traseira de uma scooter [14]

Uma variante do sistema de braço oscilante foi desenvolvida por alguns construtores que optaram por usar uma transmissão final por *cardan*. A primeira solução é apresentada pela Velocette de 1949 seguida pela Moto Guzzi em 1950.

A BMW inicia com a 500 RS a utilização de uma transmissão por *cardan*, que tem uma das maiores evoluções em 1980 com o sistema “*Monolover*”, ver fig. 25, estreado na R80 GS. Em 1987 a BMW introduz uma nova inovação com o sistema “*Paralever*”, usado na nova R100 GS. Este esquema utiliza dois braços, um superior em liga leve, onde passa o veio de transmissão e um inferior que faz a ligação entre o quadro e o cubo da roda e que se pode ver na fig. 26.

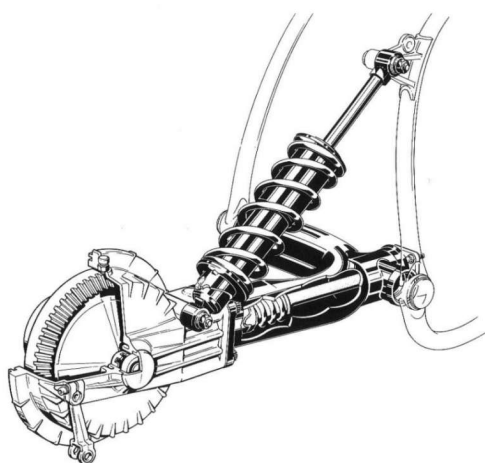


Fig. 25 - Monolover da BMW – 1980 [24]



### 2.2.2. Suspensão traseira progressiva com mono amortecedor

Os sistemas de suspensão traseira até agora vistos não ofereciam uma correspondência entre o aumento da rigidez da mola e o amortecimento proporcionado pelo amortecedor, quando a velocidade de sollicitação é mais elevada. No fim da segunda metade da década de 70, vários construtores japoneses introduziram um novo tipo de suspensão traseira com braço oscilante. Nesta solução existe uma unidade mola-amortecedor, que se caracteriza por ser ter um comportamento progressivo, isto é, quanto maior for o curso maior é o incremento da velocidade de actuação do amortecedor, o que permite igualar a acção da mola. Este efeito é conseguido introduzindo um sistema de ligação entre o braço oscilante e o conjunto mola-amortecedor, geralmente denominado de sistema de bielas e foi pela primeira vez apresentado no McLaren de F1 de 1971.

Em 1979 tanto a Honda como a Kawasaki apresentam as suas primeiras suspensões com sistema progressivo. O sistema *Pro-Link* da Honda, o mais bem sucedido de todos estes sistemas, surge inicialmente na RC 250 de motocross. Neste caso o amortecedor está ligado ao chassis no ponto superior e a um dos vértices de um triângulo no ponto inferior. Este elemento triangular, por sua vez, tem os outros dois vértices ligados ao braço oscilante e a uma biela ligada ao quadro, ver fig. 27 O sistema apresentado pela Kawasaki e designado por *Uni-Trak* tem o amortecedor ligado ao quadro no ponto inferior e é accionado superiormente por um balanceiro que recebe o movimento através de uma biela ligada ao braço, ver fig. 26. Este sistema surgiu primeiro numa KX de motocross, com valores de progressividade na ordem dos 40%, que originaram várias quebras de quadro, devido ao efeito multiplicador da sollicitação.

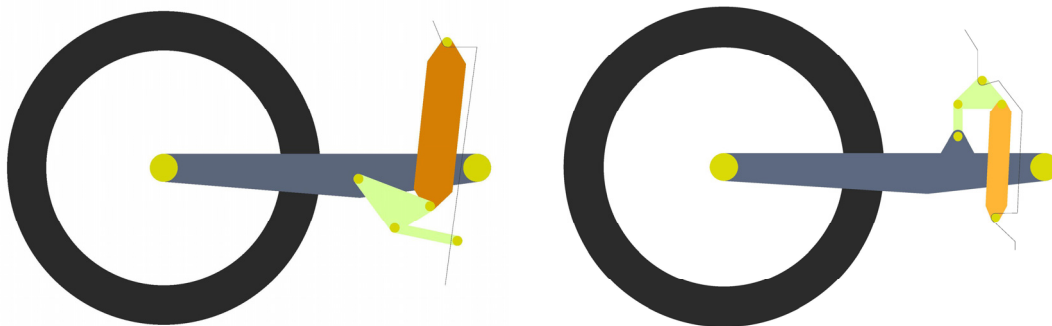


Fig. 27 – *Pro-Link* da Honda

A Suzuki propõe o seu sistema "*Full Floater*" enquanto a Yamaha apresenta uma solução mais simples, denominado de *Monocross*, em que o amortecedor está ligado ao braço oscilante através de uma biela. Estes sistemas encontram-se esquematizados nas figuras 29 e 30.



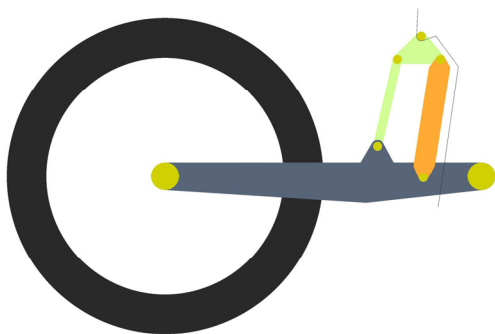


Fig. 29 – Full Floater da Suzuki

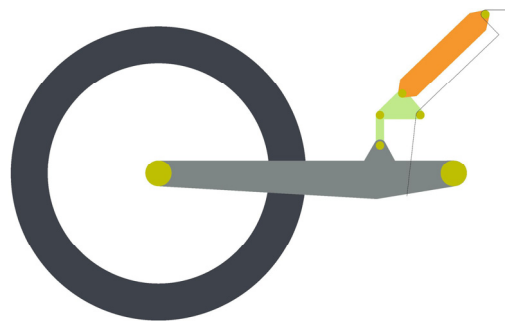
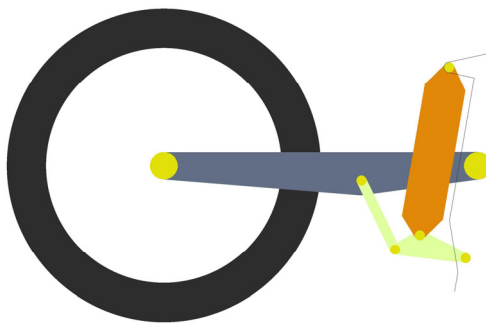


Fig. 30 – Monocross da Yamaha

Alguns destes sistemas mantiveram-se até aos dias de hoje sendo que, no caso da Kawasaki, houve uma evolução para uma solução semelhante ao *Pro-Link* da Honda, invertendo a posição das bielas do quadro e do braço, designado de *Pro-lever*, fig. 31.



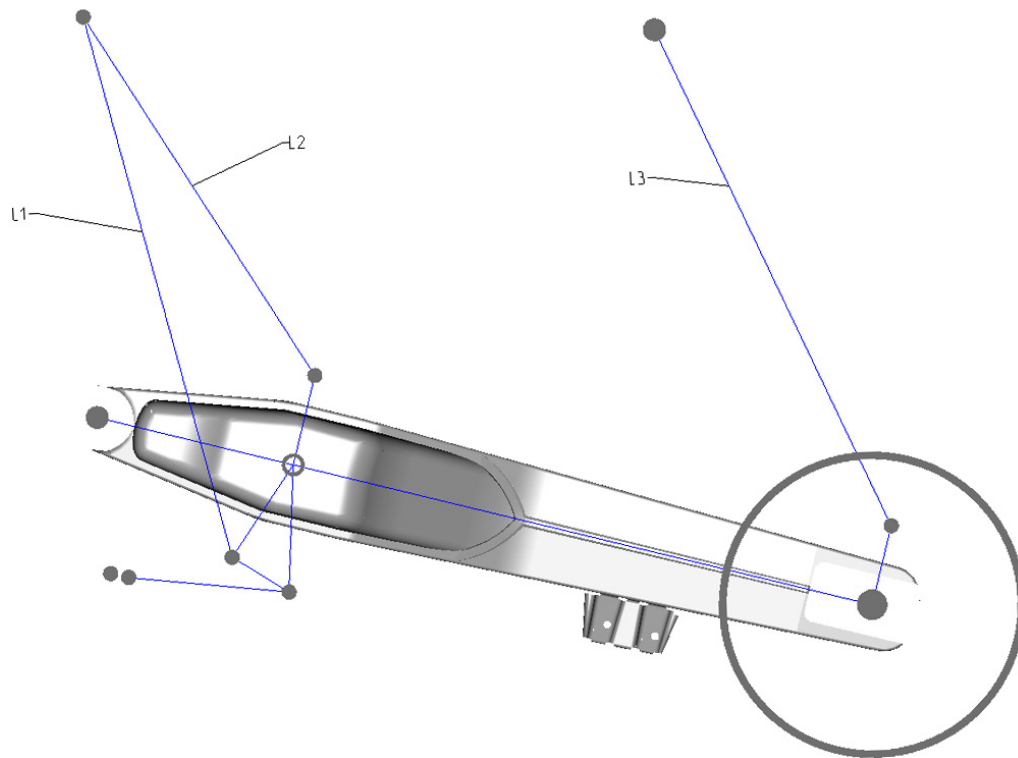
Este tipo de suspensão é hoje usado em vários tipos de motos, desde o motocross até aos modelos desportivos para estrada, seguindo o esquema do amortecedor fixo superiormente no quadro e inferiormente ao par de bielas, sendo uma ligada ao braço oscilante e a outra ao quadro. O valor da progressividade é superior nas motos de motocross comparado com as desportivas e é conseguido através da variação da geometria das bielas.

### 2.2.3. Comparação entre as várias soluções de suspensão traseira actuais

Actualmente existem essencialmente três tipos de suspensão traseira:

- Sistema progressivo – retratado no ponto anterior, usado em vários tipos de motociclos
- Sistema directo anterior – o amortecedor está fixo no braço oscilante numa posição próxima do ponto de rotação do braço e superiormente numa posição idêntica aos dos sistemas progressivos, usado em alguns modelos de Enduro
- Sistema directo posterior – o amortecedor está fixo no braço próximo do eixo da roda traseira e no quadro está fixo numa posição mais recuada quando comparado com os dois sistemas anteriores. Este sistema recorre normalmente a dois amortecedores é tradicionalmente usado nas *scooters* e motos utilitárias.

Nas fig. 32 e é possível ver os três principais tipos de suspensão traseira, correspondendo o A a um sistema progressivo, o B a um sistema directo anterior e o C a um sistema directo posterior.



Considerando que o amortecedor está fixo no mesmo ponto no tipo A e B e que no tipo C o ponto se encontra ao mesmo nível e 150 mm avançado relativamente ao eixo da roda traseira, comparando a posição de repouso com a posição de fim de curso da fig. 33 verifica-se que no caso C o curso do amortecedor é bastante superior aos dos outros dois tipos.

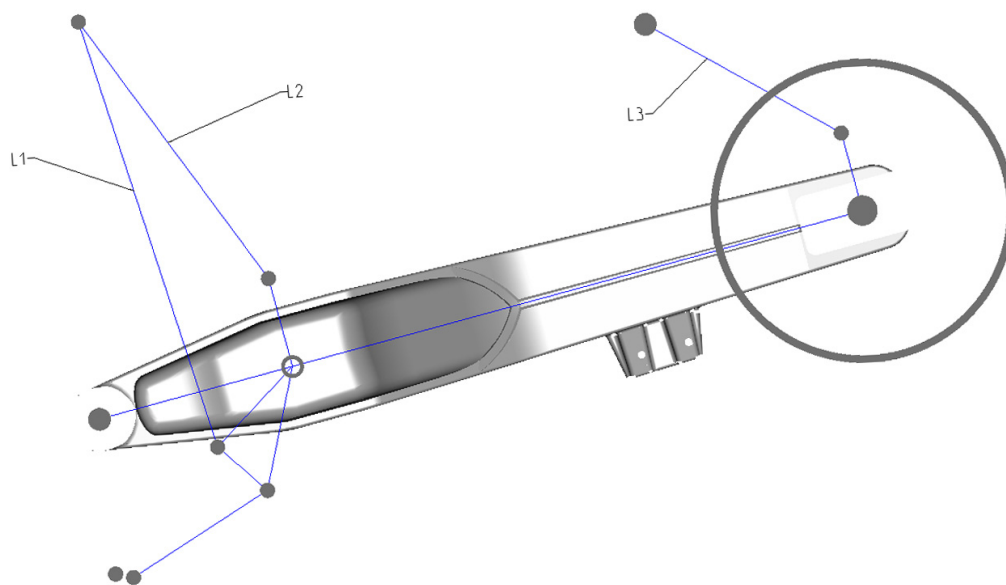
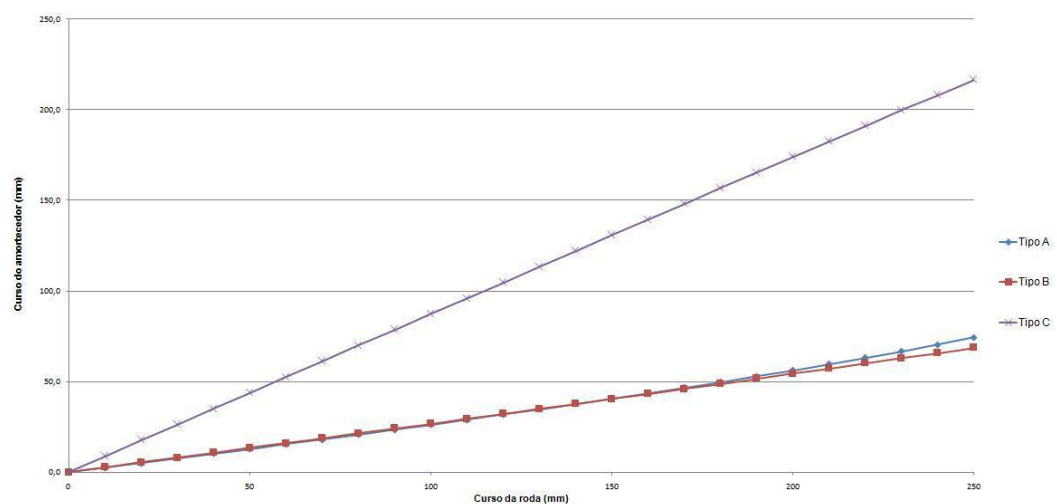


Fig. 33 – Posição de fim de curso da suspensão traseira

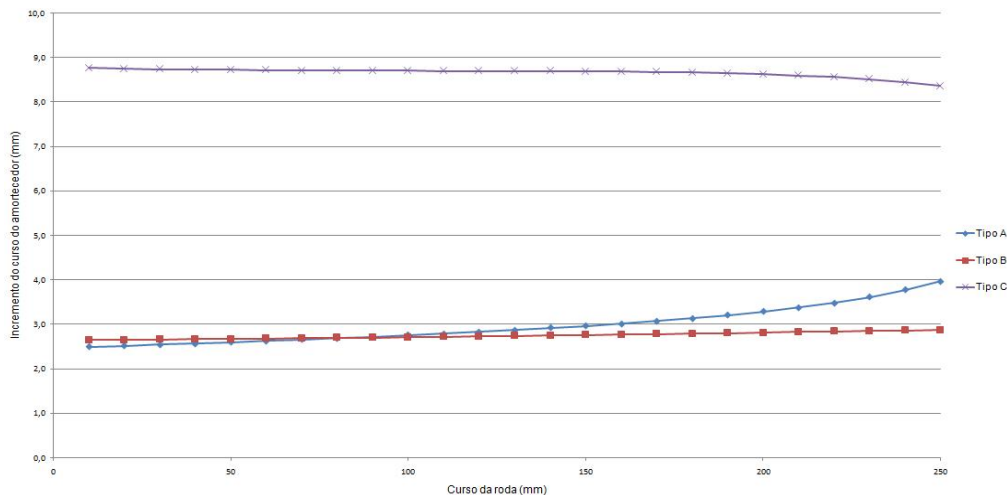
No gráfico da fig. 34 mostra-se a relação entre o curso vertical da roda traseira e o curso de compressão do amortecedor é visível a disparidade do valor do curso do sistema do tipo C quando comparado com os tipos A e B. Entre estes dois, a relação é praticamente igual, só se distinguindo uma diferença para valores mais elevados do curso da roda, no caso presente superior a 200 mm.



Se representarmos graficamente o incremento da compressão do amortecedor em relação ao curso da roda, fig. 35, verifica-se que no tipo A, existe uma progressão no incremento da compressão do amortecedor, que se torna mais evidente à medida que o curso da roda

aumenta. No tipo B a variação é praticamente nula e no tipo C verifica-se o oposto do tipo A, ou seja, para maiores cursos de roda verifica-se um menor incremento.

Na realidade os sistemas do tipo C não apresentam cursos de roda superiores a 150 mm, devido ao facto de se tornarem demasiado grandes e por conseguinte caros e pesados.



Existem várias vantagens associadas à utilização de sistemas mono amortecedor das quais se destacam as seguintes:

- Amortecedores mais curtos, com cursos bastantes inferiores aos cursos da roda, tornando-os mais leves e fáceis de construir;
- A possibilidade da fixação superior no quadro poder ser feita numa posição mais avançada, o que permite aumentar a sua rigidez;
- Menor inércia do próprio motociclo uma vez que o amortecedor está posicionado mais próximo do centro de gravidade do veículo;
- A possibilidade de criar um sistema progressivo com o uso de bielas e de configurar a progressividade do sistema em função da geometria das bielas;
- Custo mais reduzido, uma vez que um amortecedor mais as respectivas bielas custa menos do que dois amortecedores.

Há também que referir que um menor curso do amortecedor implica que o calor gerado pelo amortecedor devido ao atrito viscoso do óleo existente no interior seja menor, quando comparado com um amortecedor com maior curso, o que permite que o amortecedor mantenha as suas características por mais tempo [26].

Pelas razões acima expostas se compreende porque razão as suspensões mono amortecedor com mecanismos para redução do curso são actualmente as mais utilizadas. Desta forma qualquer fabricante que pretenda construir modelos competitivos deverá utilizar esta solução ou desenvolver outra que a substitua com vantagem.

Fica assim sumariamente descrita a evolução das suspensões traseiras dos veículos de duas rodas. Nesta resenha procurou-se destacar as evoluções que marcaram o desenvolvimento dos diversos modelos e ajudam a compreender as soluções actualmente utilizadas.

### 3. MOTO DE ENDURO

O aparecimento de um veículo de duas rodas com elevados desempenhos sempre despertou as paixões dos mais aventureiros. Por isso, desde muito cedo na história destes veículos surgiram competições onde os intervenientes utilizavam as suas máquinas próximo do limite. As diversas competições criadas, algumas ainda se mantêm depois de várias décadas de realização, têm como objectivos percorrer um dado trajecto no menor tempo ou percorrer a maior distância durante um dado período. Os percursos variam desde a pista asfaltada das corridas de velocidade até aos terrenos acidentados ou percursos criados artificialmente das provas de *trial*.

Os construtores para poderem participar de forma competitiva nas provas que foram surgindo tiveram necessidade de adaptar as máquinas produzidas às exigências das competições. Com projectos e evoluções orientados para diferentes objectivos foram criadas máquinas que são hoje classificadas em diferentes categorias: motocross, *trial*, velocidade, enduro, etc.

Os diversos fabricantes destes veículos foram desenvolvendo soluções para as diferentes provas em que participam regularmente. Desta forma foram optimizadas soluções de projecto com as quais cada fabricante foi construindo um palmarés e consequentemente uma imagem de marca que o associa a um ou outro tipo de competição. Ainda que existam actualmente diversos fabricantes que produzem máquinas para diferentes categorias de competição e, consequentemente, diferentes utilizações, a estratégia de mercado de cada marca condiciona fortemente as competições em que se envolve.

Dado que a AJP se dedica quase exclusivamente à construção de motociclos para todo o terreno, o que em termos de competição corresponde à categoria de enduro, será a este tipo de competição que será dedicada alguma atenção.

A categoria de motociclos hoje conhecida por enduro foi inicialmente designada de “moto de regularidade” e só depois surgiu a actual designação. As máquinas com esta categoria são utilizadas num tipo de competição na qual a classificação final é baseada em duas componentes: a primeira consiste no respeito de uma média estabelecida para percorrer a etapa que compõe o percurso e a segunda baseada no menor tempo obtido numa “prova especial”, para decidir a classificação final entre todos os concorrentes, juntamente com as penalizações por incumprimento da média.

#### 3.1. O Início

Este tipo de competição inicia-se nos primeiros anos do século XX em Inglaterra, onde em conjunto com outras competições de todo o terreno, são todas incluídas sob a designação de *trial*. É precisamente em Inglaterra, em 1913, que será disputada a primeira edição daquela que se tornará a mais importante competição de regularidade a nível europeu, os Seis Dias Internacionais.

A origem desta competição deve-se à atribuição de um Troféu que a União dos Construtores de Mota e Bicicleta Ingleses que o propuseram à Federação Internacional de Motociclismo, para exaltar os dotes de velocidade e durabilidade das motos e, simultaneamente, da habilidade dos pilotos. Depois de Inglaterra, iniciam-se este tipo de competições em França. De salientar que na primeira edição dos Seis Dias em Carlisle, das 50 motos que iniciaram a prova, apenas terminaram 10.

A Primeira Guerra Mundial interrompeu a realização de várias edições, sendo retomadas em 1920 em França.

As motos usadas nestas competições não se diferenciavam muito dos modelos de estrada, sendo as alterações mais comuns a adopção de rodas dianteiras de 21 polegadas e pneus com tacos, mais salientes na roda traseira, de parafusos de aperto diferentes para uma troca de rodas mais rápida. Também são usadas protecções de cárter e tanto o carburador como os elementos da ignição são protegidos contra a entrada de água. Os guiadores usados são mais largos para um melhor controlo em todo o terreno. Alguns modelos mais dedicados são a BMW de 1935, a Norton com motor International, a AJS e uma versão especial da Velocette.

### 3.2. O Enduro no pós-guerra

Após a Segunda Guerra Mundial, o panorama das provas de Enduro muda profundamente, com os Construtores a apostarem em motos com cilindradas mais baixas. As provas de Enduro tornam-se mais acessíveis, permitindo que os modelos lançados pelos Construtores sejam competitivos nas novas condições. Como prova disso, várias scooters que competiram nos Seis Dias de 1948 chegaram ao fim sem qualquer penalização.

Em Inglaterra, no entanto, as provas organizadas continuam a primar pela dureza, onde só motos com preparação especial conseguem chegar ao fim. Nos países de Leste esta tendência também se mantém, o que explicará o aparecimento de propostas específicas de Construtores destes países, com modelos que são especialmente desenvolvidos para a competição de provas mais duras.

Existe também uma alteração na própria organização das provas em que a componente das provas especiais começa a tomar preponderância, o que leva a uma aproximação aos modelos de motocross puro.

Em seguida lista-se cronologicamente os principais modelos que foram surgindo ao longo da história do enduro e representam etapas importantes que se destacaram no desenvolvimento dos motociclos actuais. Na grande maioria os fabricantes incluem na referência dos modelos a cilindrada do motor em cc, pelo que a designação cc referente à cilindrada é muitas vezes omissa.

1947 – Jawa 250 e 350, com motorização a dois tempos e suspensão traseira telescópica, figura 36;



1951 – Puch SGS 250 e 282 com motor de dois cilindros e dois carburadores que desenvolviam potências de 22 CV e 25 CV, respectivamente;

1954 – Zundapp 175, 250 e 262, com quadro monotrave, corrente final em cárter fechado. Hercules 100 e 125 GS a dois tempos;

1958 - Moto Guzzi Lodola 175, 4 tempos mono árvore. Greeves com motor a dois tempos 250;

1959 – Moto Guzzi 235. Gilera Giubileo 98, fig. 37. Maico 175 e 250 GS ISDT, com potências de 16 CV e 25CV respectivamente a 6.200 rpm. BSA Gold Star, figura 38;



Fig. 37 - Gilera Giubileo 98 [28]



1960 - Moto Guzzi Lodola Regularita. Maico 350 e 360 GS, com potências de 28 a 5.800 rpm e 39 CV a 6.000 rpm. Puch M 50 e 125 monocilíndrico;

1961 – Zundapp 50 e 75 com alhetas radiais e cilindro em liga leve cromada. Jawa com nova forqueta e suspensão traseira de braço oscilante e potências de 20CV na 250 e 25 CV na 350;

1962 – Moto Guzzi 125 Stornello com motor com 16 CV a 7500 rpm,

1963 – MZ 125, 250 e 300 com admissão por válvula rotativa;

1964- Jawa com quadro de duplo tubo superior tipo “banana”;



1965 – Gilera Regularita 125. Morini Corsaro Regularita. KTM – Penton 50 com motor Sachs de 7 velocidades;

1966- Gilera Regularita Casa 125, com forqueta Ceriani de competição com grande curso e motor com 5 velocidades. KTM Penton 100 e 125;

1967 – Laverda Trail 125 4T com cilindro quase horizontal;

1967 – Puch 125 com caixa de 7 velocidades, com 16.5 CV às 8.500 rpm. Simson 50, com duas velas de ignição e caixa de 4 velocidades, com redutor externo que duplica o número de relações de caixa. Jawa 400. Jawa 75, 100 e 125. Husqvarna 250 Radster, derivada do modelo de cross, com arranque eléctrico e silenciador;

1969 – MZ 400. Jawa 250, 350 e 420 com 28 CV às 6250 rpm, 33 CV e 38 CV. Abandonado quadro tipo “banana”;

1970 – Hercules 50 GS/ABE com motor curso longo com 7 CV a 7500 rpm e caixa de 6 velocidades, figura 39. KTM 175 com caixa de 6 velocidades, potência de 24 a 8.300 rpm, com quadro tubular e entrada de ar debaixo do assento. Simson 50 motor com caixa de velocidades extraível, para trocas de relações de caixa mais rápidas. Bultaco Matador 250, motor com admissão controlada por pistão, com 23.5 CV, figura 40. Ossa Enduro 250;



Fig. 39 – Hercules 50 1970 [30]



1971 - Morini 175 com motor de câmara de combustão tipo Heron e com um escape alterado que permitia reduzir o nível de ruído nos testes de ruído. Zundapp motor de curso curto e 7.5 CV;

1973 –Gilera 50 com 7 velocidades, 100, 125 com admissão por válvula rotativa e 6 velocidades. Zundapp 125 GS. Laverda 250 e 420 2T, 125 LH3 e 250 LM4 com motores Husqvarna com lamelas. KTM 250 com potência de 34 CV a 7.500 rpm;

1975 – Ossa Phantom 250 e 125. Puch 50 e 125 com motor de admissão de lamelas;

1976 – Zundapp com forqueta Marzocchi de 200 mm de curso, amortecedor Koni a gás e peso total de 82 Kg na 50 e 88 Kg na 150;

1977 – Zundapp 125 e 175 com admissão de lamelas e camisa revestida a Nikasil. Forqueta em alumínio e monoamortecedor Bilstein;

1978 – Fantic Motor Caballero 50 e 125;

1978 - BMW 800 GS que será redenominada de R 80 GS, com um motor a 4 tempos de cilindros opostos com 800cc de cilindrada. Este modelo terá como principal êxito a vitória no Paris-Dakar;

1979 – Ossa Desert 250 com potência de 28 CV;

1980 – Puch 80 refrigerada a água;

1981 – Jawa 250 com admissão de válvula controlada por biela;

1982 – Husqvarna 410 com motor a 4 tempos extremamente leve com uma só árvore de cames à cabeça. Fantic Caballero 125 com motor de 26 cv às 10.500 rpm, quadro em aço cromo-molibdénio, forqueta Marzocchi com diâmetro de 35 e curso de 250 mm.

Com início na década de 70 mas com influência determinante a partir dos anos 80 foi a entrada dos construtores japoneses no segmento do Enduro. A introdução de sistemas progressivos lançados por todos os fabricantes japoneses, referido no capítulo 2.2.2 é feita através do lançamento de modelos que marcarão daí para a frente o segmento, com enorme sucesso comercial. Os modelos mais significativos são a Honda XR (figura 41), XL e CR, Yamaha XT (figura 42) e DT, Suzuki DR (figura 43) e Kawasaki KLX (figura 44) e KDX.



Fig. 41 - Honda XR 650 [32]





Fig. 43 – Suzuki DR 350 [34]



Fig. 44 – Kawasaki KLX 250 [35]

A tendência recente é dos modelos de Enduro serem derivações dos modelos de cross, com motores menos potentes, arranque eléctrico e silenciador de escape, com dimensões exteriores reduzidas e altura ao solo mínima de 300 mm.

Consequência desta tendência é o aumento do curso das suspensões e a adopção de sistemas mono amortecedores na traseira com braço oscilante.

Um modelo que foi lançado em 1997 pela Honda foi a CR250, que foi ao primeiro modelo a usar um quadro de alumínio, figura 45. Após o lançamento deste modelo, a tendência dos construtores japoneses foi de progressivamente adoptar este tipo de quadro nos seus modelos de Enduro.



Os modelos mais representativos lançados após o ano 2000 são a Honda CRE 450 com motor a 4 tempos com 55.8 CV às 9000 rpm; a Honda CRE 125 e 250 com motor a dois tempos, com 41 CV às 10.500 rpm e 59.2 CV às 8000 rpm respectivamente; o curso da suspensão dianteira atinge os 331 mm na 450 e 346 mm na 250 enquanto na traseira o sistema progressivo Pro-Link com mono amortecedor tem um curso de 318 mm; a Yamaha nos finais da década de 90 lança a WR 400, com motor de 4 tempos com duas árvores de cames e cinco válvulas no

cilindro, que é substituído mais tarde pelo modelo WR 426 e WR 450; a esta gama é adicionada a WR 250. A Kawasaki e Suzuki desenvolvem em conjunto um modelo 450 com dupla árvore de cames.

A KTM apresenta uma gama com modelos a dois tempos com 125, 200, 250 e 300 refrigerados a água e a 4 tempos com 250, 450 e 520 de cilindrada com uma árvore de cames, 4 válvulas e caixa de seis velocidades.

### 3.3. A actualidade

Existem cerca de 20 construtores a apresentarem modelos de Enduro, tanto de competição como de lazer. Existe uma predominância da utilização de motores a quatro tempos, devido às cada vez mais restritivas normas anti-poluição que as motos de Enduro devem respeitar e também à melhor utilização que um motor de quatro tempos permite, ao disponibilizar maior binário em regimes mais baixos e melhores consumos.

Com modelos mais virados para a competição existe a Honda, Yamaha, Kawazaki, Suzuki, KTM, Husqvarna, Husaberg, TM, Sherco, Gas Gas, Beta, Benelli, Aprilia e BMW enquanto para o Enduro lazer existem propostas da AJP, Rieju, CH Racing.

No que respeita às soluções técnicas o que impera a nível de motores a 4 tempos são motores de cilindradas de 250 e 450cc, que se enquadram nas categorias de competição e alguns motores de maior cilindrada como 510, 520, 550 e 610cc. Nos motociclos com motorização a dois tempos existem motores com 85, 125 e 250, também de acordo com as categorias de competição e em alguns casos com 300cc. Todos os motores têm refrigeração líquida, com caixas de 5 velocidades, ainda que, raramente, surjam algumas com 6. Suspensões invertidas na dianteira com cursos superiores a 300 mm e sistemas de mono amortecedor na traseira, com sistema progressivo, excluindo a KTM, Husaberg e BMW com sistemas directos.

Os quadros variam entre a solução de quadros em dupla trave em alumínio nos modelos japoneses, com vários elementos extrudidos, injectados ou forjados soldados entre si, com rigidez extremamente elevada e a solução de quadro em tubo de aço soldado, utilizado maioritariamente pelos construtores europeus.

De salientar que na suspensão traseira todos os sistemas são de braço oscilante, sendo este tendencialmente realizado em alumínio fundido, existindo ainda algumas propostas, nomeadamente nos construtores japoneses de braços com soldadura de vários componentes extrudidos, fundidos e forjados.

As novidades técnicas mais recentes vêm da Aprilia com o modelo RXV, com motores com dois cilindros em V, com 450 e 550 cc, disposição inédita no segmento, figura 46. Esta solução disponibiliza mais potência e binário, mas tem como reverso um peso superior e distribuição de peso mais crítica, traduzida em resultados desportivos medianos. A BMW lançou uma nova moto de Enduro com 450cc, no qual o depósito se encontra debaixo do assento e com o eixo de rotação do braço oscilante coincidente com o eixo do pinhão, figura 47. Esta solução, considerada inovadora nos dias que correm, não é mais do que os construtores faziam no início do século XX, o que não deixa de ser curioso que uma solução com mais de 100 anos, possa ser considerada inovadora.



Fig. 46 - Aprilia RXV 450 [37]





#### 4. A INDÚSTRIA DE MOTOCICLOS EM PORTUGAL

A indústria motociclista portuguesa chegou a atingir um nível mundial de topo nos anos setenta, em que vários fabricantes utilizavam tecnologia e soluções de vanguarda. A expressão máxima da indústria reflectia-se na Casal, uma vez que era a fábrica que tinha a maior dimensão, possuía fabricação interna de inúmeros componentes e produzia os seus próprios motores, o que não acontecia com outros fabricantes, que compravam motores no exterior ou fabricavam sobre licença.

Os tempos áureos da indústria portuguesa foram atingidos nos anos setenta em que cerca de 20 fabricantes nacionais produziam motas para o mercado nacional e também para as ex-colónias.

Os modelos produzidos eram essencialmente de baixa cilindrada, com motores de 50cc a dois tempos, refrigerados por ar, tendo evoluído nos anos oitenta para refrigeração líquida em alguns modelos, principalmente de estrada. Os motores eram robustos e com elevados desempenhos, sendo lendárias as velocidades atingidas por alguns modelos emblemáticos como a Sis Sachs V5 Lotus e a Casal Magnum.

De destacar que a Casal chegou a deter o recorde mundial de velocidade numa moto com 50 cc, com um protótipo que atingiu os 224 Km/h em 1981, fig. 48.



No entanto, esta indústria não soube acompanhar a evolução e quando Portugal entrou para a CEE e o mercado se abriu aos modelos importados, verificou-se que os modelos japoneses possuíam níveis de fiabilidade e acabamento que as motas portuguesas não conseguiam acompanhar. Quando surgiram as primeiras motas italianas verificou-se também que o seu design era muito mais moderno. A indústria não soube acompanhar esta evolução e verificava-se que na década de 1990, a base da oferta dos construtores nacionais era baseada nos mesmos modelos da década de 1970. Houve algumas tentativas para lançar modelos mais avançados, como a Famel FX 50, modelo de Enduro com 50cc, mas a situação financeira da Famel e das suas congéneres já era má e esses modelos não foram suficientes para relançar as empresas. A agonia terminou com o encerramento da Casal em 2000, aquela que era o emblema da indústria em Portugal.

#### 4.1. Modelos de motos de Enduro produzidos em Portugal.

Para se poder situar a AJP e o modelo que motivou esta tese no panorama nacional será feita uma breve referência aos modelos de motos de Enduro produzidos por fabricantes nacionais. Para facilitar a compreensão do leitor essa referência será dividida por fabricante.

4.1.1. Casal - Os modelos mais significativos da Casal foram as K 188 de 1976 (figura 49), K276 175cc (figura 50), K276 125cc de 1981 (figura 51) e K506 50 Enduro (figura 52). Todos estes modelos usavam motores a dois tempos refrigerados por ar. Em termos de soluções técnicas não eram muito avançadas, uma vez que mesmo no modelo mais recente, ainda usava travões de tambor em ambos os eixos e a suspensão traseira mantinha os dois amortecedores e sistema directo.



Fig. 49 - Casal K 188 [40]



Fig. 50 - Casal K 176 125 [41]



Fig. 51 - Casal K 176 175 [40]



4.1.2. Fundador - O modelo mais significativo da Fundador foi a MRE 50, que usava um motor Casal de 50cc refrigerado por líquido. A primeira versão, figura 53, usava um sistema progressivo na suspensão traseira, enquanto a segunda, lançada mais tarde, já vinha equipada com um travão de disco na roda dianteira, figura 54.





Fig. 53 - Fundador MRE 50 [42]



Fig. 54 - Fundador MRE 50 [43]

4.1.3. SIS – a SIS teve dois modelos de relevo: ST 50 e RE 50. A primeira dos fins dos anos 80 já possuía suspensão traseira com mono amortecedor, figura 55. A segunda do início da década de 90 já apresentava disco de travão na dianteira, figura 56.



Fig. 55 - SIS Sachs ST 50 [44]



Fig. 56 - SIS Sachs RE 50 [45]

4.1.4. FAMEL - A Famel lançou em finais de 80 a TT 50 - figura 57 - com soluções convencionais para a época. Em 1997 lançou a FX 50 Enduro, um dos modelos mais avançados da indústria nacional até à data, figura 58. Sistema mono amortecedor com acção progressiva, forqueta invertida, travões de disco em ambos os eixos. Era equipada com um motor Zundapp de 50cc, refrigerado por líquido.



Fig. 5 - Famel TT 50 [46]



4.1.5. ANFESA - A Anfesa lançou o seu primeiro modelo de Enduro em 1984, denominado de RT 125, figura 59. Este modelo era praticamente uma cópia da Yamaha DTMX 125. No entanto, no início da década de 90 a Anfesa lançou três novos modelos - RX 175 (figura 60), RV 250 (figura 61), RV 50 (figura 62) – que tinham soluções de ciclística ao melhor nível. Estes modelos apresentavam todos forqueta invertida, sistema progressivo com mono amortecedor, travões de disco em ambos os eixos. Todos os motores eram a dois tempos, com refrigeração líquida.



Fig. 59 - Anfesa RT 125 [47]



Fig. 60 - Anfesa RV 50 [48]



Fig. 61 - Anfesa RX 175 [47]



4.1.6. MACAL - A Macal terá sido o fabricante nacional mais profícuo no lançamento de modelos de Enduro. O primeiro modelo foi o Cross da figura 63, seguido do Enduro Competição, figura 64, que derivou do modelo Cross competição, nos anos 70. Estes modelos caracterizavam-se por soluções convencionais para a época, como os motores refrigerador a ar, a suspensão traseira por braço oscilante e dois amortecedores e travões de tambor.





Fig. 63 - Macal Cross [49]



Fig. 64 - Macal Enduro Competição [49]

O modelo que se seguiu foi a TT 50 cujas soluções não diferiam dos modelos anteriores, apenas sofreu alterações estéticas, figura 65. A Macal Trail 50 já apresentava uma certa evolução, ao oferecer uma suspensão traseira com mono amortecedor e sistema progressivo e motor com refrigeração líquida, figura 66.



Fig. 65 - Macal TT 50 [49]



Fig. 66 - Macal Trail [49]

Os modelos mais recentes – Dakar Junior da figura 67 e Trail II da figura 68 - seguiam a orientação da Trail, com alterações sobretudo estéticas e a introdução de um travão de disco no eixo dianteiro.



Fig. 67 - Macal Dakar Junior [50]



4.1.7. VILAR - A Vilar, marca mais conhecida pelo fabrico de bicicletas, tinha disponível um modelo designado Cross, figura 69. O facto mais saliente do modelo era o quadro tipo banana, sem berço inferior ligado à coluna de direcção.

4.1.8. FORVEL - A Forvel, marca pouco conhecida de Cantanhede, disponibilizou um modelo Cross, com motor Casal de 50cc, figura 70. Como particularidade apresentava o escape por baixo do quadro, facto pouco usual em modelos de todo o terreno.



Fig. 69 - Vilar Cross [51]



Fig. 70 - Forvel Cross [52]

4.1.9 MVM - A MVM, fabricante de Anadia e um dos últimos a surgir no panorama motociclista nacional, apresentou o modelo Challenge 50 para o segmento do Enduro, figura 71. Utilizava um motor Fantic de 50cc, refrigerado por líquido. Em termos de ciclística, possuía forqueta invertida, suspensão traseira progressiva com mono amortecedor e travões de disco em ambos os eixos.



## 5.1 AJP MOTOS

Uma vez que a base de trabalho da tese é um desenvolvimento realizado pela AJP MOTOS, será feita uma descrição mais profunda tanto do historial industrial como comercial da empresa.

A sociedade iniciou a actividade em 1987, tendo como sócios fundadores António Pinto e Jorge Pinto. Começou como uma pequena oficina de reparações e transformações de motos em Galegos, Penafiel.

### 5.1. AJP ARIANA 125

Apesar dos fracos recursos e pouco conhecimento na altura, a AJP-MOTOS lançou o seu primeiro modelo em 1990, três anos após a criação da empresa. Esse primeiro modelo foi denominado ARIANA 125, que utilizava um motor Casal de 125cc a dois tempos, com refrigeração líquida e caixa de seis velocidades, figura 72.



Fig. 72 - AJP ARIANA 125

Este modelo tinha algumas soluções bastante avançadas quando comparada com a restante oferta dos fabricantes nacionais. Os pormenores de inovação que a distinguiam dos demais eram os seguintes:

- Suspensão dianteira com forqueta invertida;
- Suspensão traseira progressiva com mono amortecedor;
- Travagem com disco em ambos os eixos;
- Jantes com três raios;
- Descanso telescópico;

O quadro era perimétrico, construído em tubos de aço soldados entre si. A secção traseira não era desmontável, conforme visível na fig. 73. O braço oscilante era obtido por construção soldada de várias secções obtidas de perfil de aço, figura 74. Possuía um sistema progressivo com bielas realizadas em aço que melhoravam o desempenho da suspensão, figuras 75 e 76. A produção destes dois importantes componentes era realizada pela própria



AJP. De referir que o desenvolvimento do modelo foi todo feito manualmente, inclusive os moldes para obtenção dos componentes. Nas figuras seguintes mostram-se alguns detalhes da estrutura e ciclística do primeiro modelo produzido pela AJP.



Fig. 73 – Quadro da AJP ARIANA



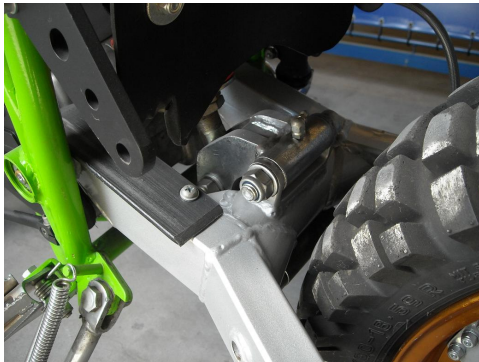


Fig. 75 – Bielas da suspensão traseira da AJP

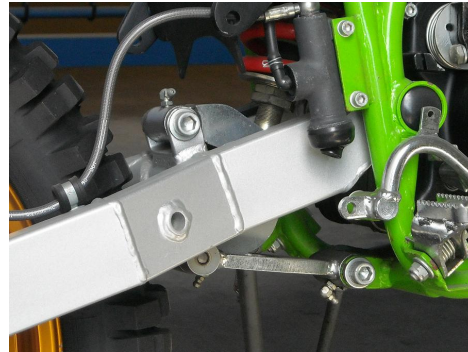


Fig. 76 – Bielas da suspensão traseira da AJP ARIANA

O modelo ARIANA 125 foi produzido durante 2 anos, tendo vendido 15 unidades. Este modelo participou em várias competições de Enduro e Todo-o-terreno, tendo-se sagrado Vice-campeão Nacional de Enduro em 1992 e Campeão Nacional de TT e Vice-campeão de Enduro em 1993. Estes resultados comprovaram a efectividade das soluções escolhidas.

## 5.2. AJP GALP 50

Em 1995 surgiu a AJP GALP 50, com motor CASAL de 50cc com refrigeração líquida e caixa de seis velocidades. Este modelo iniciou a produção em série na AJP MOTOS. Na fig. 77 mostra-se uma fotografia deste modelo.



Fig. 77 - AJP GALP 50

O quadro da GALP 50 era constituído em construção soldada utilizando vários tubos com diferentes espessuras de parede e geometrias de secção. Na figura 78 mostra-se a estrutura do quadro onde é visível a traseira desmontável.





Este modelo foi o primeiro motociclo comercializado que apresentou um braço oscilante numa só peça. A solução usada até à data era a realização de braços oscilantes obtidos através da soldadura de várias peças, em aço ou alumínio. Esta solução implicava a realização de várias ferramentas, processos de corte e finalmente de soldadura, que implicavam um grande investimento em ferramentas e tornavam o processo oneroso.

Para ultrapassar estas limitações a AJP, com a ajuda da Pechiney, desenvolveu um braço oscilante em alumínio, obtido por fundição de areia, numa só peça. Após a obtenção do braço fundido em bruto, as únicas operações que se realizam a seguir eram a maquinação, para abertura de caixas, furos, facejamento e roscagem e, no caso particular da AJP, o polimento das faces visíveis. A fotografia que apresenta na figura 79 mostra o braço da suspensão traseira tal como era montado.



Esta solução implicou um investimento avultado para a dimensão da AJP e só foi possível porque a Pechiney forneceu uma liga de alumínio adequada ao processo de fabrico e à utilização do braço. Com efeito, até se definir a liga correcta, houve várias quebras de braços, porque as ligas usadas até então, se revelavam frágeis para as solicitações a que o braço era sujeito.

A liga finalmente seleccionada e utilizada era a Calypso 67 B, segundo a designação AFNOR, sendo a designação química  $\text{AlSi7Mg0,3}$ . O tratamento térmico usado é o T6, com as seguintes propriedades mecânicas:

- Tensão de cedência ( $\sigma_{0,2}$ ) = 250 MPa
- Tensão de rotura ( $\sigma_m$ ) = 165 MPa
- Alongamento após rotura: 8%
- Dureza (HB) = 80

Esta liga é a mais adaptada ao processo de fundição de areia, que oferece as melhores características para maquinagem e cujas propriedades mecânicas se adequam aos esforços suportados pelo braço.

Comparando o peso do novo braço da GALP 50, que pesava 3,450 Kg, com o da Ariana 125 que pesava 4,050 kg, concluiu-se que a opção pelo desenvolvimento do braço em alumínio foi uma boa decisão. Desta forma foi possível reduzir os custos de produção e diminuir as massas móveis da suspensão traseira contribuindo para melhorar a sua resposta dinâmica.

No que respeita ao processo de desenvolvimento e produção, mais uma vez foi todo realizado manualmente recorrendo à experiência recolhida com a competição e construção dos modelos anteriores. O quadro era realizado na AJP, sendo todos os seus componentes maquinados e soldados na fábrica. Em todo o processo de fabrico apenas a pintura era subcontratada no exterior. No caso do braço oscilante, os moldes foram realizadas manualmente, por um carpinteiro de moldes, em madeira. A fundição do braço era realizada na

Felino e a maquinação final do braço na AJP. A AJP não dispunha na altura de nenhuma máquina de comando numérico, pelo que o processo de maquinação do braço era realizado em várias operações, sendo demorado, oneroso e sujeito a falhas de qualidade.

A suspensão traseira, para além do novo braço em alumínio, possuía um sistema de bielas que lhe proporcionava a progressividade. As bielas eram em aço e realizadas também na AJP. Nas figuras 80 e 81 mostram-se em detalhe as bielas utilizadas para obter um efeito progressivo do conjunto mola/amortecedor.

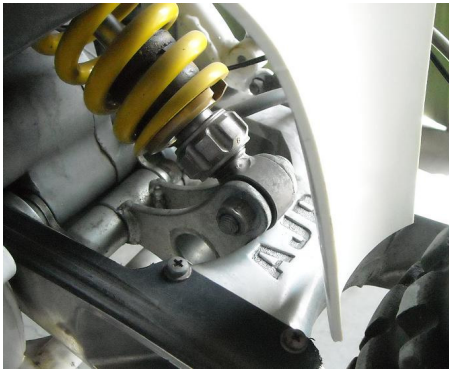


Fig. 80 – Bielas da suspensão traseira da GALP 50



Fig. 81 – Bielas da suspensão traseira da GALP 50

A validade do novo braço oscilante ficou demonstrada através das várias competições oficiais nas quais este modelo participou, sendo de realçar as vitórias nos Campeonatos Nacionais de TT em 1996 e 1999 e de Enduro em 1996, 1997, 1998, 1999 e 2000.



Em 1999, nos International Six Days of Enduro em 1999 na Lousã foi a única moto com motor de 50cc a terminar a prova, facto de relevo, uma vez que a categoria mais baixa em competição era de 85cc.

Teve igualmente uma participação de relevo na Gilles Lalay Classic, prova de extrema dureza que tem lugar entre Limoges et Peyrat le Château, tendo sido a única 50 cc a completar a

1ª classificativa. Esta prova é realizada em homenagem ao célebre campeão francês Gilles Lalay e é considerada uma das mais duras do mundo.

Em 2000, com a falência da Casal, a AJP MOTOS ficou sem fornecimento de motores para o modelo GALP 50, o que colocou em risco a sobrevivência da empresa.

### 5.3. AJP PR4 125

Mesmo com todas as contrariedades então surgidas, a AJP-MOTOS decidiu desenvolver um novo modelo. Esse novo modelo seria desenvolvido a partir da base da GALP 50, utilizando um novo motor, desta feita a 4 tempos, com uma cilindrada de 125 centímetros cúbicos e caixa de cinco velocidades. O motor escolhido foi um motor baseado num motor Honda já com muitos anos no mercado, com fiabilidade reconhecida, sendo fornecido por uma empresa de Taiwan, a CPI.

No início de 2001 foi lançada a PR4 125 que se revelou um sucesso no mercado nacional, figura 83.



Este novo modelo continuou a utilizar a solução do braço oscilante em alumínio fundido, com dimensões diferentes do usado na GALP 50, dado que o modelo PR4 era de maiores dimensões, figura 84. Este braço quando finalizado pesava 4.400 g, valor superior em 1.000g quando comparado com o da GALP 50. Este aumento do peso justificava-se pela necessidade do braço da PR4 suportar cargas mais elevadas que o da GALP 50.

As razões devem-se aos seguintes factores:

- Peso mais elevado, 100 kg da PR4 contra 82 Kg da GALP 50,
- À maior velocidade máxima alcançada pela PR4, o que implica cargas dinâmicas maiores, em particular na prática do Enduro
- Dimensões do braço maiores, para obter uma distância entre eixos superior





Fig. 84 – Braço oscilante da AJP PR4

Mais uma vez os moldes foram realizados manualmente, em madeira, sendo o processo idêntico ao da GALP 50, apenas a fundição passou a ser realizada pela empresa Firmago.

As bielas do sistema progressivo tinham nova geometria, devido à alteração das dimensões do braço. Estes elementos mecânicos eram ainda realizados em aço, na AJP.

No que respeita ao quadro, a PR4 possuía um quadro que derivava da GALP 50, obviamente reforçado para suportar o maior peso do motor, 30 kg do motor 125 a 4 tempos contra 16 kg do motor 50 a 2 tempos e as próprias vibrações originadas pelo motor 4 tempos. As dimensões globais do próprio quadro também eram superiores, porque foi intenção da AJP realizar a PR4 como uma mota maior que a GALP 50, figura 85.





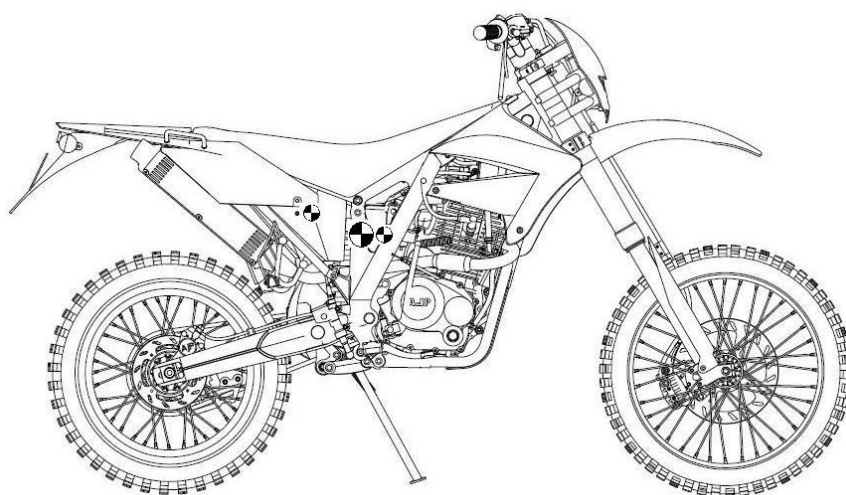
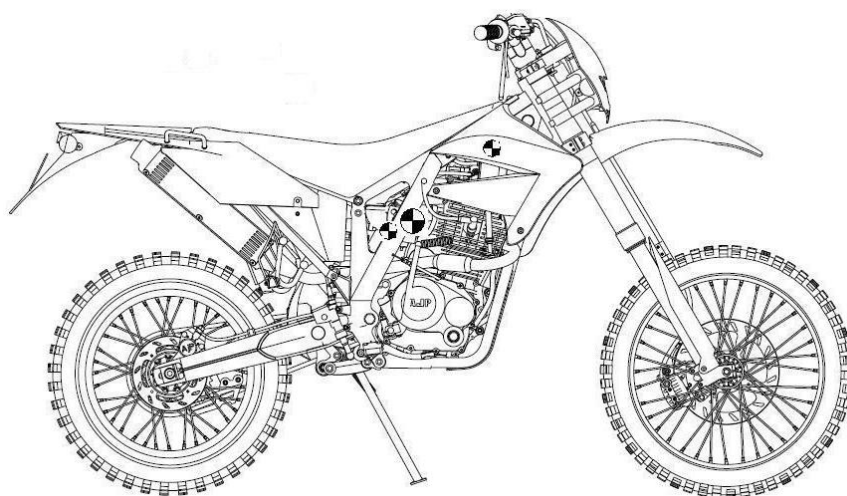
Os quadros inicialmente eram construídos na AJP, tendo ainda durante algum tempo sido produzidos na MACAL. Em 2004, com os problemas que a MACAL estava a passar e que levaram ao seu posterior encerramento, a produção voltou a ser realizada na AJP.

A AJP reservou uma importante inovação para a PR4: a colocação do depósito de combustível debaixo do banco do condutor, figura 86.



A solução usualmente utilizada pelos fabricantes de motociclos era colocar o depósito de combustível por cima do motor, a seguir à coluna de direcção, normalmente dividido em duas metades. Quando o depósito se encontra cheio de combustível, o peso do combustível eleva o centro de gravidade da moto e sobrecarrega o eixo dianteiro, tornando-a mais difícil de controlar. À medida que o nível de combustível desce o centro de gravidade altera-se e a carga no eixo dianteiro diminui, o que faz com que em função do nível de combustível o comportamento da moto varia.

A figura 87 tenta exemplificar o efeito da posição do depósito no veículo.



Ao colocar o depósito de combustível debaixo do banco do condutor o centro de gravidade da moto fica numa posição inferior quando se compara com a solução tradicional e quando este se encontra cheio, a carga incide principalmente no eixo traseiro, que no caso de uma moto de Enduro é benéfico, porque facilita a tracção, em particular em terrenos de fraca aderência. Na tabela 1 temos a distribuição de peso sobre o eixo dianteiro e traseiro, da GALP 50 e da PR4.

|                | GALP 50            |                    | PR4                |                    |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Eixo           | Dianteiro          | Traseiro           | Dianteiro          | Traseiro           |
| Depósito vazio | 37,6 Kg<br>(49,4%) | 38,4 Kg<br>(50,6%) | 51,5 Kg<br>(48,8%) | 54,0 Kg<br>(51,2%) |
| Depósito cheio | 40,0 Kg<br>(50,0%) | 40,0 Kg<br>(50,0%) | 52,7 Kg<br>(48,0%) | 57,2 Kg<br>(52,0%) |

Tabela 1 - Distribuição de peso sobre o eixo dianteiro e traseiro em função da quantidade de combustível no depósito

Pela análise da tabela 1, verifica-se que quando o depósito está vazio, a distribuição de peso incide mais no eixo traseiro, em particular na PR4, cujo peso em vazio sobre o eixo traseiro é de 51,2% do peso total.

Quando o depósito está cheio, no caso da GALP 50 como o depósito está situado na zona anterior, o incremento de peso incide mais sobre o eixo dianteiro, fazendo com que a distribuição de peso final seja igual nos dois eixos.

Na PR4, com o depósito debaixo do assento do condutor, quando este se encontra cheio o incremento do peso incide principalmente no eixo traseiro, atingindo os 52% do peso total.

Em termos de condução em todo o terreno é benéfico que o eixo traseiro tenha mais peso que o dianteiro uma vez que facilita a transposição de obstáculos.

Embora não tenha sido quantificado, com o depósito debaixo do assento o centro de gravidade fica numa posição mais baixa comparando-se com o depósito situado na zona anterior. Ao aproximar o depósito do centro de gravidade diminui também a inércia do veículo tornando mais fácil de manobrar.

Para além da inovação da colocação do depósito, o seu fabrico introduziu também algumas inovações. Este elemento passou a ser realizado em polietileno, através do processo de rotomoldagem. Com este processo o depósito é obtido apenas numa operação.

O molde para a rotomoldagem também foi realizado manualmente. De salientar que este depósito tinha incrustado alguns casquilhos roscados, que permitiam fixar o depósito ao quadro directamente.

Este modelo também participou em várias competições, tendo obtido resultados interessantes, sendo de destacar a fiabilidade que tanto o braço oscilante como o novo depósito demonstraram sob condições de utilização extrema.

Com a PR4 125 a AJP MOTOS começou a exportar para alguns países europeus, como Inglaterra e Alemanha.

Em 2004 a AJP lançou a AJP PR4 200, modelo em tudo idêntico ao modelo com motor de 125cc, à excepção do motor, obviamente e da inclusão de um radiador de óleo, para melhor refrigeração do motor 200.

#### 5.4. AJP PROTO 400

Após o lançamento da PR4, havia a intenção de aumentar o número de modelos da gama AJP. Para tal, foi decidido que se iria desenvolver um modelo com cilindrada superior, de forma a entrar num segmento mais elevado.

Dada a experiência que o Sr. António Pinto possuía e em colaboração com o autor, que iniciou a sua colaboração na AJP de forma mais directa, foi projectado o que seria um modelo com motor de 400cc.

Na sequência desse desenvolvimento, no salão de Milão de 2003 foi apresentado um protótipo com motor Suzuki de 400cc, que era utilizado no modelo DR 400Z. Este protótipo incorporava soluções já “tradicionais” da AJP com o depósito colocado debaixo do banco e o braço oscilante em alumínio, embora com um novo desenho, o que implicava um sistema de bielas diferente do usado na PR4. Este modelo encontra-se representado na figura 88.



A principal inovação deste protótipo foi a adopção de um quadro com dupla trave de alumínio, aparafusado à coluna de direcção na parte superior, figura 89 e ao berço inferior, figura 90. As duas traves seriam obtidas pelo mesmo processo do braço oscilante, fundição de areia e posterior maquinagem. Esta configuração já era usada em modelo desportivos de estrada, por proporcionar elevada rigidez e baixo peso, embora com quadros com geometria mais complexa e obtidos pela soldadura de vários componentes.

As traves foram desenhadas para que os pontos de fixação de alguns elementos da estrutura e elementos funcionais fossem apertados directamente nas traves. O amortecedor traseiro era fixo na trave, assim como a estrutura traseira.



Fig. 89 – Fixação superior das traves ao berço

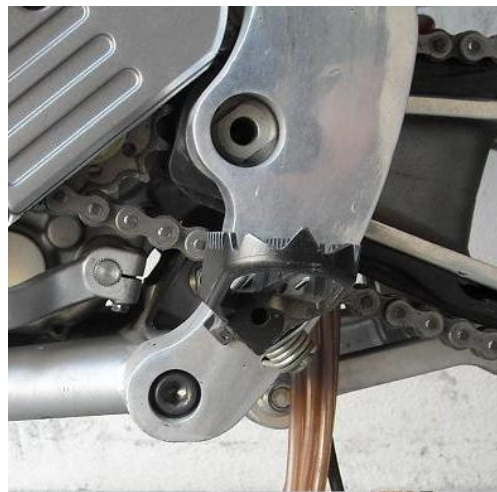


Fig. 90 – Fixação inferior das traves ao berço

Foi com este protótipo que a AJP fez a primeira aproximação a tecnologias como o CAD-CAM-CAE e à prototipagem rápida. Tanto as traves como o braço oscilante foram modelados em software CAD 3D, figuras 91 e 92, procurando obter a máxima resistência com o menor peso.

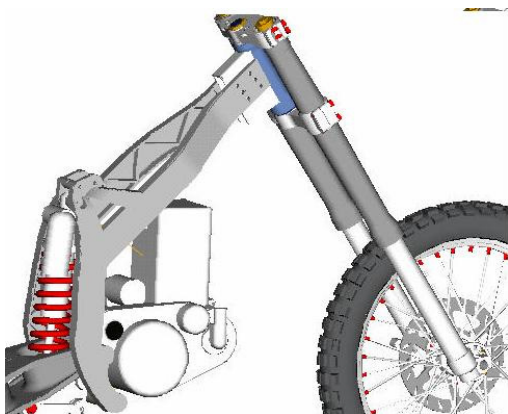
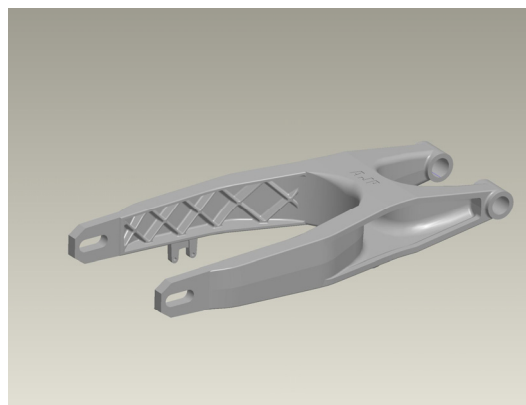


Fig. 91 - Trave AJP PROTO 400



Para a construção do protótipo foi necessário obter peças em alumínio. No caso das traves, com o modelo 3D, foram realizados dois protótipos em SLS no Cinfu. A partir destes protótipos em resina, a Firmago preparou moldações manuais e obteve peças de fundição.

Para a obtenção do braço oscilante, o modelo 3D gerado numericamente foi usado para projectar os moldes que iriam ser usados para o processo de fundição. O molde, por sua vez, era constituído por 5 elementos:

- Moldação superior;
- Moldação inferior, figura 93;
- Molde caixa de machos interior, figura 94;
- Molde caixa de machos do lado da corrente, figura 94;
- Molde caixa de machos do lado do travão, figura 94;





Fig. 93 - Moldação inferior do braço da PROTO 400



Fig. 94 - Caixas de machos do braço da PROTO 400

Todos os elementos dos moldes foram maquinados na AJP, aproveitando-se uma máquina de controlo numérico que entretanto tinha sido adquirida. A fundição do braço foi realizada na Firmago, tendo sido depois maquinado na AJP.

Existem dois aspectos a realçar neste novo modelo: o design do novo braço e o sistema de bielas. Estes dois aspectos estão relacionados porque neste braço foi alterado o ponto de fixação da biela do braço, deixando de estar no plano de simetria do braço, para passar para uma posição inferior. A consequência em termos de design do braço foi que o miolo do braço desapareceu, existindo agora uma zona oca que permite reduzir o peso deste, figura 95. Devido à alteração do ponto de fixação da biela do braço, foi alterado o próprio esquema das bielas, ficando o amortecedor fixo à biela do quadro, ao invés do que se passou na GALP 50 e PR4 125, figura 96.



Fig. 95 - Bielas da AJP PROTO 400

As reacções do público foram extremamente positivas, tendo suscitado o interesse de muitos potenciais clientes, que questionaram acerca da sua produção e início de comercialização.

Infelizmente este protótipo nunca passou à produção, devido à decisão tomada pela Suzuki em não fornecer motores à AJP. O protótipo realizado não era funcional pelo que nunca foi testado, não se validando a solução do quadro com dupla trave.

## 5.5. BIELAS DA SUSPENSÃO TRASEIRA EM ALUMÍNIO

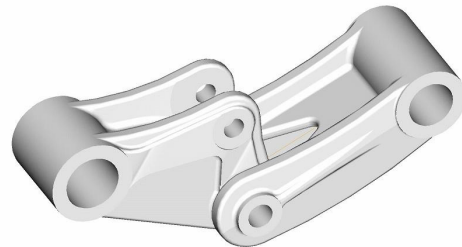
Em 2005 foi feita uma alteração às bielas da PR4, que passaram a ser obtidas pelo mesmo processo dos braços. Ambas as bielas do braço e do quadro passaram a ser produzidas em alumínio, tendo-se realizado os moldes na AJP, sendo a fundição realizada na Firmago e a maquinagem final na AJP.

Foi feito um estudo em elementos finitos que deu indicações que a geometria desenhada garantia uma resistência semelhante à resistência das bielas em aço. O objectivo desta alteração era evitar vários problemas, tais como:

- As bielas em aço requeriam a realização de vários componentes, figura 97;
- Esses componentes eram posteriormente soldados, o que levava a problemas dimensionais na caixa onde se alojava o rolamento, devido à contracção;
- As bielas necessitavam de tratamento superficial – zincagem – o que também originava problemas dimensionais nas caixas dos rolamentos;



Fig 97 - Imagem bielas em aço



Com a introdução das bielas em alumínio, estes problemas foram resolvidos, uma vez que as bielas vinham da fundição no estado bruto e eram maquinadas na AJP e não necessitavam de mais nenhuma operação, figura 98.

A nível de resistência mecânica, foram feitas algumas simulações por elementos finitos com o programa Pro/Mechanica da PTC, figuras 96 e 97. No quadro seguinte estão as tensões máximas em cada uma das bielas, considerando a mesma carga:

|        | Tensões (MPa) |          |           |
|--------|---------------|----------|-----------|
|        | Aço           | Alumínio | Diferença |
| Biola  |               |          |           |
| Braço  | 627           | 388      | -38,1%    |
| Quadro | 340           | 176      | -48,2%    |

Tabela 2 – Comparação de tensões entre as bielas em aço e alumínio

As tensões máximas baixaram 38% no caso da biela do braço e 48% na biela do quadro. Era necessário atingir tal redução uma vez que a resistência do alumínio é cerca de 3 vezes inferior à do aço.

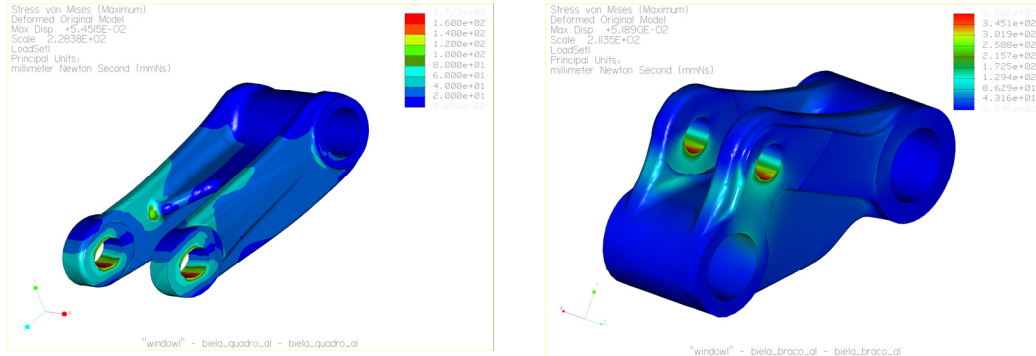


Fig.99 - Tensões na biela do quadro em alumínio

Após a introdução destas bielas em alumínio houve alguns casos em que a biela do quadro sofreu rotura, em solicitações extremas. Esta situação foi corrigida com as novas bielas da PR3, como será relatado mais tarde.

Uma vantagem que decorreu desta alteração foi uma redução de peso de cerca de 240g no conjunto das duas bielas, que se traduziu numa diminuição de 28% do peso do conjunto, o que diminuiu a massa do sistema progressivo da suspensão traseira, o que beneficia o seu desempenho pela redução da inércia.

## 6. VALIDAÇÃO ESTRUTURAL DE UM NOVO CONCEITO DE CHASSIS

O principal objectivo deste trabalho consistiu na validação de um novo conceito de estrutura de um motociclo que foi desenvolvido pela empresa AJP MOTOS. Entende-se por conceito de estrutura todos os elementos que garantam a rigidez estrutural do motociclo, tais como:

- Quadro;
- Braço oscilante traseiro;
- Estrutura traseira

No caso presente foi estudado com maior detalhe o quadro e o braço oscilante traseiro, visto terem um carácter inovador e a eles estar associada uma maior incerteza quanto ao seu desempenho estrutural. Quanto à estrutura traseira, construída em aço, e uma vez que é semelhante às actualmente utilizadas, a sua resistência e fiabilidade estão garantidas.

Especial destaque é dado ao quadro. Trata-se de uma solução inovadora que consiste na utilização de duas traves de alumínio fundido que ligam a zona inferior do quadro ao apoio do amortecedor e a zona da coluna de direcção, como se pode ver nas figuras 101 e 102. O modelo de motociclo que resultou deste projecto foi baptizado pela AJP por PR3.

Numa fase inicial a geometria das traves proposta foi avaliada recorrendo-se ao programa de elementos finitos Pro/Mechanica. No entanto, apesar de os resultados da simulação serem promissores, dando já uma indicação relativamente à resistência das traves, seria fundamental realizar cálculos mais detalhados e medições que permitissem validar as soluções adoptadas. Estes elementos estruturais são de grande importância na garantia de rigidez global da estrutura. Dado que se trata de um veículo que também se destina a ser utilizado em todo-o-terreno em actividades de lazer, isto é, solicitações próximas das de competição, será de toda a conveniência garantir um completo conhecimento do desempenho estrutural deste elemento.



Fig. 101 – Trave direita da AJP PR3



Fig. 102 – Trave esquerda da AJP PR3

Por sua vez o braço oscilante traseiro utilizado na PR3 é uma evolução relativamente ao braço usado no modelo mais antigo, a AJP PR4. Mesmo assim, trata-se de um novo componente, no qual se introduziram algumas melhorias e se reduzir o peso final. Por isso justificou-se uma análise estrutural mais aprofundada, não só em termos numéricos mas



também em situação real de utilização. Este componente foi construído em fundição de alumínio que deverá suportar as elevadas cargas geradas durante a utilização do veículo, com especial incidência nas solicitações mais agressivas como são os saltos, figura 103.



Fig. 103 - Braço oscilante traseiro da AJP PR3

Para a realização deste trabalho foi necessário construir uma estrutura de carga que permitiu, numa primeira fase, simular com rigor e de forma controlada as cargas estáticas sobre o chassis. Foi projectado e construído um *gabari* com pontos de fixação devidamente ajustados e um sistema de carga. Com esta estrutura foi possível medir as tensões instaladas em alguns pontos da estrutura sob solicitações estáticas

Como estes modelos, dadas as suas características, podem ser utilizados em situações próximas das de competição, é também desejável que se conheça o seu comportamento estrutural sob a acção de cargas dinâmicas. Para isso foi também planeado um programa de ensaios de pista utilizando sistemas de telemetria e um piloto experimentado que utilizasse o veículo em situações limite. Nestes ensaios foram medidas as tensões geradas nos elementos críticos por uma condução desportiva.

Como comparação em termos de fiabilidade foi utilizada a informação já disponível em relação à estrutura que se encontrava, à data, em produção, modelo AJP PR4. Embora este quadro não tenha sido testado experimentalmente existem dados relativos a avarias e uma larga experiência da sua utilização.



## 6.1. Validação da estrutura de um veículo de duas rodas

Como não existia na AJP experiência sobre a validação da estrutura foi realizada uma pesquisa bibliográfica exaustiva relativamente aos seguintes pontos:

- Ensaios normalmente utilizados na validação de estruturas de motociclos;
- Normalização existente
- Procedimentos a seguir.

O resultado desta tarefa resultou um tanto ou quanto infrutífero, porque não foi possível encontrar, nos vários editores consultados, livros que fizessem referência ao processo de desenvolvimento de uma estrutura de uma moto.

Também através de pesquisas em bases de dados disponíveis e pela Internet não foi possível encontrar artigos relacionados com este tema. Na opinião do autor existem algumas razões que podem conduzir a esta falta de informação:

- Apenas os principais construtores tem conhecimento acerca do desenvolvimento de estruturas para motos. Como tal, esse conhecimento não é difundido a um nível geral;
- Como se trata de um sector em que, tirando os principais construtores, existe muito conhecimento empírico, os pequenos construtores e preparadores desenvolvem as suas estruturas baseado na experiência acumulada ao longo de vários anos;
- A metodologia de tentativa e erro é ainda recorrente, devido à não utilização de métodos numéricos e à ausência de meios experimentais para a realização dos ensaios.

Na literatura foi possível encontrar alguns autores que se debruçaram sobre a dinâmica do motociclo em movimento, como o comportamento do motociclo em aceleração, travagem, em curva. No entanto, não foi encontrado nenhum texto que referisse de forma inequívoca qual a metodologia mais recomendada para validar uma nova estrutura.

Devido à falta de informação disponível, foi decidido seguir uma metodologia que conjugasse os métodos numéricos de simulação, comparando os resultados da simulação com testes estáticos realizados em laboratório seguidos de um conjunto de testes dinâmicos em pista, recorrendo à instrumentação de uma moto e recolha de dados por telemetria.

## 6.2. Identificação dos aspectos principais do projecto

### 6.2.1. O quadro

Conforme já foi referido, um dos objectivos do projecto PR3 era desenvolver um quadro de moto diverso do utilizado na moto que se encontrava em produção na altura, a AJP PR4, figuras 104 e 105. Na tabela 3 listam-se as principais características e principais problemas diagnosticados ao quadro da PR4:

| Característica                                            | Problema                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quadro integralmente soldado                              | Tempo total de soldadura por quadro aproximadamente de 3 horas, realizada em várias operações.<br>Consumo elevado de fio de soldadura e gás de protecção.<br>Baixa produtividade                                                                                            |
| Quadro composto por 55 componentes                        | Grande número de componentes necessários para produzir um quadro.<br>Vários componentes necessitavam de passar por várias operações em máquinas e ferramentas diferentes.                                                                                                   |
| Peso total após soldadura 10,5Kg                          | Apesar do quadro ser bastante robusto, apresentava um peso elevado.                                                                                                                                                                                                         |
| Passagem do ar e combustível pelo tubo superior do quadro | Necessidade de maquinar o tubo superior em máquina de comando numérico.<br>Necessidade de realizar soldadura de chapa separadora no interior do tubo<br>Verificação da estanquicidade da soldadura, para impedir que o combustível entrasse directamente para o carburador. |

Tabela 3 – Características e problemas do quadro da AJP PR4



Fig. 104 – Quadro da AJP PR4



Fig. 105 – Pormenor do quadro da AJP PR4

Para melhorar o quadro da PR3, foi idealizado um quadro constituído por um semi-quadro em aço, que albergasse a coluna de direcção e a zona do berço do motor e por duas travessas em alumínio, obtidas por um processo idêntico ao do braço traseiro utilizado com sucesso na PR4. Este elemento era obtido por fundição de areia sendo maquinado posteriormente. Inicialmente considerou-se a utilização de uma solução idêntica à utilizada no quadro do protótipo com motor 400, contudo, conclui-se que, dadas as características de ambos os modelos, deveria ser diferente, embora seguindo a mesma filosofia

Foram então definidos alguns aspectos, que estão resumidos na tabela 4, que o quadro a produzir deveria respeitar assim como as implicações daí resultantes:

| Característica                                                                | Objectivos                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quadro com berço e coluna da direcção em aço                                  | Aumentar a produtividade.<br>Tempo total de soldadura por quadro aproximadamente de 1,5 horas, realizada em várias operações.<br>Redução do consumo de fio de soldadura e gás de protecção.<br>Redução do número total de componentes.<br>Simplificar o processamento dos componentes do quadro. |
| Fecho do quadro em aço através de duas traves em alumínio                     | Redução do número de componentes.<br>Apresentar uma solução inovadora e com um aspecto atractivo.<br>Reduzir o peso total do quadro em 15%.                                                                                                                                                      |
| Pontos de fixação do amortecedor traseira e bomba do travão traseiro na trave | A geometria da própria trave deveria garantir a fixação directa de vários componentes.<br>Redução do número de peças.                                                                                                                                                                            |
| Nova caixa do filtro de ar                                                    | Colocação da caixa do filtro do ar com ligação directa ao carburador.<br>Colocação da caixa do filtro do ar numa posição elevada, para impedir a entrada de água em travessias de ribeiros.                                                                                                      |
| Utilização da mesma liga do braço da PR4                                      | Como a liga do braço da PR4 estava comprovada, pretendia-se aproveitar o conhecimento já existente, tanto ao nível da fundição como da maquinaria.<br>Permitir economia de escala, ao usar a mesma liga em duas peças diferentes.                                                                |

Tabela 4 – Características e objectivos do quadro da AJP PR3

A modelação da nova trave começou em Março de 2006. Foram realizadas várias iterações em *software* CAD, tendo-se iniciado com uma proposta baseada na trave instalada no protótipo 400. Na figura 106 pode mostra-se a geometria da trave que inspirou o desenvolvimento da actual. Esta geometria sofreu várias alterações ao longo do tempo e em Agosto de 2006 foi decidido prototipar a geometria definida nessa data, que se encontra representada na figura 107.



Fig. 106 – 1ª Iteração da trave



Fig. 107 – Iteração da trave prototipada

A geometria definida para as traves respeitava todas as características impostas que se resumem na tabela 4. Para cumprir com todos os requisitos obteve-se uma configuração um pouco mais complexa que se encontra exemplificada nas figuras 108 a 111.

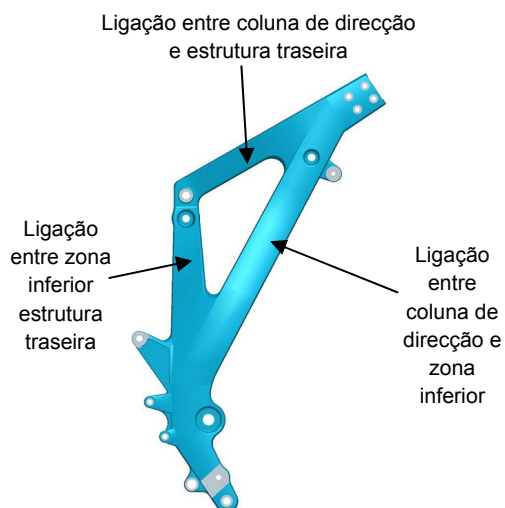


Fig. 108 – Configuração global da trave

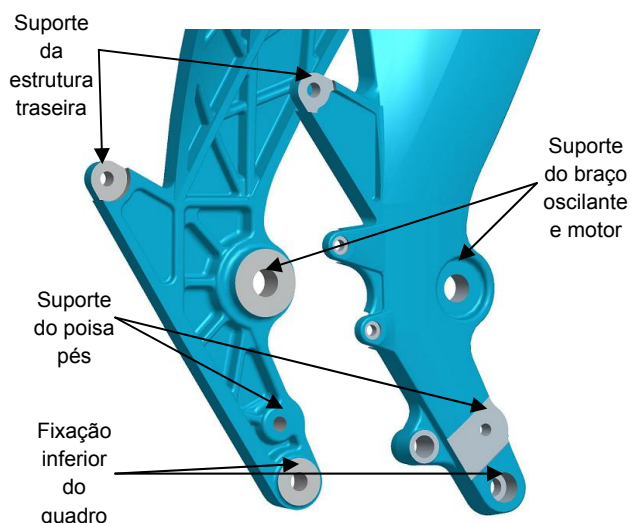


Fig. 109 – Fixações na zona inferior da trave

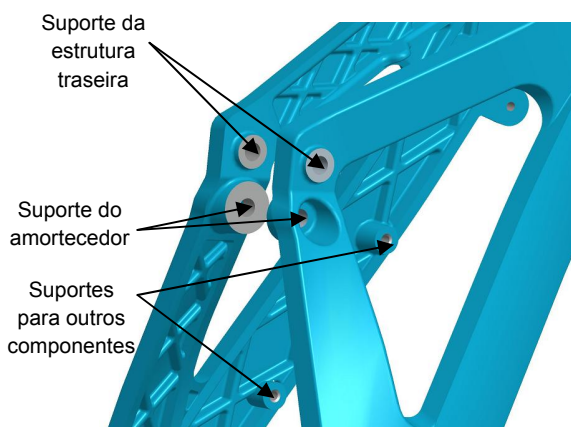


Fig. 110 – Fixações na zona superior da trave

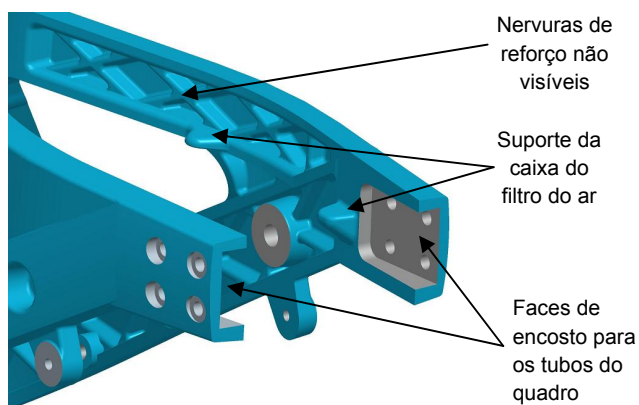


Fig. 111 – Fixações na ligação à coluna de direcção

A tecnologia utilizada para a obtenção dos primeiros modelos funcionais foi a prototipagem rápida, tendo-se recorrido a um equipamento de SLS do CEIIA, para prototipar as traves que se encontram representadas na figura 112.

Estes protótipos foram utilizados para montar um primeiro protótipo não funcional do modelo PR3. Com este protótipo foram verificadas as dimensões e atravancamento da montagem final do quadro e componentes. Foi também com este modelo que se avaliou a estética final do modelo PR3. Na figura 113 mostra-se a fase inicial da montagem do primeiro protótipo do modelo PR3.



Fig. 112 – Traves da PR3 em SLS



Fig. 113 – Montagem 1º protótipo

Como resultado da montagem deste primeiro protótipo, foram realizadas pequenas alterações na trave e preparou-se o modelo 3D para que esta pudesse ser obtida pelo processo de fundição de areia. Para melhorar a relação peso/resistência foram aplicadas algumas nervuras na parte interna da trave. Em todas as faces foram dados ângulos de saída para facilitar o processo de moldação da areia.

As primeiras peças funcionais em alumínio foram obtidas através da realização de protótipos rápidos das traves. A empresa Firmago utilizou esta solução para poder realizar os moldes para a fundição em areia. Na figura 114 mostra-se a parte principal do molde construído na Firmago.

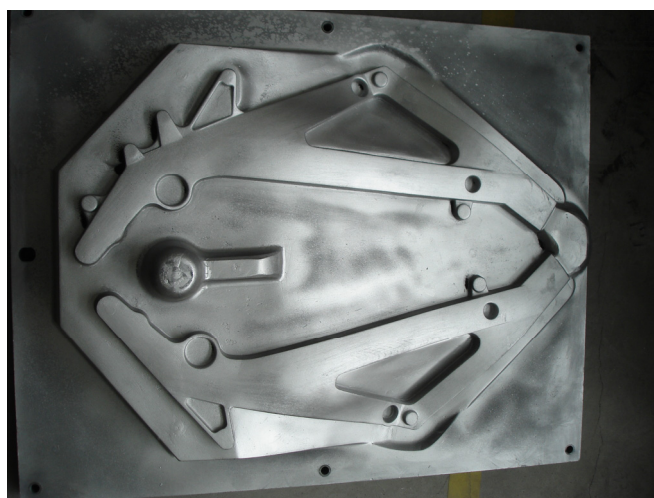


Fig. 114 – Molde das traves realizado pela Firmago

No entanto, verificou-se com este processo que as peças finais tinham distorções não aceitáveis. Tanto o processo de prototipagem rápida como o processo de fundição acarretam riscos de distorção nas peças que, neste caso particular, era agravado pela dimensão das traves e pelo facto de serem peças com pouca rigidez na direcção perpendicular ao plano de apartação.

Por ter ocorrido uma distorção inaceitável nas primeiras peças fundidas decidiu-se avançar com a execução de moldes para fundição obtidos por maquinagem em resina. Dado já haver internamente alguma experiência na realização de moldes para fundição de areia, o projecto e a execução dos mesmos foi realizado pela AJP, mostrando-se na figura 115 uma



das partes do molde obtido. Desses moldes resultaram depois peças em bruto com muito maior qualidade, como se mostra nas figuras 116 e 117.

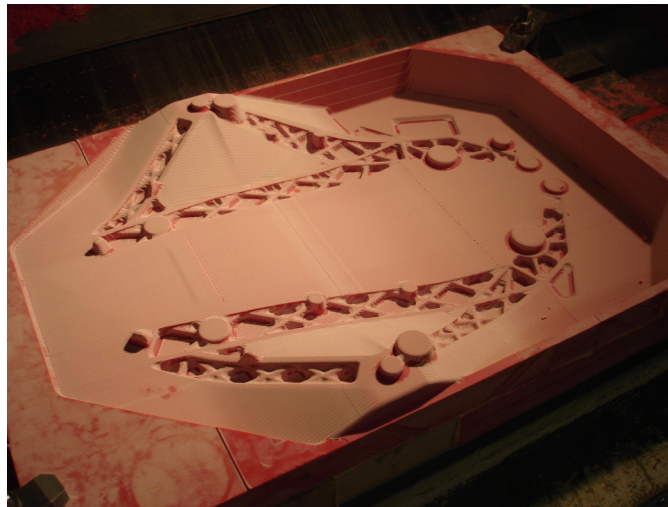


Fig. 115 – Molde da trave obtido na AJP por maquinagem em resina



Fig. 116 – Traves da PR3 em bruto - exterior

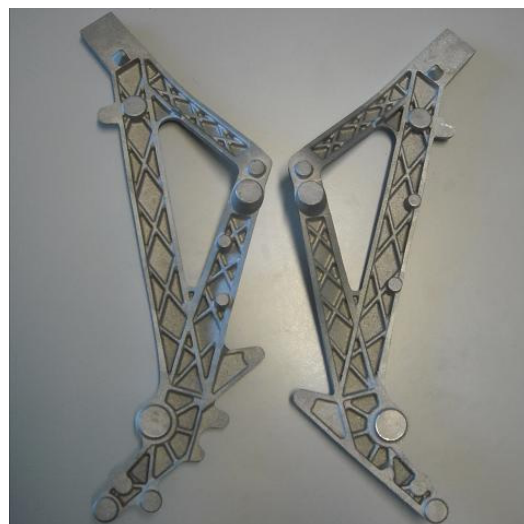


Fig. 117 – Traves da PR3 em bruto exterior

Para a maquinação final das traves, foi ainda desenvolvido um *gabari* para utilizar no centro de maquinação de comando numérico. Este dispositivo possibilitava a maquinação das traves direita e esquerda em dois apertos. Este *gabari* foi mais tarde utilizado para a produção em série deste componente e encontra-se representado na figura 118.



Fig. 118 - *Gabari* construído para maquinagem das traves

Com o *gabari* construído foi possível obter traves maquinadas em perfeitas condições de utilização e assim construir o primeiro protótipo funcional do modelo PR3. Nas figuras 119 e 120 mostram-se ambos os lados de um par de traves pronto para ser instalado.



Fig. 119 – Traves da PR3 maquinadas - exterior



Fig. 120 – Traves da PR3 maquinadas - interior

### 6.2.2. Simulação numérica da trave

Foi com base nesta geometria que se realizaram as simulações numéricas em Ansys, com o objectivo de determinar os pontos críticos da trave. O sistema de coordenadas usado mostra-se junto com a malha na figura 121.

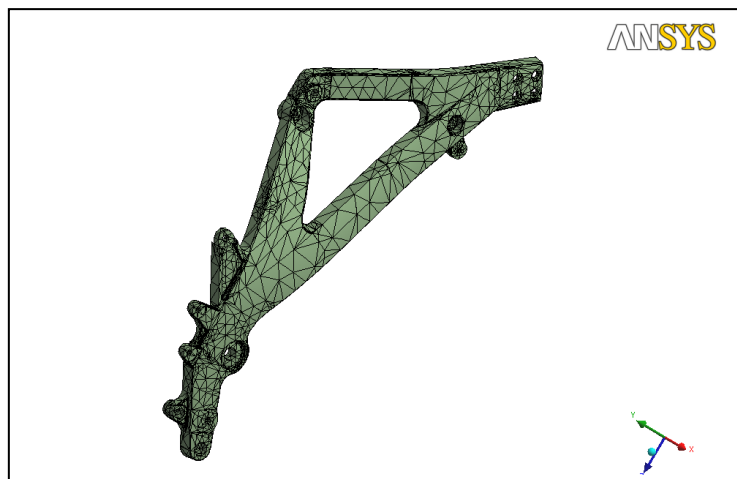


Fig. 121 - Malha de elementos finitos utilizada na simulação numérica em ANSYS®

A malha gerada que pode ser vista na figura anterior é constituída por 44373 elementos tetraédricos de 10 nós e possui 76538 nós. Os elementos utilizados são do tipo SOLID187 e integram a biblioteca do programa ANSYS® e a sua geometria encontra-se representada na figura 122. Trata-se de um elemento 3D de alta ordem com modelação quadrática do deslocamento que conduz normalmente a bons resultados com superfícies complexas tais como as provenientes de programas de CAD. Uma descrição completa do elemento pode ser encontrada em [54].

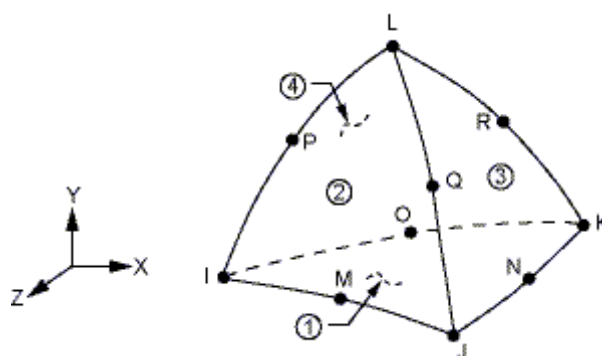


Fig. 122 Geometria do elemento SOLID187 da biblioteca ANSYS®

Foram consideradas várias condições fronteira:

- Fixação inferior ao quadro por parafuso. Sem deslocamento em X.
- Fixação superior ao quadro por intermédio de quatro parafusos. Sem deslocamento em X.
- Fixação do amortecedor. Sem deslocamento em X.
- Fixação do braço oscilante e do motor. Sem deslocamento em X.
- Não foram considerados a fixação da bomba do travão traseiro, pedal do travão traseiro, suporte da traseira e suporte do reservatório do amortecedor.
- Simetria entre as traves, uma vez que as únicas diferenças se devem à presença da bomba do travão traseiro e suporte do pedal de travão traseiro na trave direita. Os suportes da traseira têm posições diferentes na trave esquerda e na direita, mas como a carga da traseira não foi considerada, simplificou-se o estudo.

Em termos de condições de carga, considerou-se que solicitação mais exigente a que a estrutura iria estar sujeita seria quando a moto atingisse o solo em virtude de um salto. As outras solicitações mais comuns como resultantes de aceleração, travagem e em curva foram consideradas com um grau de solicitação inferior, quando comparado com a recepção de um salto.

Considerou-se igualmente que a carga seria aplicada nos poisa pés do condutor, porque a posição normal do condutor na recepção de um salto é em pé, apoiado nos poisa pés e no guiador. Para simplificar considerou-se que, nessa situação, o peso está completamente apoiado nos poisa pés. No quadro do modelo PR3, os poisa pés estão aparafusados lateralmente na trave, sendo esse o ponto em que a carga deve ser considerada.

Apesar do modelo PR3 não ser uma moto de competição, determinou-se como referência para validar os resultados da trave e do braço, que estes deveriam suportar uma carga equivalente a 4 vezes a massa do veículo em marcha.

Uma vez que a massa da moto é de 100 Kg e considerando um utilizador com 75Kg de massa, seguindo os critérios existentes nas directivas para homologação de veículos de 2 rodas <sup>1</sup>, a massa total em marcha é de 175 Kg. Para o efeito da simulação numérica, considerou-se uma massa total de 700 Kg.

Como a distribuição de peso estático é de cerca de 50% em cada eixo, foi considerado que na recepção do salto, a carga era distribuída equitativamente pelos dois eixos.

Considerando  $g=9.8\text{ms}^{-2}$ , calcula-se uma carga por eixo de  $700/2 \times 9.8 = 3430 \text{ N}$ .

Apesar da carga aplicada ao poisa pés e por eixo ser facilmente determinável, em função do critério de validação seguido, a sua transposição para a trave não é imediata, devido ao seguintes factores:

- O cálculo da rigidez do quadro em aço não é fácil de realizar e não fazia parte dos objectivos deste estudo;
- Devido ao facto anterior, não é possível determinar com exactidão a carga que o quadro em aço transmite à trave quando a moto aterra de um salto;
- A determinação da acção do amortecedor na trave, também não é de cálculo imediato, embora se possa determinar com razoável aproximação.

Face ao exposto, estimaram-se as cargas a aplicar da seguinte forma:

- Poisa-pés

Direcção vertical

$$\text{Massa do condutor} \times g \times \text{factor} / 2 \quad (1)$$

$$75 \text{ kg} \times 9.8 \text{ ms}^{-2} \times 4 / 2 = 1437 \text{ N}$$

- Apoio superior da trave

Direcção vertical

$$\text{Carga por eixo} / 2 \quad (2)$$

$$3430 \text{ N} / 2 = 1715 \text{ N}$$

Momento eixo X

$$\text{Carga por eixo x braço} / 2 \quad (3)$$

$$3430 \text{ N} \times 0.5 \text{ m} / 2 = 807.5 \text{ N.m}$$

- Fixação do amortecedor

Direcção vertical

$$\text{Carga por eixo x factor suspensão traseira} / 2 \quad (4)$$

$$3430 \text{ n} \times 4 / 2 = 6860 \text{ N}$$

Dada a posição quase vertical do amortecedor apenas se considerou essa direcção. Não existe momento aplicado, devido ao factor do amortecedor rodar no ponto de fixação na trave.

Após várias simulações com diferentes carregamentos chegou-se às condições de fronteira e carregamento que se mostram na fig. 123. Estas condições foram as que conduziram a resultados mais ajustados às tensões medidas estaticamente.

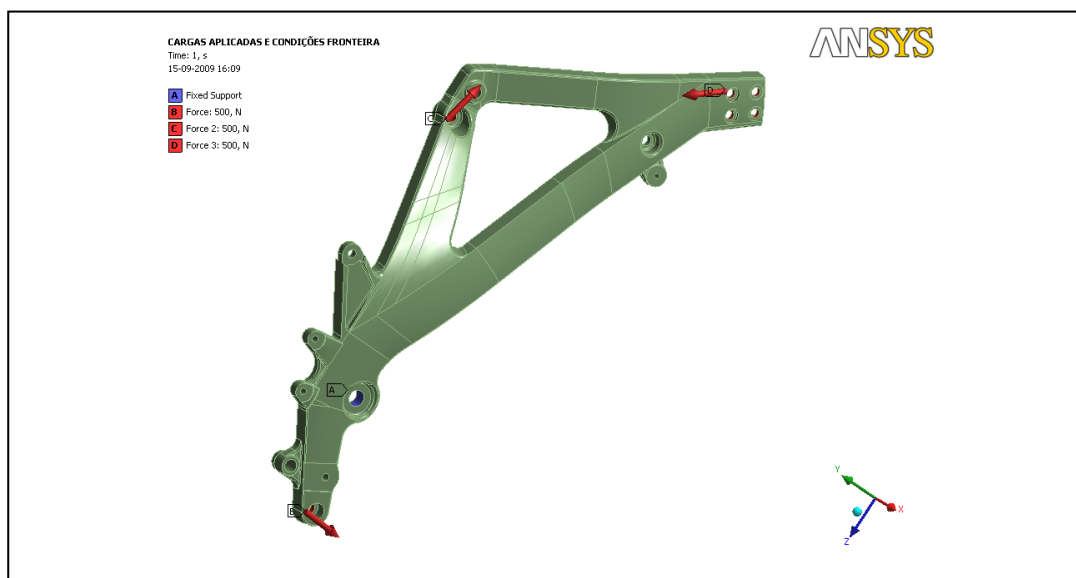


Fig. 123 – Cargas utilizadas na simulação em Ansys

O material considerado na simulação foi a liga de alumínio AlSi7Mg0.3, com tratamento térmico T6, já definido na página 40.

Com os resultados da simulação por possível identificar as prováveis áreas críticas existentes na trave. Neste caso em particular, a área crítica encontrava-se por cima do ponto de fixação do braço e do motor na trave. O valor máximo obtido para a tensão equivalente de Von Mises rondava os 70 MPa, o que levava a supor que existia ainda uma margem de segurança em termos de comportamento elástico, figuras 124 e 125.



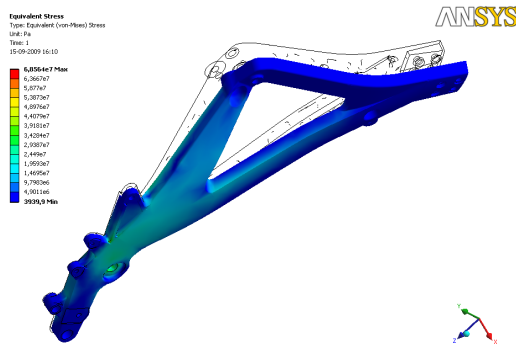


Fig. 124 - Distribuição de Tensões de Von Mises (parte externa)

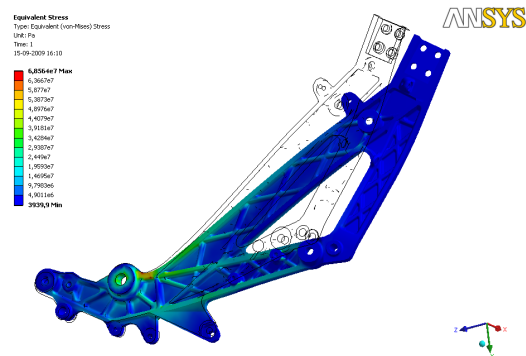


Fig. 125 - Distribuição de tensões de Von Mises (parte interna)

Os valores obtidos para a distribuição da tensão de Von Mises revelavam uma uniformidade ao longo da geometria da trave com o aparecimento de uma concentração de tensões na vizinhança de um dos apoios pelo lado interior da trave. Na figura 126 mostra-se em detalhe a distribuição de tensões obtida nessa região.

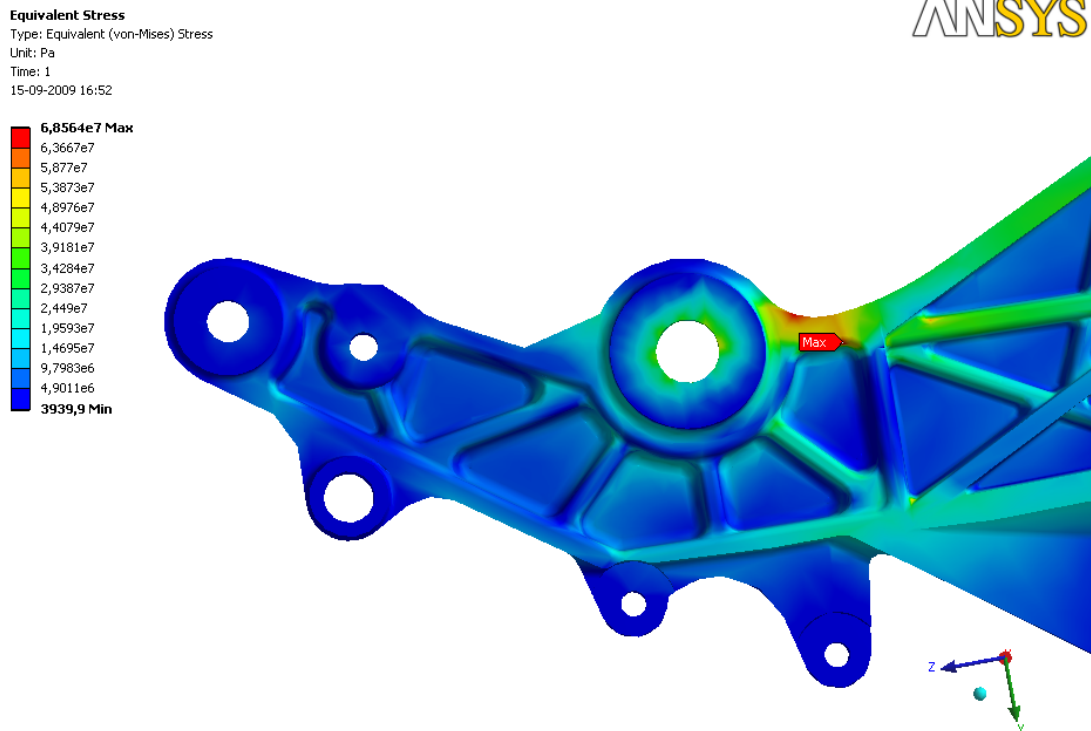


Fig. 126 - Detalhe da distribuição de tensões de Von Mises na vizinhança do apoio de ligação da trave a estrutura de aço do quadro.

### 6.2.3 Braço oscilante

Dada as menores dimensões do modelo PR3 face ao existente PR4, houve necessidade de se desenvolver um novo braço oscilante. Ainda que com características e conceito semelhantes estes braços possuem algumas diferenças de geometria que serão indicadas mais adiante.

As características do braço existente no modelo PR4 eram as seguintes:

| Característica                          | Problemas                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Peça única obtida por fundição em areia | Necessário realizar vários moldes<br>Existência de zonas com massividades, o que pode resultar em rechupes                                                                                                                                                                        |
| Peça com zonas delgadas                 | Dada a dimensão do braço, a zona da peça que faz a ligação entre a fixação da biela ao eixo traseiro é relativamente delgada, o que pode originar distorção.                                                                                                                      |
| Necessita de maquinaria                 | Necessidade de <i>gabari</i> para maquinação<br>O <i>gabari</i> deve poder jogar com distorções resultantes da fundição                                                                                                                                                           |
| Peça sujeita a carga elevada            | O braço oscilante é uma peça estrutural que liga o eixo traseiro ao quadro da moto.<br>Tem de suportar as cargas estáticas e dinâmicas relativas ao eixo traseiro, tais como recepção de saltos, impacto devido a irregularidades do piso, aceleração, travagem, torção em curva. |

Tabela 5 – Características e problemas do braço oscilante da AJP PR4

Para o desenvolvimento do novo braço foram determinadas várias características, de forma a cumprir vários objectivos delineados. Na tabela 6 resumem-se os objectivos traçados pela AJP para esta tarefa.

| Característica                                                                                                                      | Objectivos                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distância entre o eixo da biela e eixo traseiro inferior ao da PR4. Manter a distância entre o eixo de fixação no quadro e a biela. | Utilizar as mesmas bielas da suspensão traseira da PR4.<br>Utilizar o mesmo <i>gabari</i> de maquinação e as mesmas ferramentas do braço da PR4, com pequenas alterações.                                                      |
| Utilização da mesma liga do braço da PR4                                                                                            | Como a liga do braço da PR4 estava testada, pretendia-se aproveitar o conhecimento já existente, tanto ao nível da fundição como da maquinação.<br>Permitir economia de escala, ao usar a mesma liga em duas peças diferentes. |
| Espessura da parede mais uniforme                                                                                                   | No braço da PR4 havia secções com muito material. No braço da PR3 pretendeu-se reduzir o material dessas secções, para que a espessura das paredes fosse mais uniforme, para facilitar a fundição e reduzir peso               |
| Inclusão de nervuras na zona interior do braço                                                                                      | Aumentar a rigidez do braço. Reduzir espessura das paredes e peso.                                                                                                                                                             |

Tabela 6 – Características e objectivos do braço oscilante da AJP PR3

Para além de cumprir com os objectivos traçados, era também pretendida uma redução do peso do braço após maquinação de cerca de 15% quando comparado com o braço do modelo PR4. Como este último pesava 4,400 kg, o objectivo proposto para o braço da PR3 era de cerca de 3,740 kg.

O desenvolvimento do braço da PR3 começou ao mesmo tempo que o das traves. Não sofreu tantas iterações como a trave porque era assumido que a sua forma não seria muito diferente do braço do modelo anterior, tendo apenas comprimento total inferior e alguns

pormenores diferentes. Ao nível das dimensões pode-se ver na figura 126 as principais diferenças:

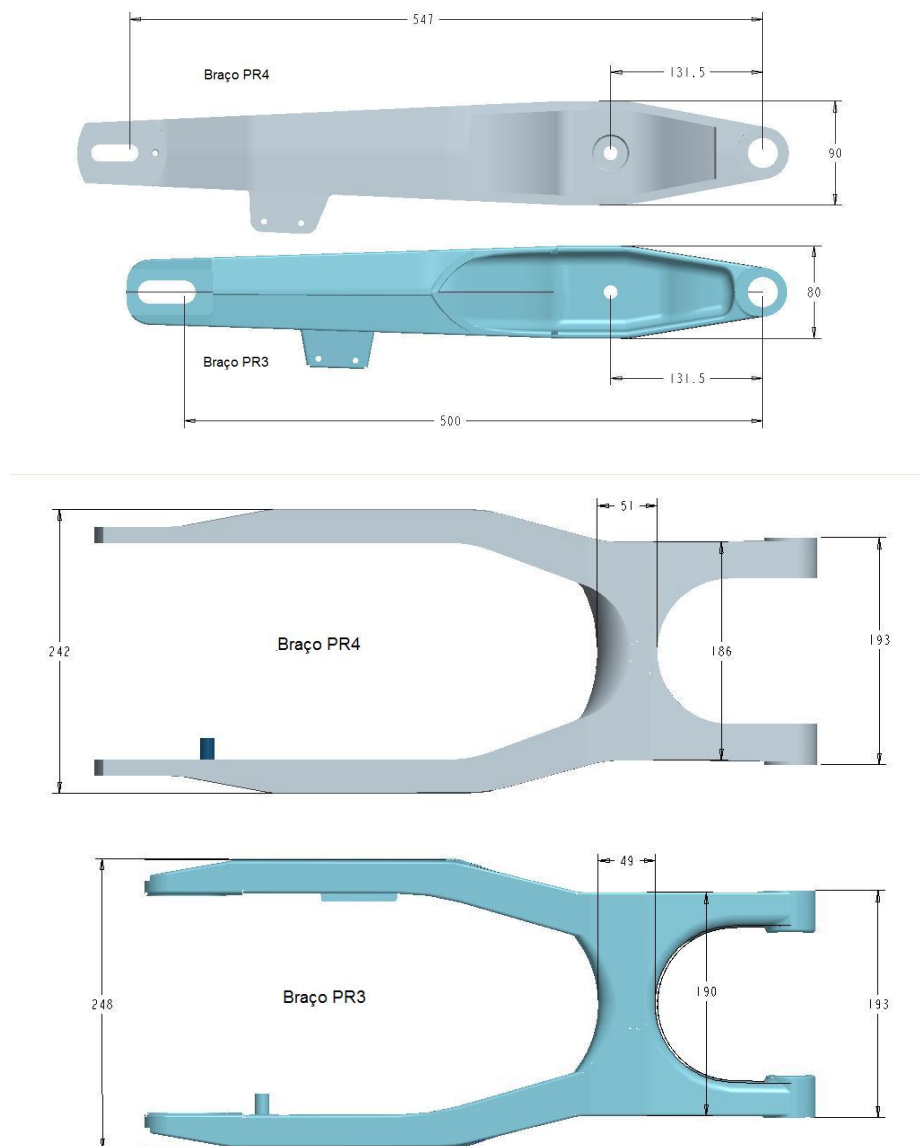


Fig. 127 - Comparação das principais dimensões e geometria dos braços dos modelos PR3 e PR4

#### 6.2.4. Progressividade da suspensão traseira

Foi também previamente decidido que o esquema da suspensão traseira a usar seria um sistema progressivo, tal como na anterior PR4. As características do sistema eram inclusive iguais às da PR4, uma vez que a distância do ponto de rotação ao ponto de fixação da biela do braço era igual e as bielas a usar transitavam da PR4. Dadas as dimensões do braço, bielas e posição de fixação do amortecedor e biela do braço, a variação do curso da roda com o curso do amortecedor era a que se mostra na figura 128.

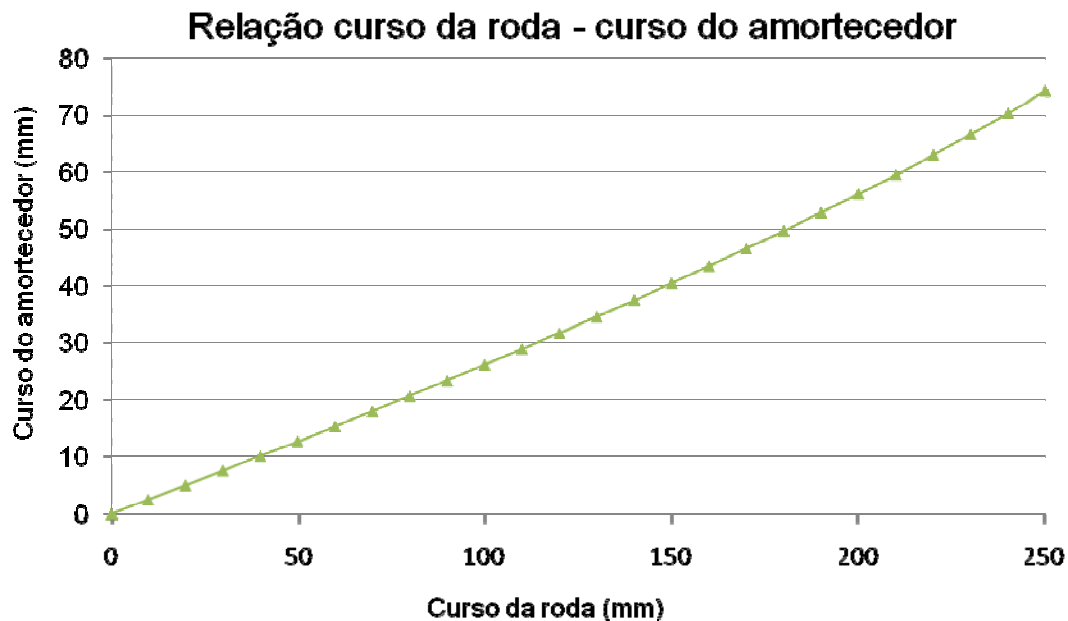


Fig. 128 – Relação curso da roda/Curso do amortecedor

Para a obtenção de um protótipo do braço oscilante, realizou-se um molde para a fundição em areia. Não se recorreu à prototipagem rápida devido ao elevado custo da realização de um molde com estas dimensões. Apesar de ser necessário projectar os vários moldes para fundir o braço, comprar placas de resina, prepará-las e maquiná-las, processo que demora algum tempo e exige algum investimento, optou-se por esta solução, figuras 129 e 130. De referir que devido à geometria do braço, não era possível realizar uma moldação manual como no caso da trave, porque existem secções que requerem a realização de machos.

Desta forma, e após algumas discussões foi possível fundir braços segundo o processo normal de produção na Firmago, peças que são depois maquinadas na AJP.

Para poder fundir o novo braço foram realizados os seguintes moldes:

- Moldação superior;
- Moldação inferior;
- Molde macho lateral exterior;
- Molde macho lateral interior travão;
- Molde macho lateral interior corrente.

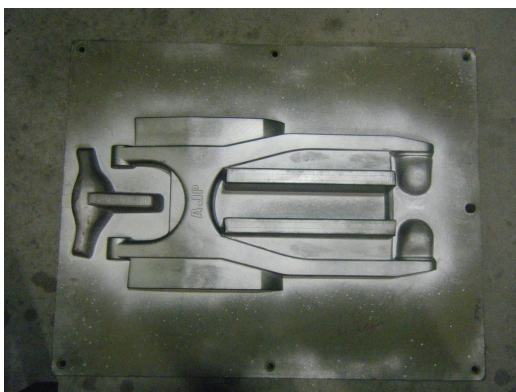


Fig. 129 - Moldação superior molde braços da PR3



Fig. 130 – Moldes dos machos molde braços da PR3

#### 6.2.5. Simulação numérica do braço

Para a simulação do braço foi gerada uma malha de elementos finitos no programa ANSYS®. A malha gerada que se pode observar na figura 131 possui 45344 elementos idênticos aos utilizados na simulação da trave que integram 84264 nós.

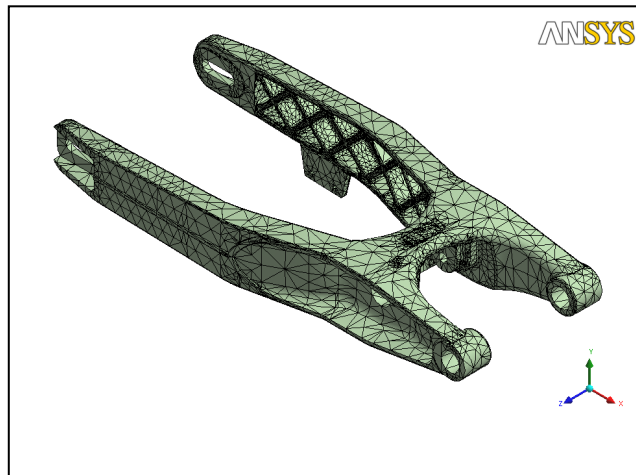


Fig. 131 – Malha utilizada na modelação do braço

A condição de carga escolhida foi apenas a recepção de um salto pela moto, isto é, de acordo com o anteriormente apresentado, uma massa de 700 kg. A carga é considerada no eixo traseiro. Para a simulação por elementos finitos do braço oscilante, foram consideradas as condições fronteira correspondentes à geometria que se mostra na figura 132. Nesta configuração admite-se um ângulo entre a direcção perpendicular ao eixo do braço e o eixo do amortecedor de 25°. A carga aplicada no amortecedor vem majorada relativamente à aplicada na roda a considerar um menor braço.

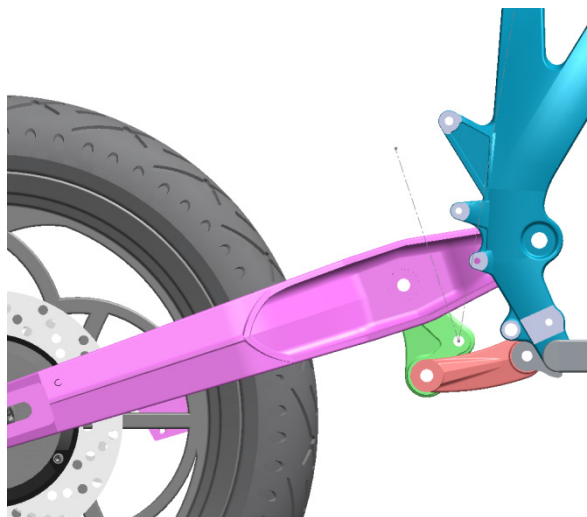


Fig. 132 - Posição da suspensão simulada numericamente

A carga no eixo traseiro considerada foi a equivalente ao peso da moto ser totalmente suportado por este eixo, situação que pode ocorrer na realidade. Nem sempre a recepção é realizada em ambos os eixos e considerando a carga total apenas no eixo traseiro opta-se por uma maior segurança.



A carga usada no cálculo foi de 27 kN aplicada no eixo de ancoragem das bielas no braço. A articulação principal ligada ao quadro foi libertada apenas na rotação enquanto na extremidade correspondente à roda apenas se impediram os movimentos segundo a direcção Y, ver figura 131.

O material usado nesta simulação foi o mesmo utilizado na trave, isto é, a liga AlSi7Mg0.3.

Os resultados obtidos no ANSYS® segundo as condições determinadas deram como a zona mais crítica ao nível de tensões resultantes de Von Mises a secção onde é feita a ligação entre o braço e a biela que integra o mecanismo de transferência de carga do conjunto mola amortecedor, figura 134. A tensão mais elevada é ainda inferior à tensão limite elástica do alumínio e surge apenas numa pequena região junto ao eixo.

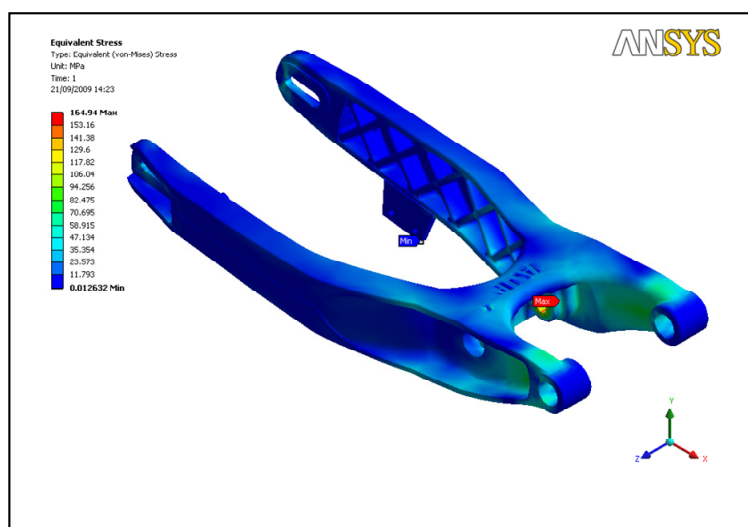


Fig. 133 - Tensões de Von Mises obtidas na simulação do braço.

Os valores de tensão máximos rondam os 165 MPa, para uma majoração de carga de 4 e utilizando a geometria mais desfavorável para a suspensão.

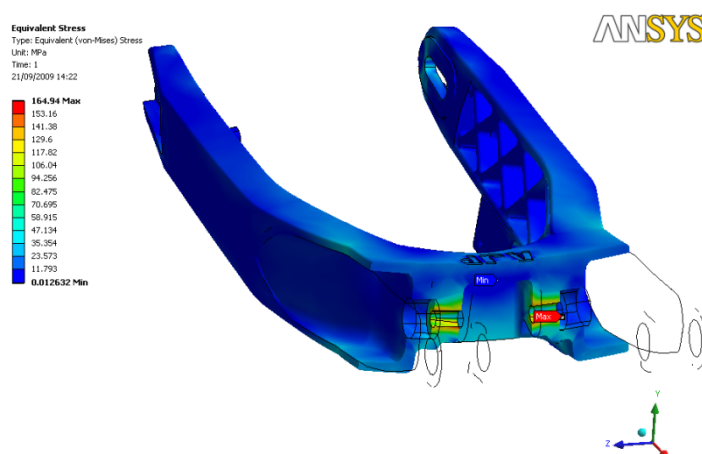


Fig. 134 - Corte na distribuição dimensional das tensões para mostrar a região mais solicitada.

### 6.3. Ensaios experimentais

Com base nos dados da simulação numérica por elementos finitos, foram determinados os pontos críticos. Tendo em atenção as distribuições de tensão esperadas e a dimensão dos extensómetros foram seleccionados os pontos a instrumentar e calculados os factores multiplicativos para a tensão medida para obter a tensão no ponto crítico.

Numa primeira fase em que se procurava validar os modelos numéricos foi idealizada uma estrutura que pudesse simular a carga aplicada na estrutura da moto. Utilizando cargas estáticas e extensómetros situados nos pontos seleccionados, foi possível determinar a tensão resultante no quadro e nas traves e estimar os valores máximos esperados.

A estrutura utilizada proveniente da linha de produção do modelo PR4 serviu para comparar o comportamento de um quadro conhecido, como era o quadro da PR4, com o novo quadro desenvolvido para a PR3, modelo que se pretendia validar. A estrutura de suporte foi dimensionada de forma a aceitar a montagem dos dois modelos indistintamente ou eventualmente de outros de maiores ou menores dimensões.

Procurou-se com esta estrutura a possibilidade de poder simular da forma mais aproximada possível o comportamento real da moto em carga.

Para tal decidiu-se fixar o eixo traseiro na estrutura, sem movimento no sentido vertical, mas com possibilidade de rotação, para não introduzir falsos esforços de flexão no quadro.

Em relação ao eixo dianteiro, foi decidido substituir a forqueta da suspensão dianteira, por um tubo em aço que quando sujeito a carga sofresse uma deformação com um valor tão baixo, que pudesse ser considerada desprezável, quando comparada com o deslocamento sofrido pela moto.

De igual forma, para não introduzir momento flector devido à fixação do eixo dianteiro foi decidido aplicar um rolamento no eixo dianteiro, em substituição da roda dianteira, o qual deslizaria numa calha reproduzindo o movimento do veículo com pneu. A roda dianteira foi suprimida para que o efeito de amortecimento do pneu não distorcesse os resultados.

Os pontos que se definiram para a colocação dos extensómetros no chassis do modelo PR4 foram os que se mostram na figura 135. O quadro foi instrumentado da seguinte forma:

- Ponto 1 – Zona superior do braço oscilante. Roseta a 45° do fabricante HBM com a seguinte referência 1-RY83-6/350 para alumínio que se mostra na figura 137;
- Ponto 2 – Zona inferior do tubo superior do quadro. Extensómetro linear com a referência HBM 6/350LY41 para aço;
- Ponto 3 – No tubo do berço soldado à coluna de direcção, o mais próximo possível da coluna. Extensómetro linear idêntico ao anteriormente referido.

Deve referir-se que a montagem das rosetas com as dimensões das utilizadas exige que seja seleccionada uma região onde as deformações sejam mais ou menos uniformes ao longo de uma região com uma dimensão ligeiramente maior do que a da roseta. Este facto condicionou fortemente a colocação das rosetas.

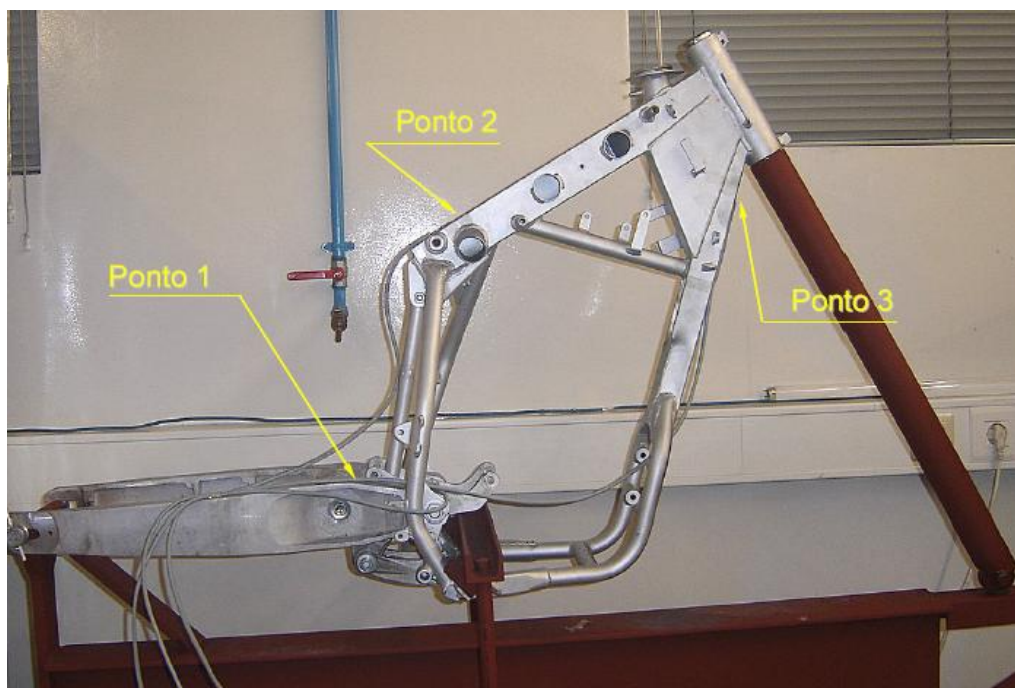


Fig. 135 – Estrutura para testes laboratoriais. Pontos de colocação de extensómetros

Na simulação realizada com o quadro do modelo PR4, a carga foi colocada nos poisa pés de forma a simular o peso do piloto quando se encontra de pé na recepção de um salto. Na figura 136 mostram-se os pontos de aplicação das cargas correspondentes aos apoios do piloto.

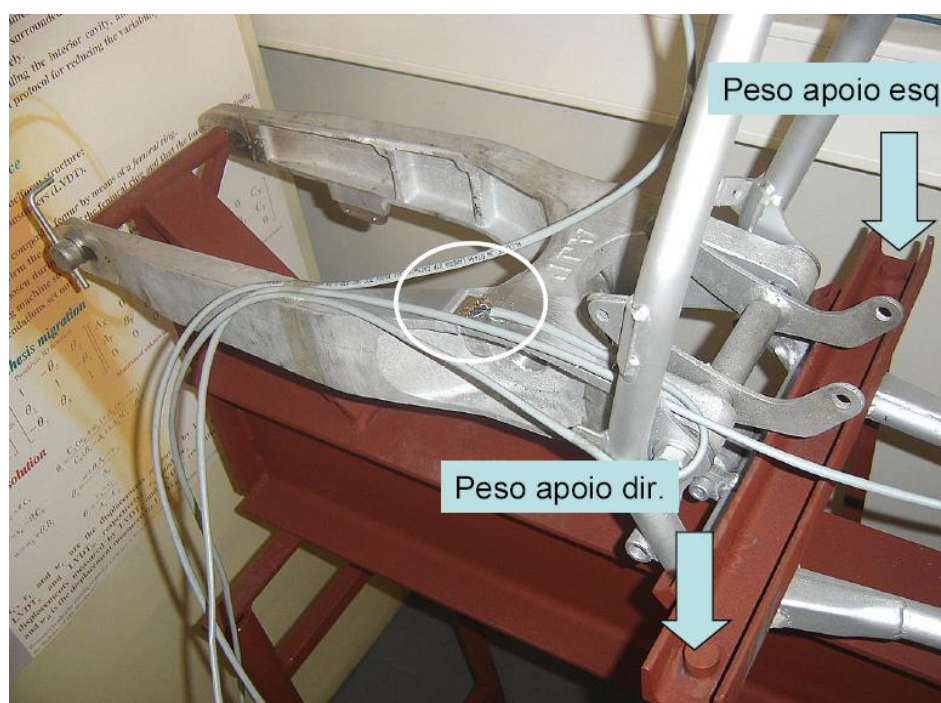


Fig. 136 – Pontos de carga no quadro da PR4

Para testar o quadro da PR4 foi aplicado o peso de uma pessoa, que ora se apoiou em ambos os apoios equitativamente, ou se apoiou alternadamente em cada apoio, de forma a obter a resposta do sistema para um carregamento assimétrico.

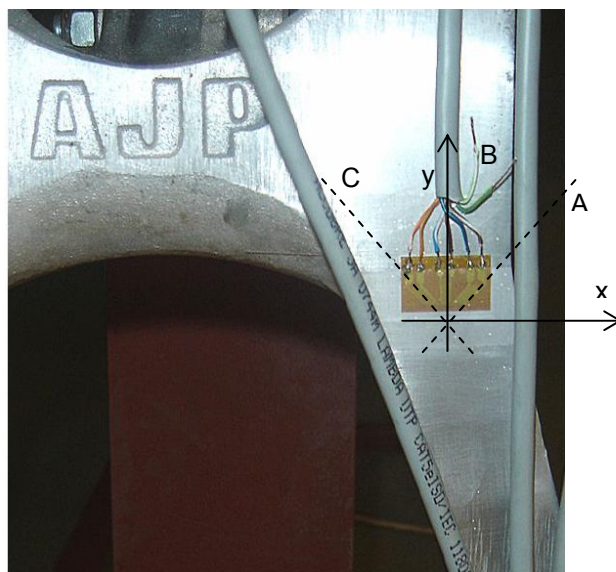


Fig. 137 – Roseta a 45° no braço e indicação do referencial utilizado

A determinação da deformação a partir das medições com extensómetros para o referencial que se indica na figura é dada pelas seguintes expressões, correspondentes ao estado plano de tensão [55] [56]:

$$\begin{aligned} \theta_A &= 45^\circ & \theta_B &= 90^\circ & \theta_C &= 135^\circ \\ \epsilon_{xx} &= \epsilon_A - \epsilon_B + \epsilon_C & \epsilon_{yy} &= \epsilon_B & \gamma_{xy} &= \epsilon_A - \epsilon_C \end{aligned} \quad (5)$$

Após a obtenção do estado de deformação é possível calcular as tensões instaladas recorrendo a lei de Hooke e ao conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais em estudo. Desta forma foram obtidos os valores que se mostram nos gráficos que se seguem.

### 6.3.1. Ensaio estático em laboratório

O gráfico que se mostra na figura 138 foi obtido a partir das medições realizadas num ponto do braço em alumínio para um carregamento correspondente a suportar o peso de um elemento com 80 kg de massa que alternadamente colocava o seu peso no poisa pés esquerdo e direito. Verificou-se que o apoio no pé esquerdo conduzia a deformações mais elevadas.

Para a recolha de dados foi utilizado um sistema de aquisição fabricado pela empresa HBM. Este sistema modular permite adquirir até 8 canais por módulo e pode ser complementado por associação de vários módulos, até um máximo de 8. A referência do modelo utilizado é *Spider 8* e pode ser operado através da porta paralelo de um PC utilizando o software HBM-Catman.

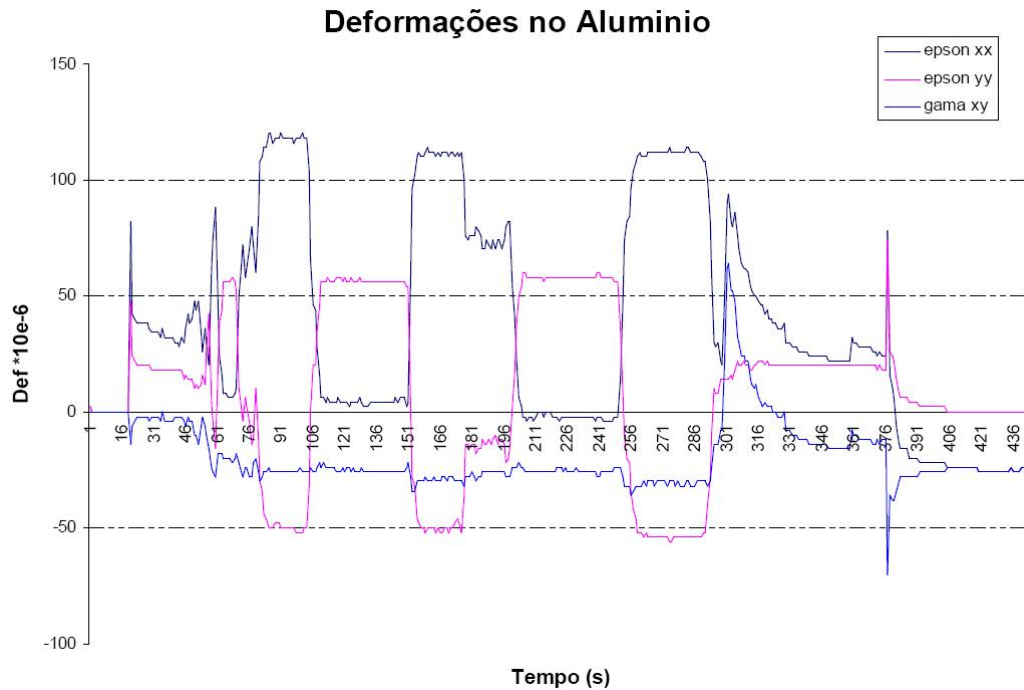


Fig. 138 – Deformações no braço, ponto 1 para cargas alternadas do lado direito/esquerdo.

A partir dos valores das deformações no braço, pode obter-se o valor das tensões através da lei de Hooke que conduz às seguintes expressões

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{1+\nu} \epsilon_{xx} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{1+\nu} \epsilon_{yy} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy}$$

Pelo gráfico da tensão nas três componentes, figura 139, verifica-se que o valor de  $\sigma_{xx}$  atinge o valor máximo de cerca de 8 MPa, quando todo o peso é apoiado no apoio esquerdo. Quando o peso está distribuído uniformemente, o valor de  $\sigma_{yy}$  é mais elevado, atingindo cerca de 4 MPa. O valor de  $\tau_{xy}$  é sempre baixo, atingindo um pico aos 300 segundos, quando o elemento utilizado para carregar a estrutura deu alguns impulsos no sentido vertical.



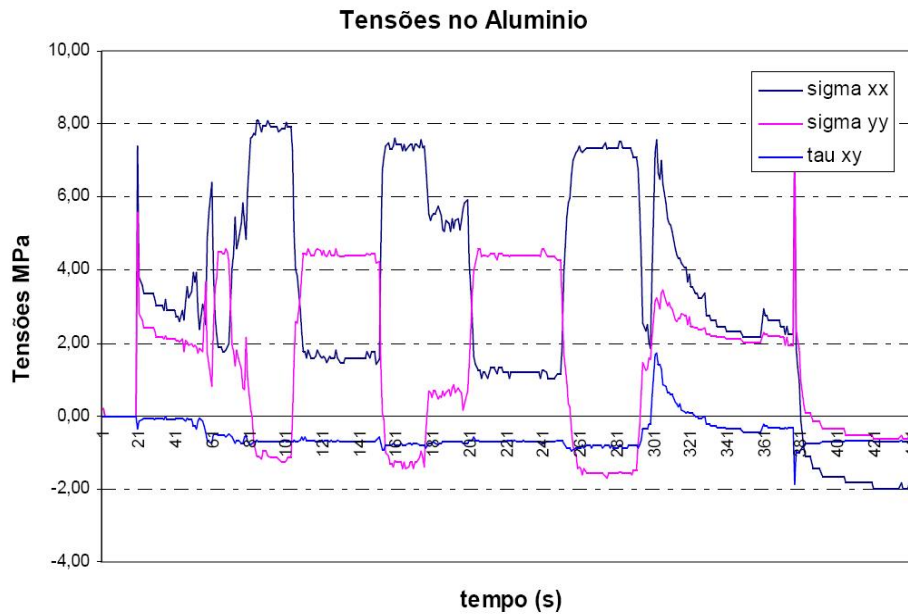


Fig. 139 – Tensões no braço instaladas no braço, ponto 1, obtidas a partir das medições representadas na figura anterior

Com os valores de  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\tau_{xy}$ , é possível determinar o valor da tensão resultante. No presente caso e dado que se trata de materiais que evidenciam alguma ductilidade, irá ser determinado o valor da tensão de von Mises, este pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx})^2 + 6\tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

No gráfico da figura 140 estão representados os valores da tensão de Von Mises Obtidos para as medições que se mostram nas figuras anteriores, 138 e 139.

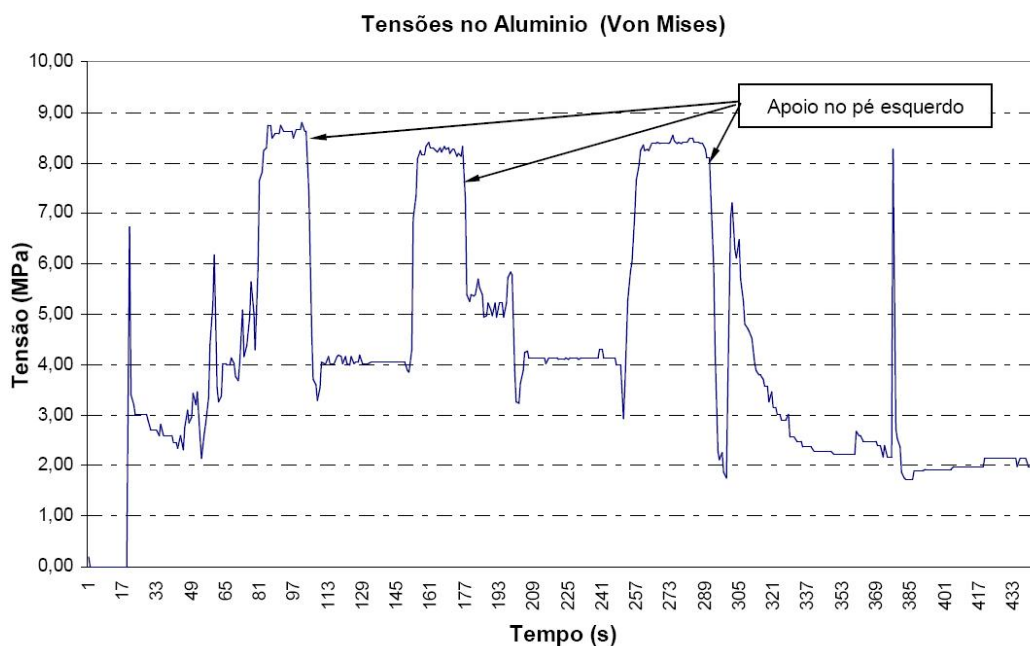


Fig. 140 – Tensão resultante de Von Mises no braço, ponto 1

Os valores máximos da tensão segundo o critério de von Mises não ultrapassam os 9 MPa, para a carga aplicada.

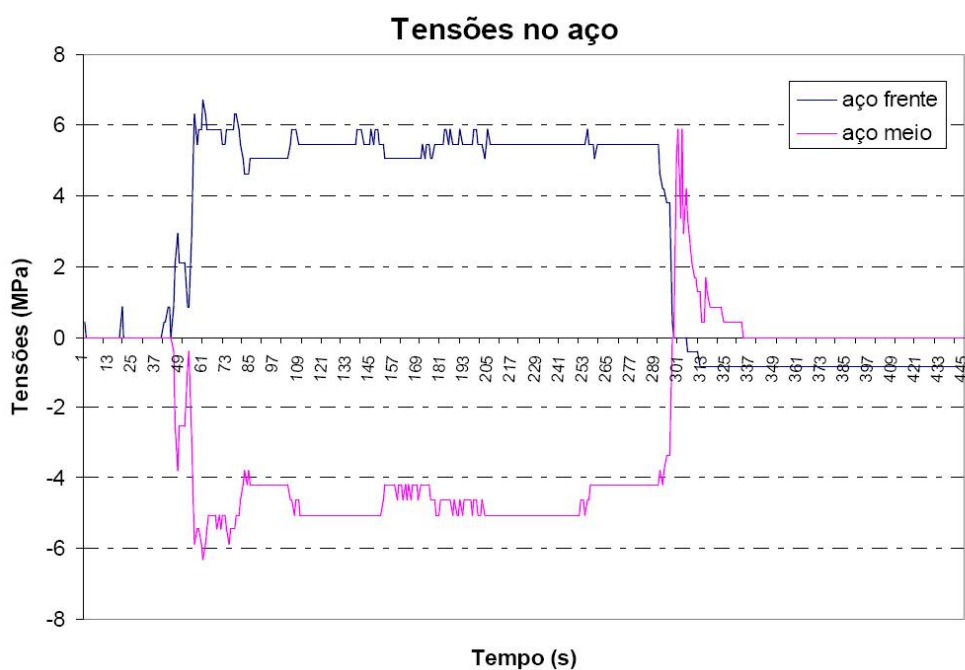


Fig. 141 – Tensões medidas no quadro, pontos 2 e 3

No quadro da PR4, todo construído em aço, foram colocados extensômetros lineares, uma vez que face à carga aplicada, se esperariam fundamentalmente esforços de flexão. Os valores máximos obtidos não ultrapassam os 6 MPa, admitindo que as tensões nas peças tubulares são uniaxiais pois caso contrário seria necessário o recurso a rosetas. De salientar que com a carga aplicada, existe compressão no ponto 2 e extensão no ponto 3. Estes

resultados correspondem ao comportamento esperado, uma vez que o quadro para esta carga, está sujeito a esforços de flexão, figura 141.

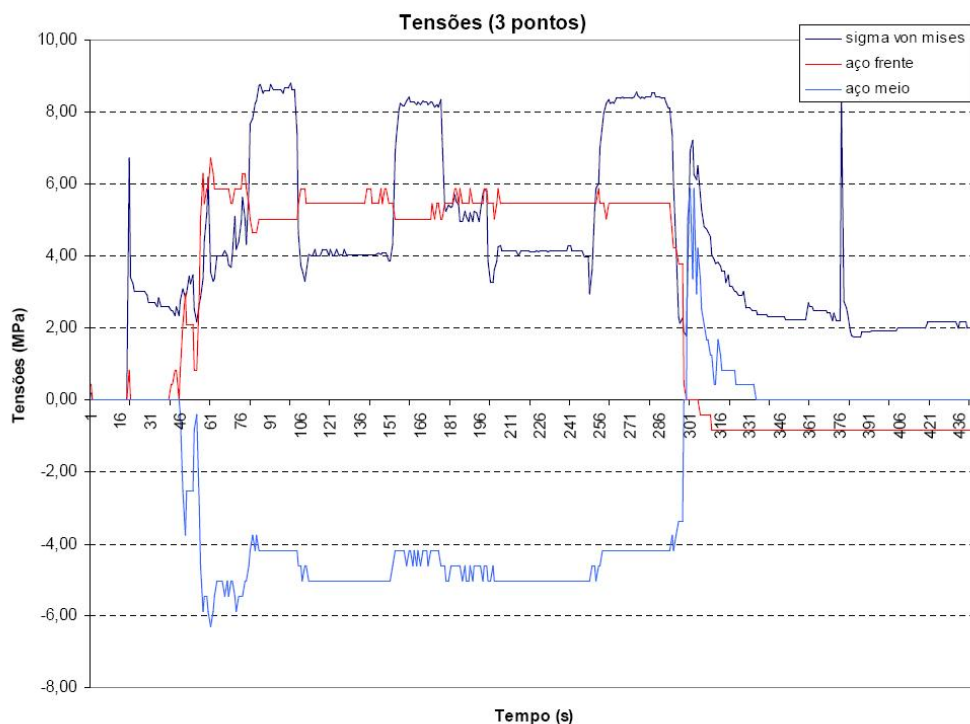


Fig. 142 – Comparação das tensões obtidas nos três pontos 1, 2 e 3

Ao comparar os valores da tensão resultante nos três pontos de aplicação dos extensómetros, figura 142, verifica-se que é no braço que se atinge o valor máximo. No entanto, a colocação dos extensómetros no quadro em aço poderá não ter coincidido com os pontos de maior tensão. Para o braço foi calculado, a partir dos cálculos numéricos realizados, o factor de multiplicação que permite obter a tensão no ponto crítico utilizando os valores medidos no ponto instrumentado. Foi obtido um factor aproximadamente igual a 7 o que conduz a um valor de 63 MPa no ponto crítico.

#### 6.4. Testes em pista

Em função dos resultados obtidos na simulação por elementos finitos e nos testes em laboratório, foi planeado um programa de teste em pista, de forma a poder validar os resultados obtidos.

Estes testes foram planeados para ser realizados numa pista de motocross pelas seguintes razões:

- Apesar do modelo PR3 ser uma moto destinada à prática do Enduro, achou-se conveniente testar o modelo a um nível de exigência superior e sendo assim, realizar o teste numa pista de motocross. A pista onde os testes se realizaram situa-se próximo das instalações da AJP, na Lustosa, em Lousada. Esta pista é usada em provas oficiais do campeonato nacional de motocross;
- Facilidade de acesso, dado que num percurso de Enduro, o acesso pode não ser fácil;

- Permitir o uso de um sistema de telemetria para envio e recepção de dados em tempo real. Este sistema opera a frequências elevadas, 2.4GHz, e exige que o veículo esteja sempre em linha de vista;

A moto utilizada no teste foi o primeiro modelo PR3 de série que foi montada na AJP, na versão MX PRO, que só pode circular fora da via pública. Esta versão caracteriza-se pela montagem de suspensões de maior curso e com várias regulações, sendo a mais adaptada à utilização em pista.

#### 6.4.1. Preparação da moto

A PR3 MX PRO foi transportada para as instalações do LOME na FEUP, onde foi preparada para receber a colagem dos extensómetros.

Os extensómetros, idênticos aos utilizados nos ensaios laboratoriais, foram colados no braço oscilante e no quadro. Depois de testados e calibrados com os sistemas de aquisição de dados convencionais foram ligados a um sistema de aquisição e envio de dados por telemetria que foi adquirido para estes testes. Trata-se de um sistema produzido pela empresa *MicroStrain*, figuras 143 e 144 com as seguintes características:

- Modelo – V-Link da *Microstrain*, figuras 131 e 132
- Velocidade de transferência de dados: até 4 KHz
- Frequência de 2.4GHz
- Precisão: 1 bit – 0.024%
- Alcance do sistema: 70 m, até 300 m com antenas de ganho
- Número de canais disponíveis: até 8 canais, 4 completamente diferenciais, com 350 Ohm de resistência, 3 entradas simples (0-3 V) e sensor de temperatura interna



Fig. 143 – Equipamento de aquisição e transmissão de dados



Fig. 144 – Equipamento de recepção de dados

As características do sistema de telemetria seleccionado seriam, em princípio suficientes, para a recolha de dados na pista. A principal limitação do sistema consiste essencialmente no nº de canais pois a aquisição de um só nodo não permite mais do que 4 canais de medição, isto é, uma roseta de 3 extensómetros. No entanto, o sistema pode ser estendido com a aquisição de mais nodos que podem ser ligados em série.

As primeiras medições foram realizadas num itinerário traçado no campus da FEUP. Utilizando como carga apenas o peso do condutor foram realizados alguns percursos que incluíam pequenos obstáculos como os saltos para subida e descida do passeio. Na figura 145 mostra-se o sistema de aquisição de dados tal como foi utilizado nas primeiras medições.



Fig. 145 – PR3 equipada com o sistema de telemetria.

A calibração do sistema de telemetria foi realizada comparando os sinais medidos pelo sistema com os valores registados com uma ponte de extensometria devidamente calibrada. A utilização da mesma carga e do correcto factor de sonda do extensómetro permitiu determinar uma correspondência entre a diferença de tensão registada e as deformações mecânicas a que correspondiam. Foi utilizado um sistema produzido pela empresa Vishay Measurements Group comercializado sob a referência P-3500 Strain Gage Readout Unit. Na figura 146 mostra-se uma fotografia do computador e do sistema de aquisição durante a fase de ajuste do sistema.



Fig. 146 – O sistema de telemetria durante a fase de ajuste

#### 6.4.2 Primeiro teste em pista

Para a realização dos primeiros testes em pista uma equipa do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental da FEUP/INEGI e uma equipa da AJP deslocaram-se para a pista de MotoCross seleccionada. Para conduzir a moto foi escolhido um dos pilotos de teste da empresa AJP, tratou-se do Sr. Bráulio Magalhães, piloto com larga experiência na utilização



deste modelo em competição. Foi inicialmente realizada uma verificação estática do sistema, tendo-se testado o funcionamento dos extensómetros, o envio e a recepção dos dados com a moto parada, figuras 147 e 148.



Fig. 147 – Sistema de telemetria aplicado na traseira



Fig. 148 – Moto preparada para os testes de pista

De seguida foi pedido ao piloto para que realizasse duas voltas de aquecimento à pista, tendo-se verificado que a partir de uma certa parte da pista se perdia o sinal, devido a perder-se o contacto visual com a moto. A colocação do computador portátil num ponto mais elevado e próximo do meio do percurso melhorou bastante a recepção dos dados. Deve referir-se que o equipamento utilizado se revelou muito robusto com retoma imediata da transmissão sempre que o veículo retomava a visibilidade pela antena instalada no computador.

Foi decidido fazer apenas a zona da pista próxima da linha de meta, constituído por duas curvas e duas rectas, num formato quase oval.

O ritmo a impor deveria ser incremental, ou seja, só após 4 ou cinco voltas o ritmo deveria ser a fundo.

No entanto, no início da terceira volta ocorreu um problema que impediu a suspensão traseira de funcionar. Verificou-se que houve uma rotura na biela do braço, figura 149, o que implicou que a roda traseira ficasse em contacto com o guarda-lamas traseiro, impedindo a utilização da moto. Na figura 150 pode observar-se o estado em que ficou a moto após a rotura da biela da suspensão.

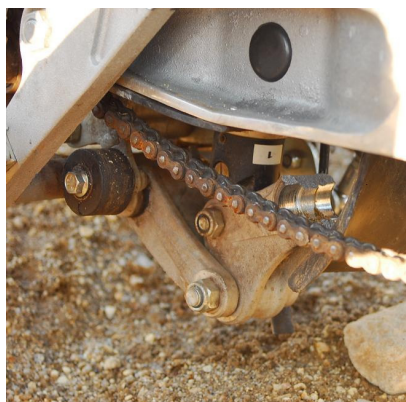


Fig. 149 – Parte inferior do quadro mostrando a rotura da biela do braço



Fig. 150 – Aspecto da moto após rotura da biela do braço

Analisando a superfície de rotura da biela do braço, constatou-se uma fissura já existente neste componente. A existência da fissura prévia neste componente era evidente pelo facto de uma parte significativa da superfície de rotura evidenciar uma cor mais escura, indicativa da sua propagação. Nas figuras 151 e 152 pode ver-se como a biela já se encontrava debilitada pelo que a sua rotura final se deveu ao sobre esforço resultante dos saltos realizados na pista e não a nenhuma debilidade de projecto.



Fig. 151 – Superfícies de rotura



Fig. 152 - Rotura da biela do braço

No que respeita à utilização do sistema de telemetria foi possível recolher dados que após tratamento, permitiram visualizar as deformações, figura 153, e tensões, figura 154, nos pontos de medição. Verificou-se que durante o ensaio os valores das tensões eram baixos, mas que não eram conclusivos quanto à validação dos componentes, uma vez que o ritmo imposto não tinha sido ainda muito intenso.

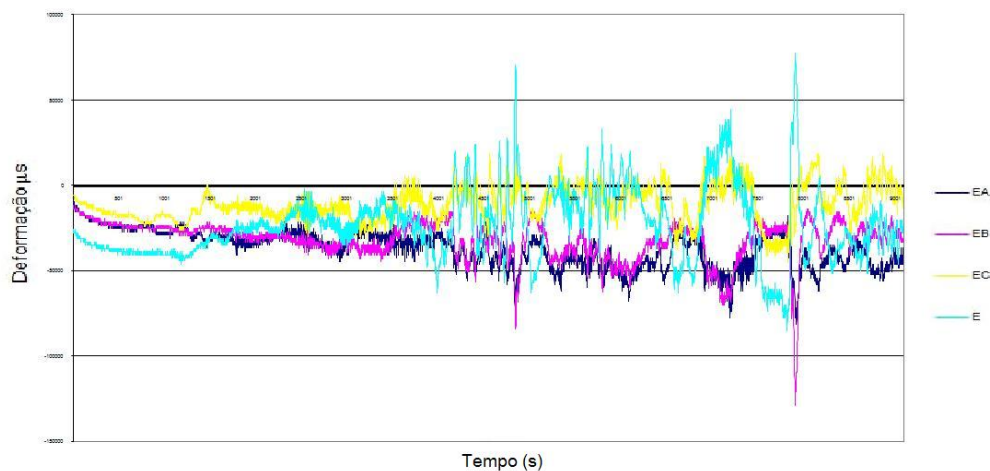


Fig. 154 – Deformações medidas durante o 1º teste

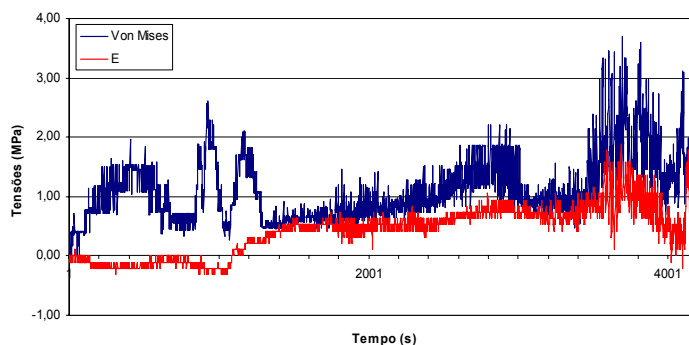


Fig. 154 – Tensões medidas no 1º teste

Após esta avaria a moto foi carregada no seu veículo de transporte e enviada para as instalações da AJP para reparação. Uma análise posterior à peça avariada veio provar que a sua ruína não resultou de uma debilidade de projecto mas de uma longa utilização com cargas elevadas devidas a utilização deste modelo.

#### 6.4.3. Segundo teste em pista

Após a reparação da moto, com substituição do componente avariado foi decidido realizar novo teste.

As condições do teste eram as mesmas do primeiro teste, tendo-se mantido também o piloto e a estratégia de ensaio.

Após a verificação do sistema, procedeu-se a um aquecimento de várias voltas ao traçado escolhido para o primeiro teste.

Quando foi solicitado ao piloto um ritmo mais vivo, este começou a sentir dificuldades na travagem no início das curvas e quando parou a seguir constatou-se que as traves em alumínio tinham sofrido rotura em dois pontos. Esta rotura ocorreu de forma aproximadamente idêntica em ambas as traves, como se mostra nas figuras 155 e 156.

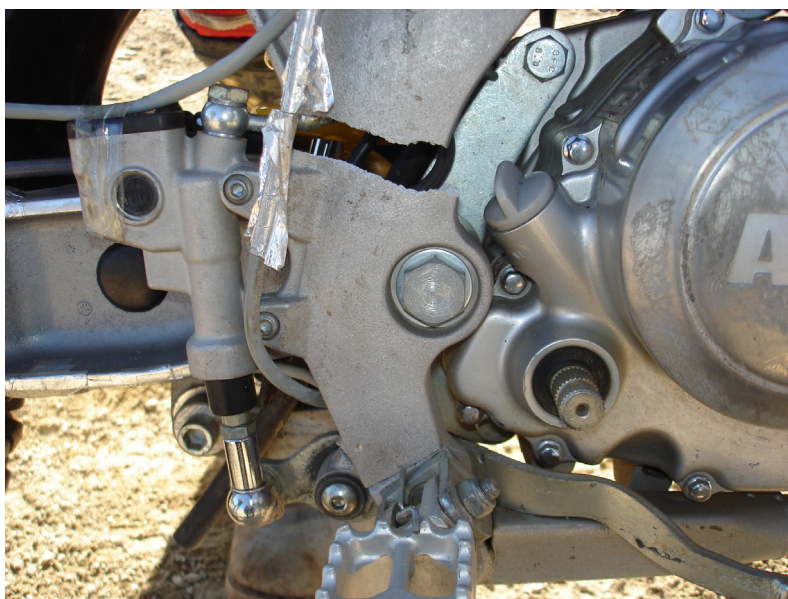


Fig. 155 – Rotura na trave do lado direito





Fig. 156 – Rotura na trave do lado esquerdo

Não foi possível perceber qual das roturas aconteceu em primeiro lugar, se a rotura ao nível do poisa pés ou se por cima do ponto de fixação do braço no quadro. Pelos resultados da simulação numérica previra-se que um ponto crítico seria precisamente por cima da fixação do braço.

Por se apresentarem rugosas as superfícies de rotura mostram que ocorreu uma fractura do tipo frágil, sem a manifestação da ductilidade própria do material.

Não houve nenhum registo de dados da telemetria, porque apenas se iria recolher dados quando o piloto pudesse imprimir um ritmo elevado. Como a rotura das traves ocorreu antes do piloto poder levar a moto ao máximo, este teste ficou sem informação relativa às deformações ocorridas nos extensómetros. No entanto, deste teste resultou uma avaria não prevista que revelava uma debilidade de um dos principais componentes em avaliação.

#### 6.4. Terceiro teste em pista

Como no teste anterior se verificou que os extensómetros não estavam posicionados no ponto crítico das traves, decidiu-se realizar um novo teste, para o qual se iria colar uma roseta na trave, próximo na zona de rotura, como se mostra na figura 157 e outra roseta, na zona de fixação superior do amortecedor, figura 158, embora, neste caso, só estivesse prevista a utilização do extensómetro colocado segundo a direcção vertical.

O extensómetro do braço foi retirado, por se ter verificado que o braço era um componente menos crítico que a trave. Deve referir-se que esta ocorrência veio redireccionar a atenção do autor para este elemento. A trave apresentava algumas características ainda não testadas enquanto o braço reproduzia uma solução já habitual em modelos da AJP e sem qualquer história de avarias.

Numa primeira abordagem do problema pensou-se que esta avaria teria resultado de problemas de fundição das traves e não seria devida a qualquer problema mecânico. Contudo, o autor dedicou algum do seu tempo a investigar os motivos deste tipo de rotura, quer analisando a simulação numérica realizada, quer reavaliando as fixações da trave ao quadro e aos vários acessórios de que serve de suporte.



Fig. 157 - Colocação de roseta na trave direita



Fig. 158 - Colocação de roseta próximo da fixação superior do amortecedor

O teste foi realizado tendo-se seguido o mesmo protocolo que nos dois testes anteriores. Houve apenas a colocação extra de um GPS barométrico, que iria dar indicações acerca da velocidade instantânea e altitude instantânea.

Após o aquecimento de algumas voltas o piloto deu uma volta num ritmo mais elevado e ao iniciar a segunda volta neste ritmo o piloto apercebeu-se que algo tinha acontecido e parou. Após a paragem verificou-se que tinha ocorrido uma nova rotura na trave, desta vez num só ponto, acima da fixação do braço oscilante, figura 159.





Fig. 159 – Rotura na trave do lado direito

Através deste teste foi possível determinar exactamente a área em que a rotura ocorre pela primeira vez e começaram a ponderar-se várias razões para a ocorrência desta rotura:

- Incorrecto dimensionamento da trave na área de rotura;
- Liga incorrecta ou tratamento térmico incorrecto;
- Possível existência de porosidades que fragilizassem a trave na secção de rotura.

Uma vez que a simulação numérica já tinha previsto que o ponto mais crítico se encontrava naquela área, esta situação era inesperada porque os saltos impostos à moto estavam ainda abaixo do máximo possível e nem o próprio ritmo de condução era muito elevado, como se pode comprovar pelo registo da velocidade e altitude do GPS, que se reproduz na Figura 160.

Com efeito a velocidade máxima atingida não ultrapassou os 50 km/h e o desnível máximo após cada salto não passou além dos 2 m. Ou seja, as condições de teste a que a moto tinha estado sujeita estavam bastante longe de condições que se poderiam considerar extremas.

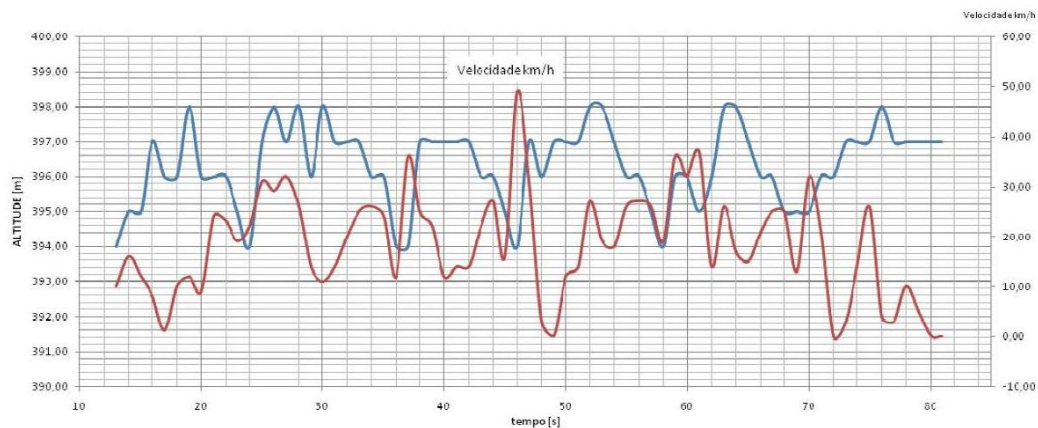


Figura 160 - Medições de velocidade e altitude com GPS

Como no teste anterior não se tinha procedido a nenhum registo, neste teste decidiu-se começar a guardar dados desde o aquecimento. As deformações então adquiridas podem ver-se na figura 161.

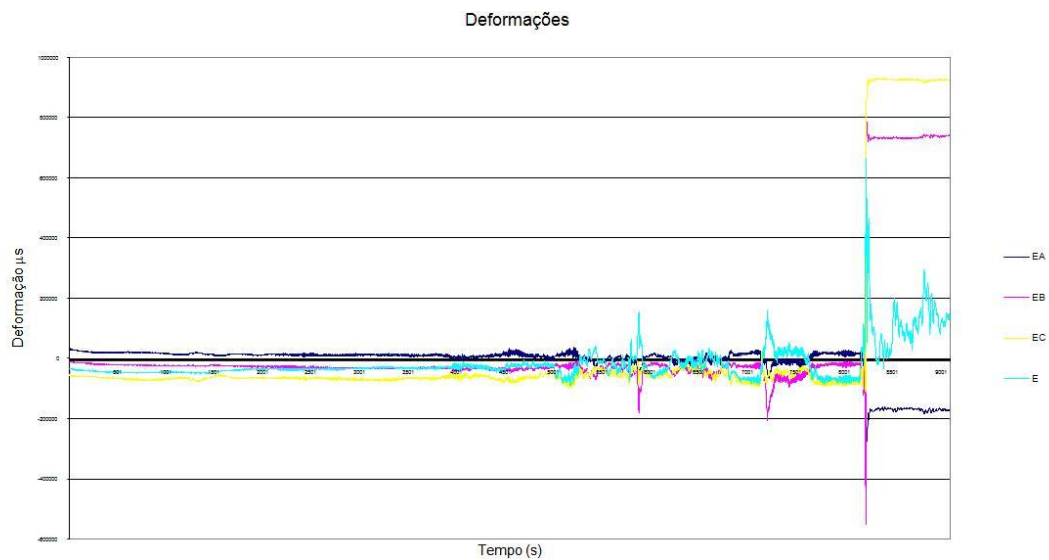


Fig. 161 – Deformações registadas ao longo do 3º teste

Utilizando as mesmas expressões (6) e (7), obtemos as tensões de Von Mises no ponto inferior e  $\sigma_{xx}$  no ponto superior da trave, figura 162.

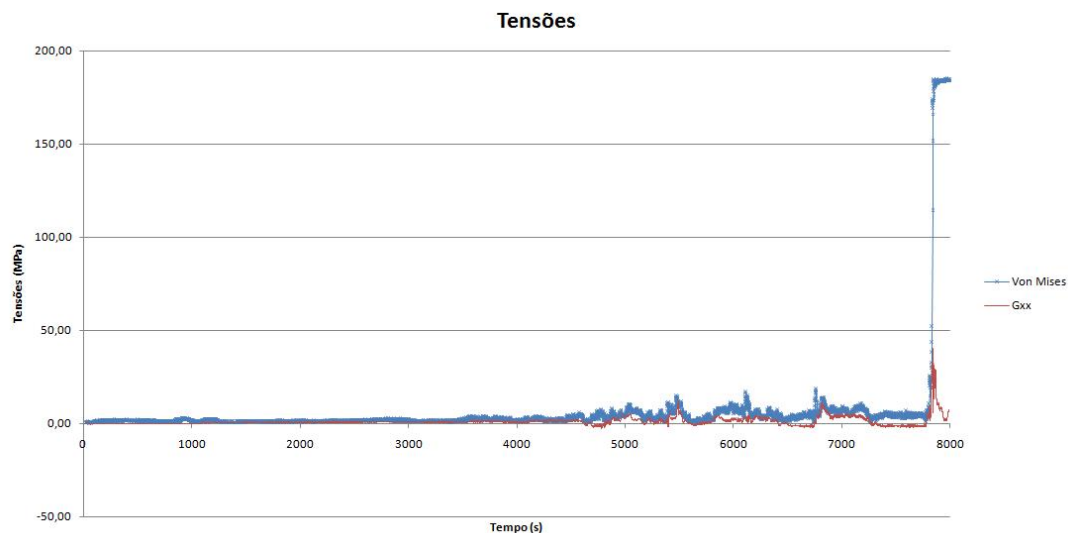


Fig. 162 – Tensões calculadas a partir dos valores recolhidos ao longo do 3º teste

Pela análise dos valores da tensão resultante de Von Mises na zona inferior da trave e no ponto superior é visível que até à ocorrência da rotura, os valores máximos da tensão não passavam dos 20 MPa, sendo que a tensão na zona inferior era tendencialmente superior ao do ponto superior.

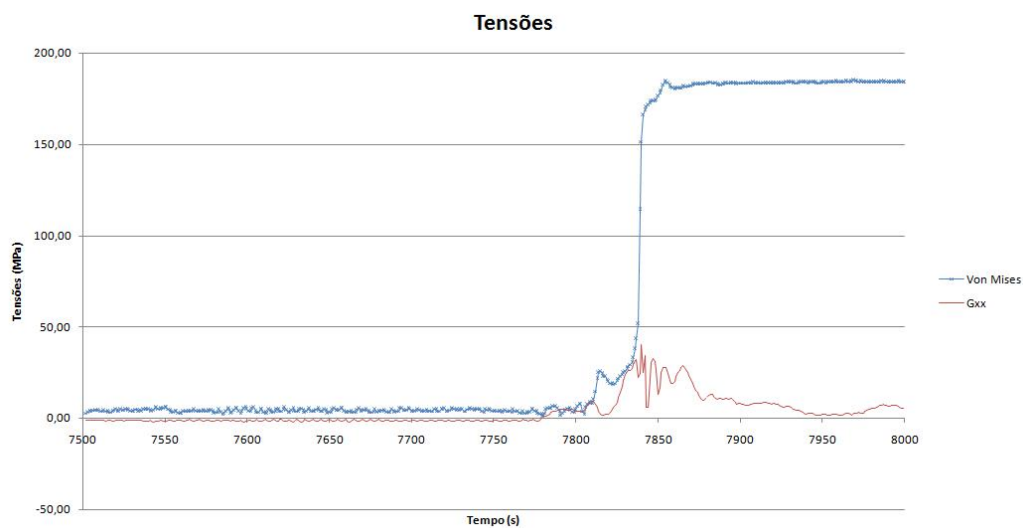


Fig. 163 – Tensões resultantes na fase de rotura

Como a ocorrência de uma segunda rotura da trave em moldes muito semelhantes à ocorrida no 2º ensaio de pista poderia revelar uma debilidade de projecto ainda não identificada foi decidido reapreciar os cálculos numéricos. Para isso a distribuição de tensões de Von Mises obtida no ANSYS® foi sobreposta numa fotografia da trave. Na figura 164 pode ver-se o resultado dessa sobreposição.

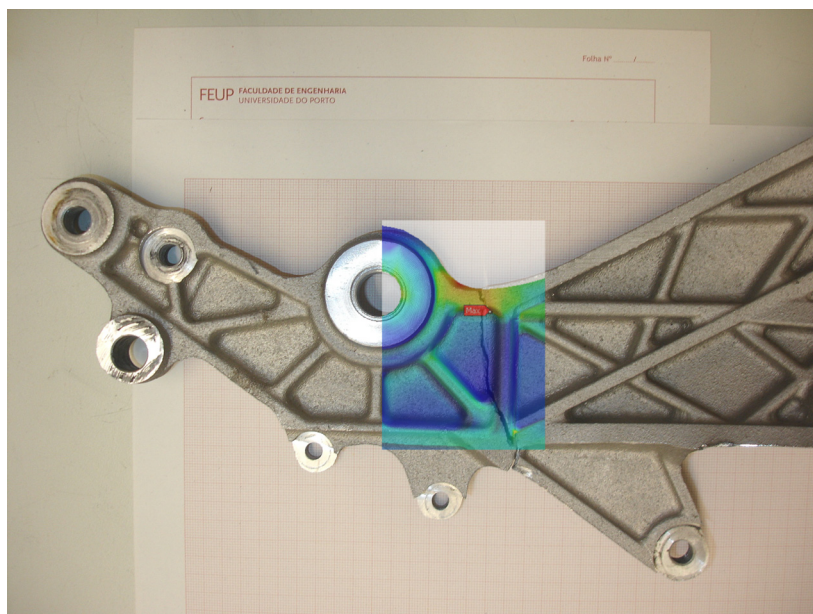


Fig. 164 - Sobreposição do campo de tensões de Von Mises calculado com o ANSYS com uma fotografia da trave partida.

Como se pode ver na figura a fenda de rotura encontra-se muito próxima do ponto crítico o que poderá indicar que esta se iniciou por sobrecarga localizada e depois se propagou ao longo da secção. Ao comparar a colocação do extensómetro com a malha de elementos finitos obteve-se a imagem que se mostra na figura 165.

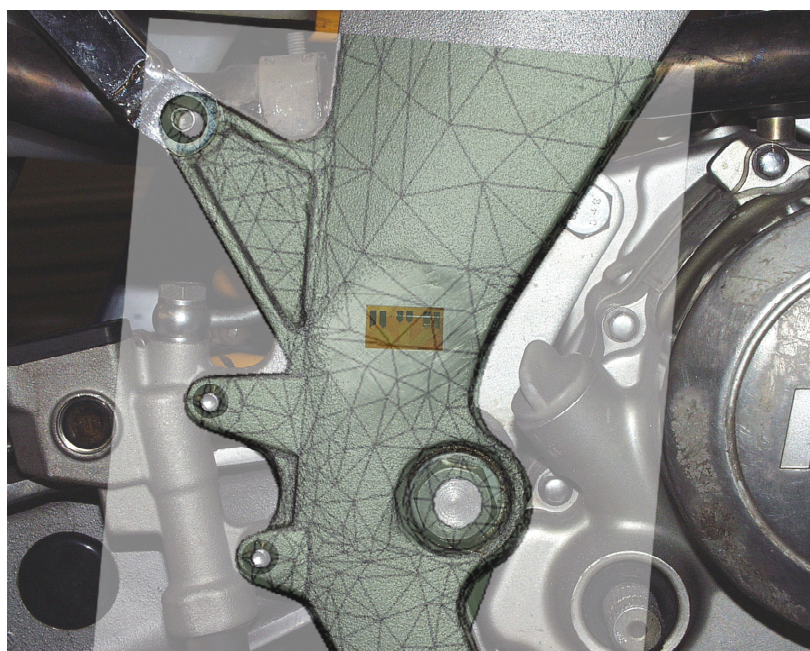


Fig. 165 - Posição dos elementos da malha de elementos finitos e da colocação do extensómetro na trave.

Foi também decidido comparar a posição do extensómetro relativamente à superfície de rotura. Resultado que se apresenta na figura 166.



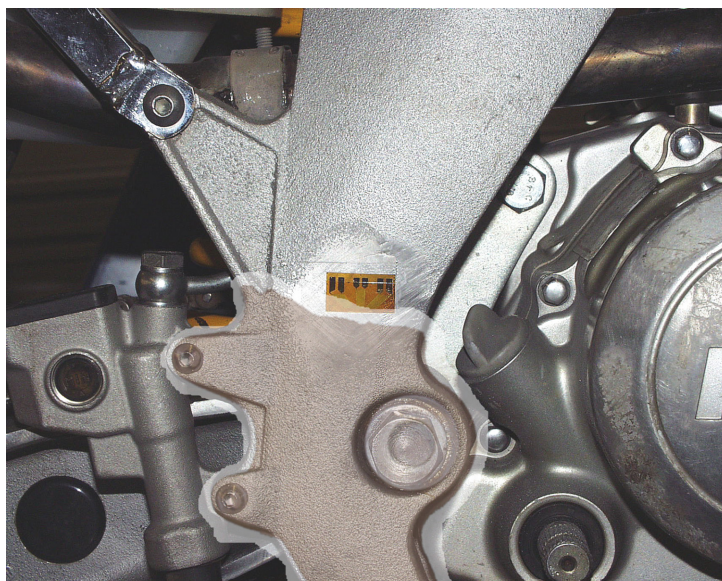


Fig. 166 – Colocação do extensómetro em relação à superfície de fractura da trave

E, por último foi estimado o factor a multiplicar pelas tensões medidas pelo extensómetro para obter os valores destas no ponto crítico. Foi obtido um factor 3,87 pelo que uma tensão medida de aproximadamente 50 MPa corresponderá a uma tensão no ponto crítico de aproximadamente 193,5 MPa.

#### 6.4.5 Acções realizadas após os testes

Foi feita uma análise aos dados resultantes do terceiro teste, aquele que deu indicações mais precisas quanto à rotura na trave.

Foram consideradas várias alternativas para aumentar a resistência na zona de rotura, tais como:

- Aumentar a espessura da parede lateral;
- Aumentar a espessura da nervura de reforço da trave;
- Colocar uma nova nervura interior;
- Alterar a geometria exterior.

Das várias opções disponíveis, optou-se por alterar a geometria exterior no raio de curvatura que a trave fazia na zona crítica, o que resultou também num aumento da espessura do reforço da trave, como se pode ver na figura 167. Na ponderação das acções a realizar foi factor importante o custo associado a cada uma delas. Na figura 168 é possível comparar a trave antes e depois da alteração.



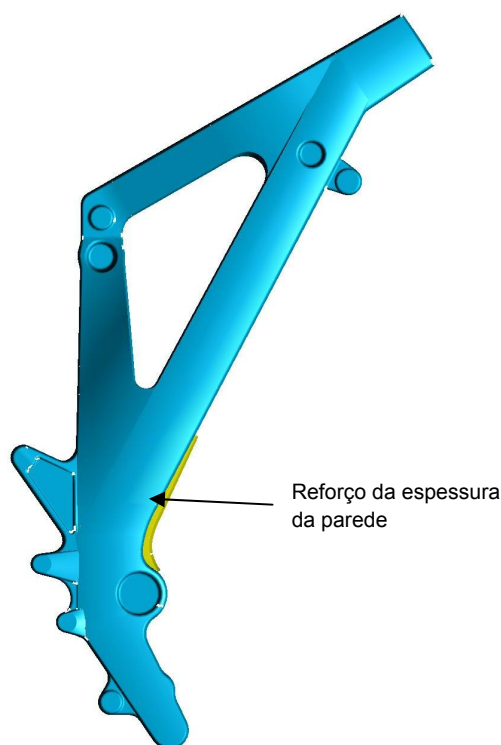


Fig. 167 - Comparação geometria anterior/alterada

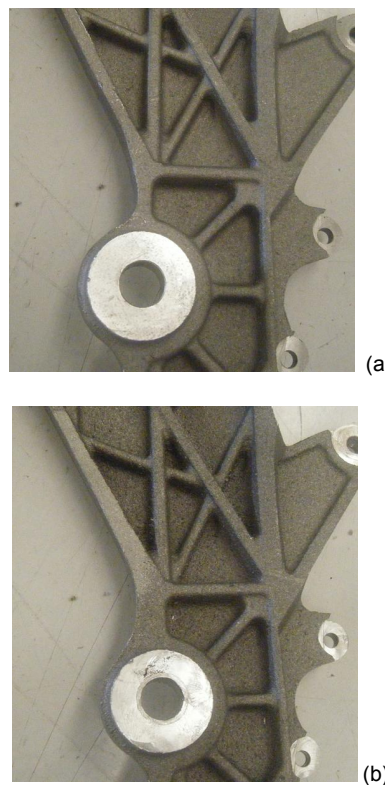


Fig. 168 - Comparação da trave PR3 a) geometria antiga; b) geometria actual

Essas alterações foram realizadas no molde pela AJP. Após as alterações do molde este foi enviado para a empresa encarregue da fundição para que fossem fabricados alguns componentes para ensaio. Em simultâneo foram realizadas algumas simulações numéricas com a nova geometria. Os resultados obtidos mostram-se na figura 169.

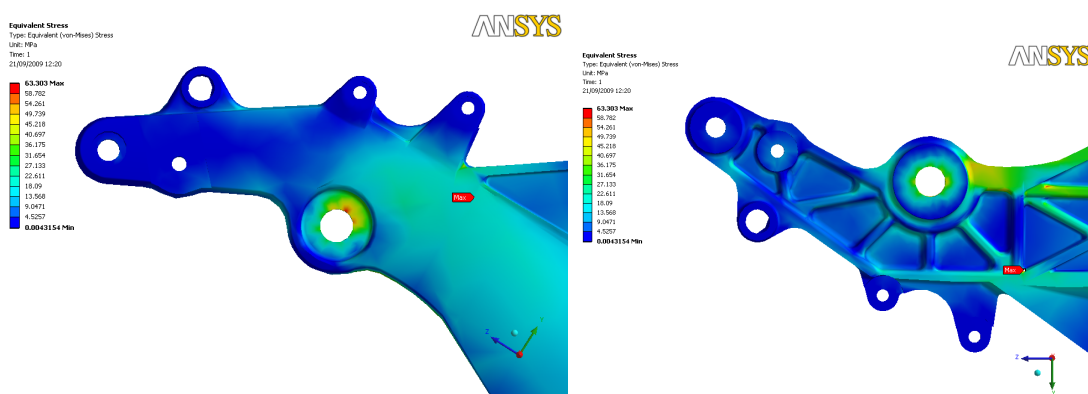


Fig. 169 - Distribuição de tensões de Von Mises em ambos os lados da nova trave após introdução de sobreespessura.

Como se pode concluir da análise da figura 168 ao redesenhar a trave não só se reduziu a máxima tensão como o ponto crítico alterou a sua posição. Contudo, dada a gravidade da situação, todo o projecto foi alvo de uma reapreciação. Nesta tarefa o autor teve a preciosa colaboração da equipa de ensaios da AJP com uma larga experiência no estudo de situações semelhantes. Outras hipóteses para a rotura das traves foram colocadas em cima da mesa tendo começado a ganhar força uma que se prendia com a geometria das bielas da suspensão.

A hipótese que entretanto surgiu relacionava-se com o facto das duas bielas, na fase superior do curso roda traseira, puderem ficar alinhadas, produzindo o chamado efeito de prensa de “joelheira”. Neste caso o que estaria a acontecer era o alinhamento das duas bielas perpendicularmente ao amortecedor e assim estarem a transmitir ao braço e à trave um esforço para além do imaginado.

Foi feita uma simulação do movimento da suspensão no computador verificou-se que esse efeito poderia, de facto, estar a acontecer, como se mostra na figura 170.

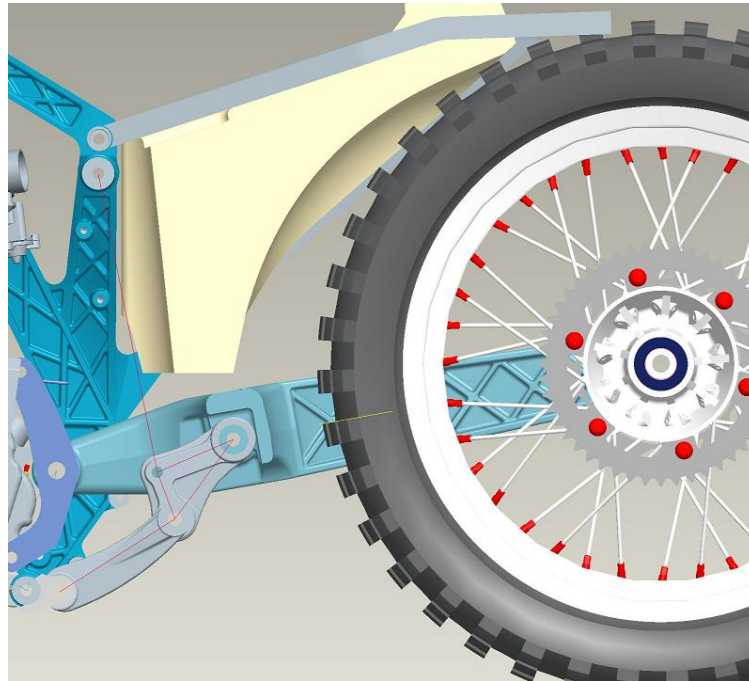


Fig. 170 - Curso máximo da roda traseira revelando alinhamento das bielas

Realizou-se um estudo usando a geometria das bielas antigas e verificou-se que quando a roda traseira se encontrava no máximo do curso – máxima compressão do amortecedor – a biela do braço e a do quadro se encontravam.

Para ultrapassar este problema foram feitas várias experiências, com dimensões diferentes das bielas, para que na fase final do curso da roda, estas nunca ficassem alinhadas, figuras 171 e 172.

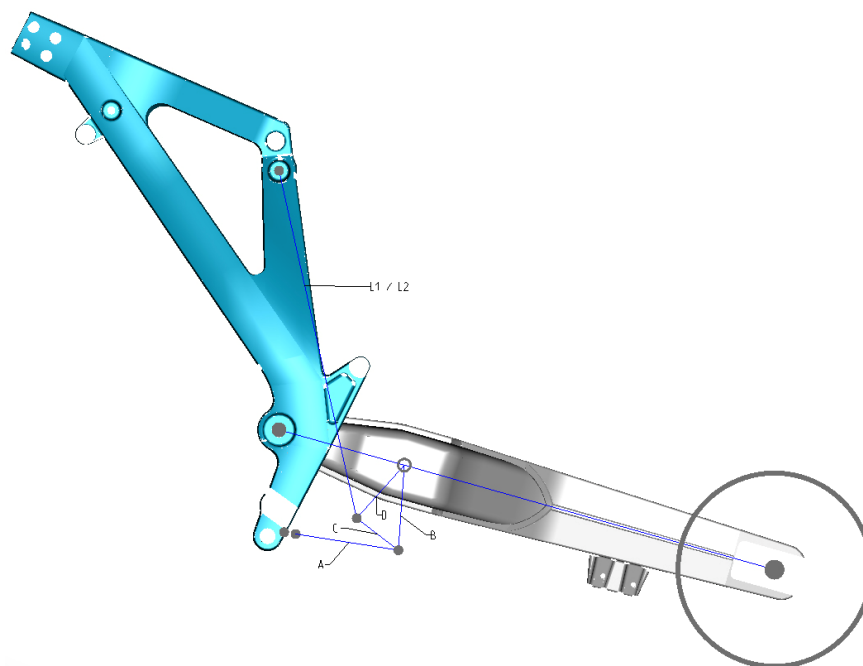


Fig. 171 – Posição da suspensão traseira com curso nulo

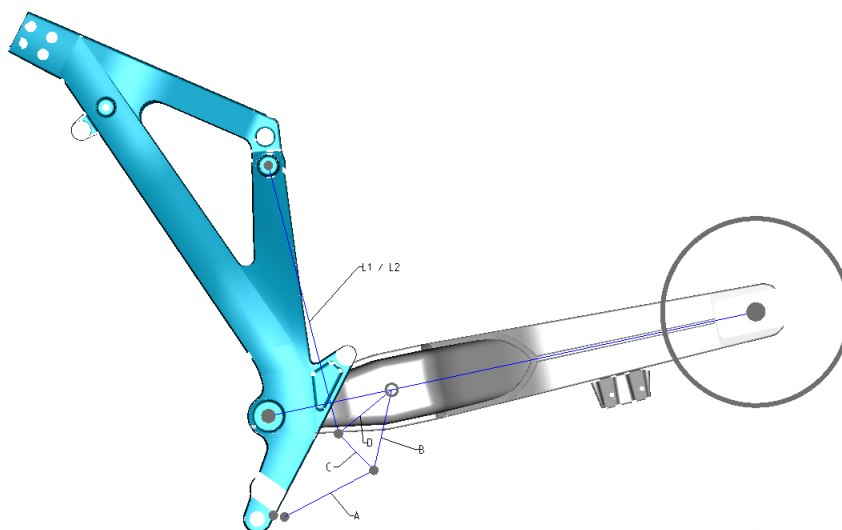


Fig. 172 – Posição da suspensão traseira no curso máximo da roda traseira

Após várias tentativas, as dimensões das novas bielas foram determinadas, segundo os valores que constam da tabela 7.

| Biela  | Dimensão | Valor  |       |
|--------|----------|--------|-------|
|        |          | Antiga | Nova  |
| Quadro | A        | 94     | 105   |
|        | B        | 86     | 83    |
|        | C        | 43.4   | 51.9  |
|        | D        | 72.25  | 72.25 |

Tabela 7 – Comparação das dimensões das bielas antigas e novas

Com as novas dimensões foi possível simular o efeito da alteração e comparar a relação entre o curso da roda traseira e o curso do amortecedor.

Na figura 173 é possível comparar os valores do curso do amortecedor para um determinado curso da roda e verifica-se que existe um menor curso final com as novas bielas, embora pouco significativo -3%.

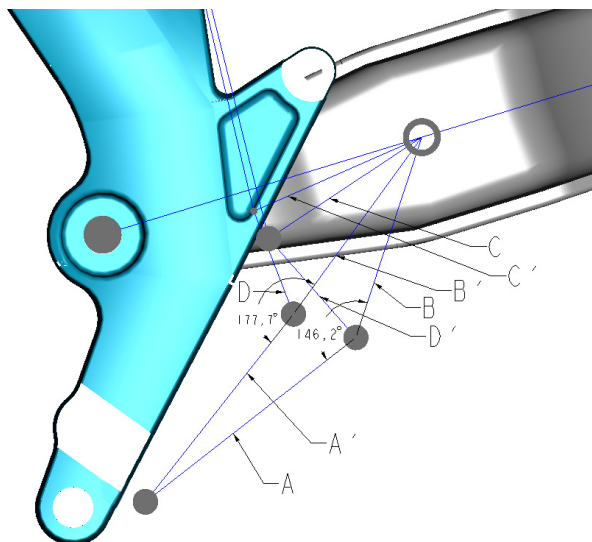


Fig.173 – Comparação entre o ângulo das bielas da geometria antiga e nova

A evolução da relação curso da roda/curso do amortecedor é praticamente semelhante entre a nova configuração e a antiga, existindo uma diferença perceptível a partir dos 200 mm de curso da roda, figura 174. Comparando com uma relação linear, verifica-se que ambas as soluções apresentam progressividade.

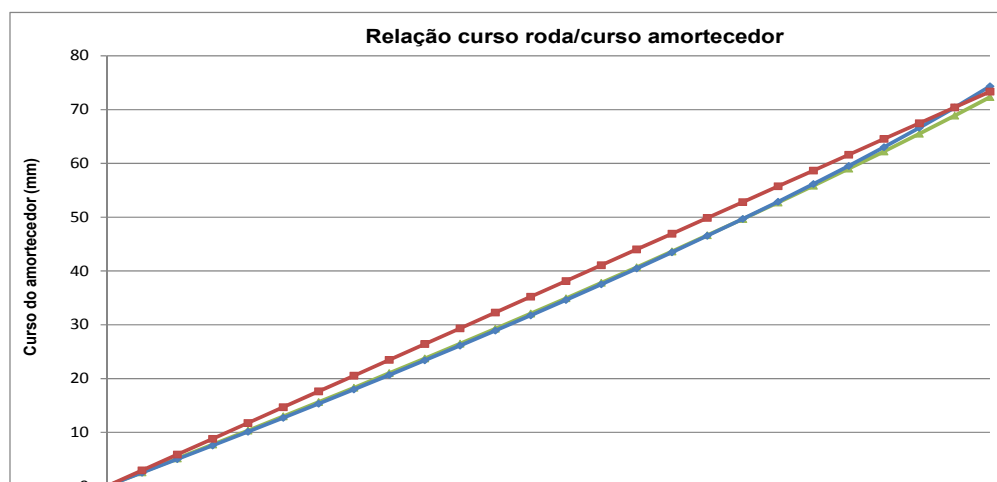


Fig. 174 – Relação curso da roda / curso do amortecedor

Para verificar se o efeito “joalheira” estava ultrapassado, retiraram-se alguns valores do modelo 3D para verificar o ângulo entre a biela do quadro e a biela do braço. Os valores desse ângulo na fase final do curso da roda estão na tabela 8.

|            |        | Curso da roda (mm) |       |       |       |       |
|------------|--------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
|            |        | 260                | 270   | 280   | 290   | 291   |
| Ângulo (°) | Antigo | 153.1              | 157.9 | 164.0 | 175.0 | 180.0 |
|            | Novo   | 136.9              | 139.7 | 142.7 | 145.9 | 146.2 |

Tabela 8 – Relação curso da roda / ângulo entre bielas

Na figura 174 é mais fácil observar o que estava a passar-se com as bielas antigas em relação às novas. Quando o curso da roda se aproximava do limite, por volta dos 290mm, com as bielas antigas, o ângulo entre a biela do quadro e biela do braço aproximava-se dos 180°, o que fazia com que as tensões transmitidas aos apoios tendia para infinito. Como a biela do braço está ligada ao braço e este por sua vez está ancorado num eixo que é suportado pelas traves, o esforço era transmitido às traves. Como na zona de ancoragem também se reflectem outros efeitos, resultantes da flexão e tracção, este esforço transversal levava à rotura das traves.

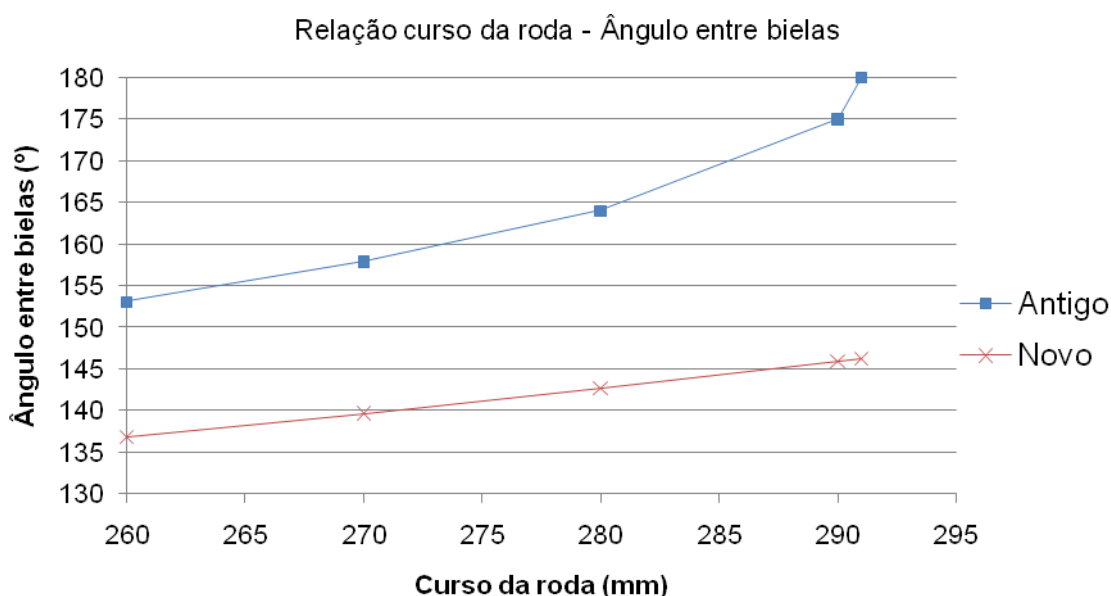


Fig. 175 – Relação curso roda / ângulo entre bielas

Para se verificar se de facto era esta a causa da rotura, fez-se um protótipo de uma biela do quadro em aço. Essa biela foi montada na moto de testes, com as traves na configuração inicial.

#### 6.4.6. Quarto teste em pista

Este teste foi realizado com a mesma moto de testes, desta vez não instrumentada. Este teste iria servir apenas para verificar se a causa da rotura tinha sido detectada e se a solução encontrada iria resolver o problema. O piloto de testes continuou a ser o mesmo dos testes anteriores.

Com efeito, após o aquecimento, o piloto começou a imprimir um ritmo cada vez mais forte, tendo realizado vários saltos cuja recepção foi violenta.

As traves suportaram o esforço, que foi bastante superior ao que até então tinha sido possível.



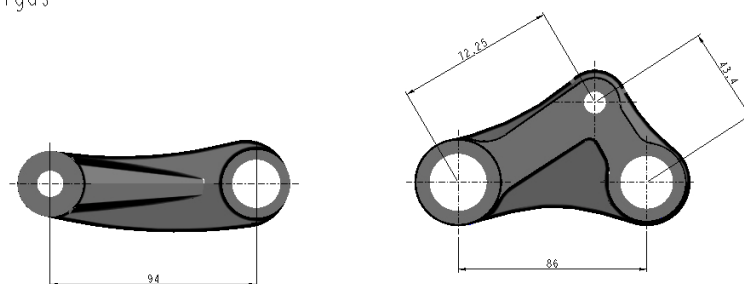
## 6.5. Soluções implementadas para produção

Em virtude de todos os testes realizados e das soluções que foram alcançadas foi alterada a geometria final das bielas. Para a obtenção da nova geometria foram implementadas as seguintes soluções:

- Desenvolver duas novas bielas, com a biela do quadro 10 mm mais comprida que a inicialmente usada;
- As bielas deixariam de ser realizadas por fundição de areia, tendo-se decidido realizá-las por fundição de alumínio em coquilha;
- As traves mantiveram o reforço na zona crítica que tinha sido implementado para a realização do teste.

As novas bielas foram desenvolvidas na AJP e apresentam as seguintes diferenças face às originais, figura 176.

Bielas antigas



Bielas actuais

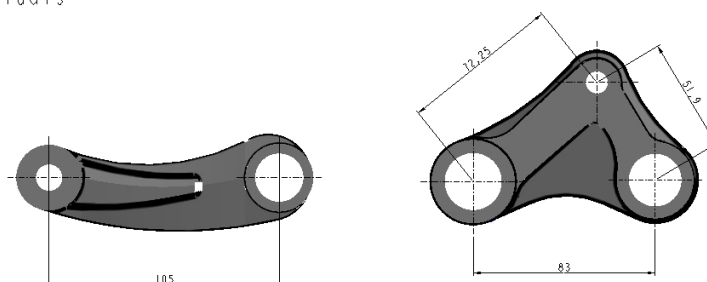


Fig. 176 – Comparação entre as bielas antigas e actuais

As coquilhas foram projectadas e maquinadas na AJP. O material das coquilhas é o aço CK 45. Em cada coquilha foram gravadas duas bielas, para facilitar o processo de fundição e aumentar a produtividade, figuras 177 e 178. A fundição foi realizada na empresa Felino e posteriormente maquinadas na AJP.

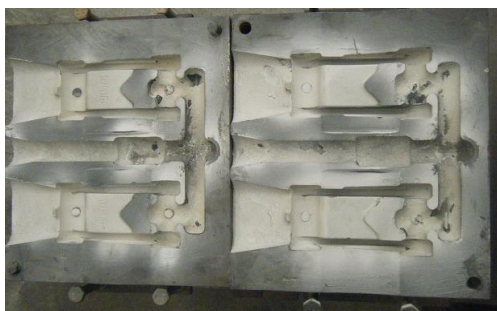


Fig. 177 – Coquilha da biela do braço



Fig. 178 – Coquilha da biela do braço

## 7. CONCLUSÕES

Após a finalização deste trabalho, conclui-se que a metodologia seguida é válida. Com efeito, foi possível através dos vários procedimentos adoptados validar o novo chassis do modelo PR3.

Foi possível demonstrar que com a determinação da função de um determinado componente, o seu desenvolvimento com ferramentas de CAD, a simulação do comportamento desse componente através do método dos elementos finitos e a posterior validação com testes dinâmicos em condições reais, suportados com o envio de dados em tempo real por telemetria, se pode desenvolver, testar e validar componentes estruturais neste caso de um motociclo.

Apesar de não haver qualquer referência anterior de trabalhos deste tipo, os procedimentos definidos para os testes estáticos e dinâmicos revelaram-se adequados e a sua execução permitiu ter acesso a informação do comportamento dos componentes que de outra forma seria impossível de obter.

De igual forma os métodos usados para o desenvolvimento, prototipagem e execução de peças finais revelaram-se adequados, traduziram-se num acumular de conhecimento desses métodos e numa perspectiva económica os custos dos processos utilizados foram muito baixos quando comparados com o que é corrente. Neste ponto o facto de se realizarem internamente na AJP MOTOS todos os moldes das peças de fundição de alumínio levou a que o custo final fosse baixo e permite uma maior flexibilidade e não dependência de terceiros.

Em relação à validação dos componentes ficou demonstrado que no caso do braço oscilante as tensões na área crítica se mantinham sempre em valores reduzidos, enquanto que nas traves o trabalho permitiu a detecção de um problema que poderia ocorrer ocasionalmente com utilizadores do produto e que seria de difícil diagnóstico, caso não se tivessem realizado os testes em pista. O reforço introduzido na zona crítica da trave e as alterações na geometria das bielhas demonstraram ser suficientes para resolver o problema.

## 8. REFLEXÃO CRÍTICA DO TRABALHO REALIZADO

Existem alguns aspectos a realçar que ocorreram durante a realização deste trabalho. Sendo o objectivo principal do mesmo validar o novo chassis desenhado para o novo modelo AJP PR3, esse objectivo só seria atingido se fosse também validado o procedimento a adoptar para a validação do novo chassis.

A primeira dificuldade surgiu precisamente na determinação do procedimento para validação do chassis, uma vez que através de pesquisas realizadas na Internet e em bases de dados de trabalhos científicos, existiam poucas referências a trabalhos neste campo.

O facto de o número de referências ser limitado e com pouca informação disponível não se deve ao facto de este tipo de procedimento não se efectuar pelos demais construtores, porque a sua aplicação é óbvia e basta ver o que se passa ao nível da competição, nomeadamente em pista, mas sim ao facto de ser informação que os construtores têm interesse em guardar para si, por acharem que daí ganham vantagem em relação à concorrência.

Por isso, foi necessário começar praticamente do zero e avançar com um procedimento que se parecesse adequado para o fim em causa.

Para tal foi fundamental a colaboração da FEUP, através do LOME, que dada a longa experiência que tem no estudo de estruturas através da aplicação de extensometria e outras técnicas, que permitiu estabelecer uma metodologia para o teste e validação do novo chassis.

Começando por definir uma estrutura para testes estáticos em laboratório para uma primeira percepção dos esforços em jogo, que deram indicações importantes para os testes que se iriam realizar em pista, o estudo realizado por elementos finitos para ter uma ideia mais precisa acerca dos pontos críticos do chassis, os próprios testes em pista em que se utilizou um sistema de telemetria para envio de dados em tempo real, todo este procedimento teve de ser pensado e planeado sem referências que pudessem à partida orientar as actividades realizadas.

No entanto e apesar de limitações de tempo por parte do autor do trabalho, que conjugou estas actividades com a sua actividade profissional, o resultado final foi positivo, uma vez que se ficou demonstrado que o chassis, após pequenas modificações na trave e também no sistema de bielas da suspensão traseira, resiste aos esforços a que estará sujeito.

A metodologia de validação também se mostrou adequada uma vez que os testes que foram realizados em laboratório e em pista deram resultados consistentes com o que se passava na realidade.

O factor económico que também deve ser avaliado neste contexto, revelou que estes testes não exigem um esforço económico muito significativo, salvaguardando-se a necessidade de realizar uma estrutura para os testes em laboratório, a utilização de extensómetros mais dispendiosos, nomeadamente as rosetas, nos pontos considerados mais críticos e obviamente, a necessidade de possuir um sistema de telemetria para envio dos dados e um sistema que os registre.

Neste último ponto é óbvio que a colaboração da FEUP foi fundamental, uma vez que o sistema de telemetria e aquisição de dados já tinham sido adquiridos pela FEUP para a realização de outros trabalhos, o que permitiu não só evitar a compra destes sistemas mas também rentabilizá-los com a realização deste trabalho, que não deveria estar previsto quando os sistemas foram adquiridos.

Uma questão importante diz respeito ao tempo que decorreu entre a decisão de se avançar com este trabalho, a realização das actividades e a conclusão do mesmo.

Com efeito, verificou-se que o planeamento de todas as actividades que foram realizadas não foi fácil de realizar, uma vez que na AJP não havia condições por exemplo para se montar a estrutura para a realização dos testes estáticos, nem tão pouco os equipamentos necessários para as medições realizadas nos testes. Toda esta actividade teve de ser feita na FEUP, tendo sido necessário levar um chassis da AJP para a FEUP, realizar várias deslocações durante as medições, conjugar as obrigações profissionais com esta actividade, o que leva a que actividades que supostamente se realizariam num determinado tempo, na realidade demorem mais tempo.

De igual forma, os testes em pista foram realizados numa pista particular, que é usada em provas oficiais, e que felizmente se contou com a colaboração incondicional do proprietário, acarretou que para a sua realização fosse necessário conciliar as agendas do autor, da AJP e dos técnicos da FEUP. O facto de ter havido necessidade de realizar três testes e em períodos diferentes face aos problemas surgidos, condicionou o que seria o desenrolar normal desta actividade.

Apesar das contrariedades, o resultado final do trabalho deve ser considerado positivo, pelos resultados obtidos, pela experiência adquirida que poderá ser utilizada no futuro e pelo facto de se ter realizado este tipo de testes em Portugal, com medições em tempo real, em condições de utilização extrema do produto, neste caso um motociclo, e ter sido promovido por uma empresa de pequenas dimensões, mas que sempre apostou na inovação das suas soluções e produtos e que através deste trabalho pretende elevar os seus níveis de conhecimento e desenvolvimento.

## 9. PROPOSTAS PARA O FUTURO

Existem várias propostas para a realização de trabalhos futuros, que resultaram não só de actividades que foram idealizadas mas não foram consideradas neste trabalho mas também actividades que podem ser realizadas tendo como ponto de partida este trabalho:

- Realizar testes em pista com a PR3, colocando rosetas de extensómetros exactamente nos pontos críticos;
- O mesmo teste realizado com rosetas tanto na trave direita, como na trave esquerda, para verificar se o esforço suportado pelo chassis é simétrico;
- Estudar de uma forma mais detalhada as cargas que actuam no chassis, para que a simulação por elementos finitos seja feita com mais precisão
- Considerar outras situações de utilização do motociclo, como por exemplo a passagem por cima de lombas ou cavidades numa estrada e assim ver a reacção do chassis a este tipo de solicitações
- Em próximos modelos a desenvolver pela AJP aplicar esta metodologia e comparar os resultados entre o chassis da PR3 e o de novos chassis
-



## BIBLIOGRAFIA

- [1] - <http://pt.shvoong.com/books/1622542-hist%C3%B3ria-das-motos/>
- [2] - <http://www.totalmotorcycle.com/future.htm#1800s>
- [3] - [http://en.wikipedia.org/wiki/Motorcycle\\_history](http://en.wikipedia.org/wiki/Motorcycle_history)
- [4] - [http://en.wikipedia.org/wiki/NSU\\_Motorenwerke\\_AG](http://en.wikipedia.org/wiki/NSU_Motorenwerke_AG)
- [5] – <http://www.autos.canada.com>
- [6] - [http://en.wikipedia.org/wiki/Hildebrand\\_%26\\_Wolfm%C3%BCller](http://en.wikipedia.org/wiki/Hildebrand_%26_Wolfm%C3%BCller)
- [7] - <http://www.indianmotorbikes.com/features/waddell/100yrsIndian.htm>
- [8] - <http://www.pantherownersclub.com/PantherPage/p-m-hw-humber.html>
- [9] – Colombo, Sandro (2005)- Storia della tecnica motociclistica, Il veicolo - 2 – Milão, Giorgio Nada Editore
- [10] - <http://www.autogallery.org.ru/m/bmwr11.htm>
- [11] - [http://www.jawaireland.ie/history\\_of\\_jawa\\_3.html](http://www.jawaireland.ie/history_of_jawa_3.html)
- [12] - [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lambretta\\_Li\\_150\\_I\\_tipo\\_a.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lambretta_Li_150_I_tipo_a.JPG)
- [13] -  
[http://media.photobucket.com/image/norton%20featherbed/gutta\\_punk/Technical%20Information/fbed.jpg?o=3](http://media.photobucket.com/image/norton%20featherbed/gutta_punk/Technical%20Information/fbed.jpg?o=3)
- [14] - Cocco, Gaetano (1999) – Motorcycle Design and Technology, Milão, Giorgio Nada Editore
- [15] - [http://www.motorcyclespecs.co.za/model/ducati/ducati\\_600tt2%2085.htm](http://www.motorcyclespecs.co.za/model/ducati/ducati_600tt2%2085.htm)
- [16] - <http://www.yamaha-motor.nl/designcafe/en/about/supersport/?Component=tcm:71-202049&PageTitle=R6%202003:%20State%20of%20the%20art%20in%20600%20cc%20supersport>
- [17] – Dowds, Alan (2007) – The Encyclopedia of Motorcycles, From 1884 to the Present Day, Kent, Grange Books
- [18] - [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:NSU\\_3\\_PS\\_1911.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:NSU_3_PS_1911.jpg)
- [19] – <http://www.vintagebike.co.uk/Bike%20Directories/Wilkinson%20Bikes/pages/Wilkinson.htm>
- [20] - <http://www.flickr.com/photos/9383961@N05/3289073924>
- [21] - [http://motorbike-search-engine.co.uk/classic\\_bikes/matchless\\_h.jpg](http://motorbike-search-engine.co.uk/classic_bikes/matchless_h.jpg)
- [22] - <http://www.seebacher-gmbh.de/cms/seebacher/index.php?idcatside=9>
- [23] - [http://www.motosclassicas70.com.br/Colec\\_iran.htm](http://www.motosclassicas70.com.br/Colec_iran.htm)

- [24] - <http://www.bmbikes.co.uk/mechanicalpages/rseriesmechanical.htm>
- [25] - <http://flickr.com/photos/9383961@N05/3376867184>
- [26] – Arias-Paz, Manuel (2008) – Motocicletas, 33ª edição, Madrid, CIE Inversiones Editoriales Dossat 2000, SL
- [27] - [http://www.dropbears.com/gallery/jawa/Jawa\\_47ja250l.htm](http://www.dropbears.com/gallery/jawa/Jawa_47ja250l.htm)
- [28] - [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gilera\\_Giubileo.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gilera_Giubileo.JPG)
- [29] - <http://www.vintagebike.co.uk/Bike%20Directories/BSA%20Bikes/pages/BSA-Goldstar-DBD34-59.htm>
- [30] - [http://motorbike-search-engine.co.uk/classic\\_bikes/hercules\\_mk\\_50.jpg](http://motorbike-search-engine.co.uk/classic_bikes/hercules_mk_50.jpg)
- [31] - <http://ridedualsport.com/forum/index.php?topic=204.0>
- [32] - <http://www.brownz.com/Bike%20Gallery.htm>
- [33] - [http://www.powersportsnetwork.com/enthusiasts/pre\\_owned\\_detail.asp?PreOwnedVehicleCode=1028452](http://www.powersportsnetwork.com/enthusiasts/pre_owned_detail.asp?PreOwnedVehicleCode=1028452)
- [34] - [http://www.motorcyclespecs.co.za/model/suzu/suzuki\\_dr350se%2098.htm](http://www.motorcyclespecs.co.za/model/suzu/suzuki_dr350se%2098.htm)
- [35] - [http://www.motorcyclespecs.co.za/model/kawasaki/kawasaki\\_klx250r%2093.htm](http://www.motorcyclespecs.co.za/model/kawasaki/kawasaki_klx250r%2093.htm)
- [36] – Walker, Mick (2002) – History of Motorcycles, Londres, Chancellor Press
- [37] - <http://www.motorul.ro/wp-content/uploads/2009/06/aprilia-rxv-450.jpg>
- [38] - [http://smugmug.alsplace.com/gallery/3803874\\_UBcAG](http://smugmug.alsplace.com/gallery/3803874_UBcAG)
- [39] - [http://forum.motonline.pt/forum\\_posts.asp?TID=35386&PN=5](http://forum.motonline.pt/forum_posts.asp?TID=35386&PN=5)
- [40] - <http://www.motorizadas50.com/pagina%20oculta%20casal%20competicao.htm>
- [41] - <http://www.motorizadas50.com/pagina%20oculta%20casal%20anuncios.htm>
- [42] - [http://www.motorizadas50.com/testes%20fundador\\_k188%20a%20aposta%20nacional.htm](http://www.motorizadas50.com/testes%20fundador_k188%20a%20aposta%20nacional.htm)
- [43] - [http://www.motorizadas50.com/testes%20fundador\\_mre\\_50%20evolucao%20possivel.htm](http://www.motorizadas50.com/testes%20fundador_mre_50%20evolucao%20possivel.htm)
- [44] - <http://www.motorizadas50.com/testes%20sis%20sachs%20st%2050.htm>
- [45] - [http://www.motorizadas50.com/testes%20sis\\_sachs\\_re\\_50.htm](http://www.motorizadas50.com/testes%20sis_sachs_re_50.htm)
- [46] - <http://www.motorizadas50.com/pagina%20oculta%20famel.htm>
- [47] - <http://www.motorizadas50.com/pagina%20oculta%20anfesa.htm>

- [48] - <http://www.motorizadas50.com/testes%20anfesa%20rv50%20e%20rt250.htm>
- [49] - <http://www.motorizadas50.com/pagina%20oculta%20macal.htm>
- [50] - [http://www.motorizadas50.com/testes%20macal\\_dakar\\_junior.htm](http://www.motorizadas50.com/testes%20macal_dakar_junior.htm)
- [51] - <http://www.motorizadas50.com/pagina%20oculta%20vilar.htm>
- [52] - <http://www.motorizadas50.com/pagina%20oculta%20forvel.htm>
- [53] - [http://www.motorizadas50.com/testes%20mvm\\_challenge.htm](http://www.motorizadas50.com/testes%20mvm_challenge.htm)
- [54] - [http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp\\_E\\_SOLID187.html](http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp_E_SOLID187.html)
- [55] - James W. Dally; William F. Riley; "Experimental Stress Analysis"; McGraw-Hill, Second Edition, 1978
- [56] – Watson, Robert B. ,(2008), Bonded electrical Resistance strain Gages – Springer Handbook of experimental Solid Mechanics, Nova Iorque, Springer Science + Business Media