

# **Desenvolvimento de Sistema de Regulação Lombar para Assentos de Automóveis**

**Jorge Daniel Soares Macieira**

Dissertação de mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Carlos Miguel da Costa Gomes Fernandes

Coorientador na FEUP: Prof.<sup>a</sup> Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte

Orientador na empresa: Eng.º João Paulo Costa Ferreira



**Mestrado em Engenharia Mecânica**

Fevereiro 2022



*“Todas as coisas acontecem através do desejo, e todas as preces sinceras são correspondidas. Tornamo-nos naquilo em que o nosso coração se fixou. Mantenha o queixo recolhido e o topo da cabeça bem alto. Somos deuses numa crisálida.”*

*Dale Carnegie*



## Resumo

No âmbito da unidade curricular Dissertação do Mestrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, foi desenvolvido um projeto em contexto empresarial no Grupo PR.

O principal objetivo desta dissertação era o desenvolvimento de um novo sistema de regulação lombar aplicável a assentos automóveis, de modo a acrescentar valor a produtos que já são produzidos pela empresa, nomeadamente os *suspension mats*.

Primeiramente, foi feita uma análise da evolução dos sistemas de conforto aplicados em assentos automóveis, sendo que foi dada especial atenção a engrenagens poliméricas como meio de transmissão de movimento, através do estudo das suas características, tais como as propriedades geométricas, materiais mais usados, propriedades mecânicas e tipos de falhas mais comuns. Em seguida, foram exploradas as principais características das engrenagens helicoidais de eixos cruzados, para perceber o que as tornam ideais para aplicação em sistemas de regulação lombar.

Foi ainda realizada uma análise de mercado das soluções aplicadas na atualidade para o conforto lombar em assentos automóveis e das patentes relacionadas com este tipo de sistemas, por forma a compreender em que ponto se encontra a evolução desta área da indústria automóvel.

Posteriormente, foram realizados cálculos para conhecer a capacidade de carga e eficiência de uma engrenagem pertencente a um sistema utilizado atualmente na indústria automóvel, de acordo com a diretiva VDI 2736.

Seguindo a mesma diretiva, foi desenvolvida uma nova solução para um sistema de regulação lombar, capaz de cumprir com todos os requisitos exigidos pelo cliente e com as normas da indústria automóvel.

Após a modelação tridimensional do conceito, foi concebido um protótipo deste novo sistema e, para comprovar a aplicabilidade do mesmo na indústria automóvel, foi desenvolvido um banco de ensaios e realizados testes de validação do conceito.



## Abstract

In regard to the subject Dissertation of the Master's Degree in Mechanical Engineering of the Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a project was developed in a company's environment, at Grupo PR.

The main goal of this dissertation was the development of a new adjustable lumbar support mechanism, applicable to car seats, in order to add value to products that are already produced by the company, namely the suspension mats.

Firstly, a study was carried out on the evolution of comfort systems in car seats, and it was given special attention to polymer gears as the motion transmission system, by analyzing their characteristics, such as geometric properties, most commonly used materials, mechanical properties and most common failure types. Then, the main characteristics of crossed helical gears were investigated, to understand what makes them ideal to be applied in lumbar regulator systems.

Also, a market study was performed on the current lumbar comfort solutions applied in car seats and their associated patents, in order to understand the current evolution state regarding this area of the automotive industry.

Then, following the standard VDI 2736, a gear system currently applied in the automotive industry was used as a benchmark, calculating its load-carrying capacity and efficiency.

Considering the same standard, a new solution was developed for the adjustable lumbar support mechanism, that was able to satisfy the client's requirements and the automotive industry's regulations.

After developing a 3D model concept, a prototype was produced and, to evaluate the applicability of this system in the automotive industry, a test bench was also developed, produced and validation tests were performed.



## Agradecimentos

Esta dissertação simboliza o término do meu percurso académico, realizado com muito orgulho na mais prestigiada faculdade de engenharia do país, a FEUP. Pelos tempos aqui passados, convivências, relações criadas, assim como dedicação e esforço despendidos, estes foram, sem dúvida alguma, os anos mais marcantes da minha vida. Daqui levo muito boas memórias, que recordarei para sempre com muita felicidade.

Ao Grupo PR, por me ter dado a oportunidade de estabelecer um primeiro contacto com o ambiente empresarial e pelas condições oferecidas. Ao Eng. João Ferreira pelo incansável acompanhamento e todo o conhecimento partilhado durante o estágio de verão e estágio em contexto da dissertação. Ao Eng. Abel Pereira pela oportunidade de poder realizar ambos os estágios em ambiente empresarial e pelos variados desafios apresentados, permitindo-me adquirir bastante experiência na área. Ao Eng. Pedro Dias e Hugo pela contribuição nos trabalhos desenvolvidos.

Ao professor Carlos Fernandes pela imensa ajuda e empenho, bem como pelo constante entusiasmo e interesse demonstrados nas temáticas da dissertação, dando-me mais motivação para dar o meu melhor. À professora Teresa Duarte pelas recomendações dadas e auxílio no processo de transferência de curso, possibilitando a minha mudança para Engenharia Mecânica.

Aos meus pais, palavras não chegam para agradecer pelas oportunidades que criaram na minha vida para que eu pudesse explorar o meu potencial, por confiarem em mim e nas minhas decisões, e por estarem sempre presentes, tanto nos bons momentos, como nos menos bons. Ao meu irmão pela cooperação no estudo ao longo de todos estes anos, tornando assim as matérias lecionadas mais simples de serem entendidas.

Aos meus amigos, cujas amizades nasceram nos tempos do secundário ou na faculdade, por todas as memórias que vivemos juntos, pela motivação e por tornarem todos os momentos mais alegres.

Por fim, a todas as pessoas que, de alguma forma, influenciaram o meu percurso académico, por todas as experiências vividas e por me terem ajudado a crescer como pessoa.



## Índice de Conteúdos

|                                                                             |      |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|
| Índice de Figuras.....                                                      | xv   |
| Índice de Tabelas .....                                                     | xix  |
| Símbolos e abreviaturas.....                                                | xxi  |
| Abreviaturas .....                                                          | xxi  |
| Símbolos .....                                                              | xxii |
| 1. Introdução .....                                                         | 1    |
| 1.1. Enquadramento do projeto e objetivos.....                              | 1    |
| 1.2. Apresentação da empresa .....                                          | 2    |
| 1.3. Estrutura da dissertação .....                                         | 3    |
| 2. Estado da arte .....                                                     | 5    |
| 2.1. O conforto automóvel .....                                             | 5    |
| 2.2. Assento automóvel.....                                                 | 7    |
| 2.3. <i>Suspension mat</i> .....                                            | 11   |
| 2.4. Sistemas de transmissão de movimento – Engrenagens.....                | 12   |
| 2.4.1. Classificação quanto à posição dos eixos .....                       | 14   |
| 2.4.2. Classificação quanto ao tipo de dentado .....                        | 15   |
| 2.4.3. Engrenagens poliméricas .....                                        | 16   |
| 2.4.4. Falhas nas rodas dentadas poliméricas.....                           | 20   |
| 2.4.5. Seleção de materiais .....                                           | 21   |
| 2.4.6. Processos de fabrico .....                                           | 24   |
| 2.4.7. Propriedades mecânicas .....                                         | 27   |
| 2.4.8. Resistência térmica .....                                            | 29   |
| 2.4.9. Resistência química.....                                             | 31   |
| 2.4.10. Desgaste .....                                                      | 32   |
| 2.4.11. Lubrificação .....                                                  | 33   |
| 2.4.12. Engrenagem helicoidal de eixos cruzados.....                        | 34   |
| 3. Análise de mercado .....                                                 | 37   |
| 3.1. Soluções existentes .....                                              | 37   |
| 4. Projeto de sistema de regulação lombar segundo a diretiva VDI 2736 ..... | 41   |
| 4.1. <i>Benchmarking</i> do sistema existente.....                          | 41   |
| 4.2. Condições de funcionamento .....                                       | 45   |
| 4.2.1. Velocidade angular .....                                             | 46   |
| 4.2.2. Tempo de vida .....                                                  | 47   |
| 4.2.3. Coeficientes de segurança.....                                       | 47   |
| 4.2.4. Temperatura de funcionamento .....                                   | 48   |

|        |                                                                |     |
|--------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.   | Valor de carga característico .....                            | 49  |
| 4.4.   | Capacidade de carga no pé do dente .....                       | 51  |
| 4.5.   | Capacidade de carga no flanco do dente .....                   | 54  |
| 4.6.   | Eficiência .....                                               | 58  |
| 4.7.   | Comparação dos resultados com o <i>software</i> KISSsoft ..... | 58  |
| 4.8.   | Validação dos requisitos iniciais .....                        | 60  |
| 4.9.   | Análise e seleção de materiais .....                           | 63  |
| 5.     | Desenvolvimento de uma nova solução .....                      | 65  |
| 5.1.   | Novos requisitos iniciais .....                                | 65  |
| 5.2.   | Características do novo sistema .....                          | 65  |
| 5.2.1. | Influência da distância L .....                                | 65  |
| 5.2.2. | Influência do número de dentes .....                           | 66  |
| 5.2.3. | Influência do módulo .....                                     | 68  |
| 5.2.4. | Influência do ângulo da hélice .....                           | 69  |
| 5.3.   | Resultados obtidos através da diretiva VDI 2736 .....          | 70  |
| 5.4.   | Comparação dos resultados com o <i>software</i> KISSsoft ..... | 71  |
| 5.4.1. | <i>Fine sizing</i> .....                                       | 72  |
| 5.5.   | Desenvolvimento de protótipo .....                             | 73  |
| 5.6.   | Análise estática da caixa e engrenagem redutora .....          | 76  |
| 5.7.   | Análise de processos de prototipagem do sistema .....          | 81  |
| 5.8.   | Prototipagem do sistema .....                                  | 82  |
| 6.     | Validação do conceito .....                                    | 85  |
| 6.1.   | Testes de validação .....                                      | 85  |
| 6.2.   | Projeto de banco de ensaios .....                              | 87  |
| 6.3.   | Produção do banco de ensaios .....                             | 94  |
| 6.4.   | Ensaio B/C: Teste de deslocamento .....                        | 95  |
| 6.4.1. | Procedimento de ensaio .....                                   | 95  |
| 6.4.2. | Resultados obtidos .....                                       | 96  |
| 6.4.3. | Discussão de resultados do ensaio B/C .....                    | 98  |
| 6.5.   | Ensaio D: Teste de binário .....                               | 98  |
| 6.5.1. | Procedimento de ensaio .....                                   | 98  |
| 6.5.2. | Resultados obtidos .....                                       | 100 |
| 6.5.3. | Discussão de resultados do ensaio D .....                      | 102 |
| 6.6.   | Ensaio E e F .....                                             | 103 |
| 6.7.   | Requisitos do cliente .....                                    | 103 |
| 7.     | Conclusões e trabalhos futuros .....                           | 105 |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1. Conclusões .....                                                             | 105 |
| 7.2. Trabalhos futuros .....                                                      | 107 |
| Bibliografia .....                                                                | 109 |
| Anexo A: Propriedades dos materiais .....                                         | 113 |
| A.1: PA 66 .....                                                                  | 113 |
| A.2: PA 66 + 35 GF .....                                                          | 125 |
| A.3: PA 66 + 30 GF + 15 PTFE .....                                                | 127 |
| A.4: iglidur® I3 .....                                                            | 137 |
| Anexo B: Ficheiros Excel segundo diretiva VDI 2736 .....                          | 139 |
| B.1: <i>Benchmarking</i> do sistema existente .....                               | 139 |
| B.2: Nova solução .....                                                           | 143 |
| Anexo C: Relatórios obtidos com o <i>software</i> KISSsoft .....                  | 149 |
| C.1: <i>Benchmarking</i> do sistema existente .....                               | 149 |
| C.2: Nova solução considerando o material PA 66 .....                             | 157 |
| C.3: Nova solução considerando o material PA 66 + 30 GF + 15 PTFE .....           | 165 |
| Anexo D: Desenhos de definição e de conjunto do sistema de regulação lombar ..... | 173 |
| D.1: Parafuso sem-fim .....                                                       | 173 |
| D.2: Roda helicoidal .....                                                        | 175 |
| D.3: Peça superior .....                                                          | 177 |
| D.4: Peça inferior .....                                                          | 179 |
| D.5: Casquilho de ajuste do cabo de aço na roda helicoidal .....                  | 181 |
| D.6: Desenho de conjunto do sistema de regulação lombar .....                     | 183 |
| Anexo E: Desenhos de definição e de conjunto do banco de ensaios .....            | 185 |
| E.1: Mesa .....                                                                   | 185 |
| E.2: Torres de apoio .....                                                        | 187 |
| E.3: Chapa de fixação .....                                                       | 193 |
| E.4: Braço .....                                                                  | 195 |
| E.5: Elemento de forma oval .....                                                 | 197 |
| E.6: “Mini form” .....                                                            | 199 |
| E.7: Outros elementos de pequena dimensão .....                                   | 201 |
| E.8: Desenho de conjunto do banco de ensaios .....                                | 207 |



## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Benz Patent-Motorwagen ( <i>Wikimedia Commons</i> ).....                                                                                                                                 | 5  |
| Figura 2 - Vista em perspectiva do primeiro revestimento criado para um assento automóvel [2]<br>.....                                                                                              | 6  |
| Figura 3 - Exemplos de sistemas desenvolvidos para a inclinação dos assentos, em 1935<br>(esquerda) e 1937 (direita) [4] [5, 6].....                                                                | 6  |
| Figura 4 - Motor elétrico de 12V para banco de potência do primeiro modelo do Ford<br>Thunderbird [7].....                                                                                          | 7  |
| Figura 5 - Diagrama dos diferentes tipos de assentos automóveis [10] .....                                                                                                                          | 8  |
| Figura 6 - Fatores a considerar para o <i>design</i> de um assento automóvel; Copyright 2014 © H-<br>Point, 2nd Edition by Stuart Macey with Geoff Wardle   Courtesy of Design Studio Press [11] .. | 8  |
| Figura 7 - Principais subcomponentes de um assento automóvel [12] .....                                                                                                                             | 9  |
| Figura 8 - Sistema de engrenagens com cabo de aço enrolado .....                                                                                                                                    | 12 |
| Figura 9 - Sistemas de transmissão de movimento por ligação intermédia: (a) Mecanismo de<br>quatro barras; (b) Transmissão por correia; (c) Transmissão por corrente. [20] .....                    | 12 |
| Figura 10 - Sistemas de transmissão por contacto direto: (a) Rodas de atrito; (b) Engrenagens;<br>(c) Mecanismo came-seguidor. [20] .....                                                           | 12 |
| Figura 11 - Exemplos de tipos de engrenagens: a) Paralelas/cilíndricas; b) Concorrentes; c)<br>Esquerdas/Torsas (DIN 3998) .....                                                                    | 14 |
| Figura 12 - Linhas de engrenamento em engrenagem cilíndrica de a) dentado reto; b) dentado<br>helicoidal [26] .....                                                                                 | 15 |
| Figura 13 - Ciclo de histerese do plástico [37] .....                                                                                                                                               | 21 |
| Figura 14 - Fluxograma para otimização de engrenagens e critérios que influenciam o seu<br>design [38] .....                                                                                        | 22 |
| Figura 15 - Legenda de uma máquina de injeção de plástico [39] .....                                                                                                                                | 24 |
| Figura 16 - Influência da temperatura e humidade no módulo de elasticidade (PA 66) [32] .....                                                                                                       | 27 |
| Figura 17 - Influência da temperatura e humidade no módulo de elasticidade (PA 66 + 30 GF)<br>[32] .....                                                                                            | 28 |
| Figura 18 - Influência da humidade na curva tensão-deformação (PA 66) [32] .....                                                                                                                    | 28 |
| Figura 19 - Influência da humidade na curva tensão-deformação (PA 66 + 30 GF) [32] .....                                                                                                            | 28 |
| Figura 20 - Influência da temperatura no decremento logarítmico de materiais poliméricos [32]<br>.....                                                                                              | 29 |
| Figura 21 - Influência da temperatura no amortecimento (PA 66) [32] .....                                                                                                                           | 29 |
| Figura 22 - Influência de estabilizadores térmicos em PA 6 e PA 66, com e sem fibra de vidro,<br>no tempo de vida da roda dentada [32] .....                                                        | 30 |
| Figura 23 - Evolução do desgaste em função dos materiais da engrenagem [41] .....                                                                                                                   | 32 |
| Figura 24 - Ângulo de hélice e ângulo do passo ( <i>HBD/Winsmith, Inc.</i> ) [45].....                                                                                                              | 35 |
| Figura 25 - Sistema mecânico vertical de apoio lombar para assento automóvel [46] .....                                                                                                             | 37 |
| Figura 26 - Sistema mecânico horizontal de apoio lombar para assento automóvel [47].....                                                                                                            | 38 |
| Figura 27 - Sistema de apoio lombar através de bolsas de ar .....                                                                                                                                   | 39 |
| Figura 28 - Sistema de apoio lombar exterior [48] .....                                                                                                                                             | 39 |
| Figura 29 - Roda dentada helicoidal .....                                                                                                                                                           | 41 |
| Figura 30 - Parafuso sem-fim.....                                                                                                                                                                   | 41 |
| Figura 31 - Caixa da engrenagem.....                                                                                                                                                                | 42 |
| Figura 32 - Cota tangencial sobre k dentes de uma roda de dentado helicoidal .....                                                                                                                  | 42 |
| Figura 33 - Medição do entre-eixo na máquina de medição de coordenadas 3D.....                                                                                                                      | 43 |

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 34 - Sequência de cálculo para verificação da capacidade de carga de uma engrenagem helicoidal de eixos cruzados [6, 44] ..... | 46 |
| Figura 35 - Temperaturas de funcionamento no <i>software</i> KISSsoft.....                                                            | 48 |
| Figura 36 - Largura de contacto sobre o diâmetro de referência, $b_m$ [44] .....                                                      | 50 |
| Figura 37 - Valor de carga característico permitido para POM e PA 66.....                                                             | 51 |
| Figura 38 - Resistência à fadiga por tração, $\sigma_{ZSch}$ , em função do número de ciclos, para PA 66 ..                           | 52 |
| Figura 39 - Aproximação para cálculo da secção resistente ao corte.....                                                               | 53 |
| Figura 40 - Resistência à fadiga sob contacto rolante, $\sigma_{HlimN}$ , relativamente ao n° de ciclos [51] .....                    | 57 |
| Figura 41 - Legenda das variáveis a utilizar para o procedimento de cálculo .....                                                     | 62 |
| Figura 42 - Influência da distância (L) ao eixo da engrenagem no comprimento de enrolamento de cabo ( $C_d$ ) .....                   | 66 |
| Figura 43 - Influência do número de dentes da roda helicoidal no comprimento de enrolamento de cabo, para $z_1=1$ .....               | 67 |
| Figura 44 - Influência do número de dentes da roda helicoidal no comprimento de enrolamento de cabo, para $z_1=2$ .....               | 67 |
| Figura 45 - Parâmetros iniciais para <i>fine sizing</i> .....                                                                         | 72 |
| Figura 46 - Parafuso sem-fim.....                                                                                                     | 73 |
| Figura 47 - Roda dentada helicoidal .....                                                                                             | 74 |
| Figura 48 - Peça inferior da caixa da engrenagem.....                                                                                 | 74 |
| Figura 49 - Peça superior da caixa da engrenagem .....                                                                                | 75 |
| Figura 50 - Modelo 3D da nova solução de sistema de regulação lombar.....                                                             | 76 |
| Figura 51 - Diagrama de corpo livre da roda helicoidal .....                                                                          | 76 |
| Figura 52 - Diagrama de corpo livre do parafuso sem-fim.....                                                                          | 78 |
| Figura 53 - Diagrama de corpo livre da peça inferior .....                                                                            | 79 |
| Figura 54 - Diagrama de corpo livre da peça superior .....                                                                            | 79 |
| Figura 55 - Protótipo do parafuso sem-fim .....                                                                                       | 82 |
| Figura 56 - Protótipo da roda dentada helicoidal .....                                                                                | 82 |
| Figura 57 - Protótipo da peça inferior.....                                                                                           | 82 |
| Figura 58 - Protótipo da peça superior .....                                                                                          | 83 |
| Figura 59 - Protótipo do sistema de regulação lombar montado.....                                                                     | 83 |
| Figura 60 - Nova peça inferior .....                                                                                                  | 84 |
| Figura 61 - Roda helicoidal com casquilho de ajuste .....                                                                             | 84 |
| Figura 62 - Mesa do banco de ensaios.....                                                                                             | 88 |
| Figura 63 - Pés LSX.A-AS do fabricante <i>Elesa Ganter</i> .....                                                                      | 88 |
| Figura 64 - Vista em corte dos furos cegos roscados para alojar os parafusos na mesa do banco de ensaios.....                         | 89 |
| Figura 65 - Torres de fixação do <i>suspension mat</i> ao banco de ensaios .....                                                      | 90 |
| Figura 66 - Exemplo do tipo de encaixe existente na estrutura de um assento automóvel para o <i>suspension mat</i> .....              | 90 |
| Figura 67 - Sistema de regulação lombar afixado ao banco de ensaios .....                                                             | 91 |
| Figura 68 - Peça pertencente à estrutura metálica de um assento automóvel .....                                                       | 91 |
| Figura 69 - Braço de encaixe.....                                                                                                     | 92 |
| Figura 70 - Placa de forma oval.....                                                                                                  | 92 |
| Figura 71 - Chapa "mini form" .....                                                                                                   | 93 |
| Figura 72 - Banco de ensaios sem aplicação da placa oval .....                                                                        | 93 |
| Figura 73 - Banco de ensaios fixo a uma mesa pré-existente .....                                                                      | 94 |
| Figura 74 - Banco de ensaios montado .....                                                                                            | 94 |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 75 - Representação do ensaio B/C .....                                                                 | 95  |
| Figura 76 - Gráfico do deslocamento em função da força aplicada para a zona dorsal .....                      | 96  |
| Figura 77 - Gráfico do deslocamento em função da força aplicada para a zona lombar .....                      | 97  |
| Figura 78 - Gráfico do deslocamento em função da força aplicada para a zona representativa<br>do ponto H..... | 97  |
| Figura 79 - Representação do ensaio D.1.....                                                                  | 99  |
| Figura 80 - Representação do ensaio D.2.....                                                                  | 99  |
| Figura 81 - Gráfico do binário em função da força aplicada no ensaio D.1 .....                                | 100 |
| Figura 82 - Gráfico do binário em função da força aplicada no cabo, no ensaio D.2 .....                       | 101 |



## Índice de Tabelas

|                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Propriedades dos polímeros mais usados na produção de engrenagens; a) material seco; b) material molhado; c) material húmido [6, 31] .....                            | 17  |
| Tabela 2 - Características tribológicas de polímeros para produção de engrenagens [6, 34, 35] .....                                                                              | 19  |
| Tabela 3 – Principais tipos de avarias em rodas dentadas poliméricas e suas causas [5, 6] .....                                                                                  | 20  |
| Tabela 4 - Valores de contração na moldação por injeção de plásticos; a) X - percentagem de fibra de vidro [32] .....                                                            | 25  |
| Tabela 5 - Resistência química dos materiais: Resistente (+); Parcialmente resistente (o); Não resistente (-) [32] .....                                                         | 31  |
| Tabela 6 - Lubrificação recomendada em função do intervalo de temperaturas de funcionamento [30, 32] .....                                                                       | 33  |
| Tabela 7 - Séries de valores para o módulo normal de engrenagens de dentado reto ou helicoidal [49] .....                                                                        | 44  |
| Tabela 8 - Dados obtidos a partir do <i>benchmarking</i> do sistema .....                                                                                                        | 45  |
| Tabela 9 - Fatores de segurança para materiais plásticos, aplicados pelo <i>software</i> KISSsoft .....                                                                          | 48  |
| Tabela 10 - Fator de aplicação de carga [50] .....                                                                                                                               | 49  |
| Tabela 11 – Gama de coeficientes de atrito para uma engrenagem em aço/plástico lubrificado [44] .....                                                                            | 55  |
| Tabela 12 - Comparação dos principais resultados obtidos através do KISSsoft e da diretiva VDI 2736, para a engrenagem helicoidal de eixos cruzados, constituída por PA 66 ..... | 59  |
| Tabela 13 - Requisitos iniciais estipulados para o sistema de regulação lombar .....                                                                                             | 61  |
| Tabela 14 - Comparação entre os requisitos iniciais e as propriedades da engrenagem inicial .....                                                                                | 62  |
| Tabela 15 - Principais propriedades mecânicas dos materiais em consideração para cálculos segundo a diretiva VDI 2736 teóricos e produção de protótipo [32, 53-55] .....         | 64  |
| Tabela 16 - Comparação dos coeficientes de segurança e eficiência obtidos na engrenagem, para PA 66 e PA 66 + 35 GF, segundo a diretiva VDI 2736 .....                           | 64  |
| Tabela 17 - Principais características da engrenagem para diferentes valores do módulo normal e ângulo da hélice, para PA 66 + 35 GF .....                                       | 69  |
| Tabela 18 - Principais parâmetros de entrada da solução melhorada .....                                                                                                          | 70  |
| Tabela 19 - Coeficientes de segurança e eficiência para os materiais considerados .....                                                                                          | 70  |
| Tabela 20 - Comparação dos principais resultados da nova solução, segundo diretiva VDI 2736 e KISSsoft .....                                                                     | 71  |
| Tabela 21 - Resultados do equilíbrio estático da roda helicoidal .....                                                                                                           | 78  |
| Tabela 22 - Resultados do equilíbrio estático na peça inferior .....                                                                                                             | 80  |
| Tabela 23 - Resultados da tensão aplicada nos apoios da caixa da engrenagem .....                                                                                                | 81  |
| Tabela 24 - Lista de peças desenvolvidas para o banco de ensaios .....                                                                                                           | 87  |
| Tabela 25 - Propriedades mecânicas do alumínio 5754 .....                                                                                                                        | 88  |
| Tabela 26 – Especificações dos pés provenientes do fabricante <i>Elesa Ganter</i> .....                                                                                          | 89  |
| Tabela 28 - Dados obtidos a partir do ensaio D.1 .....                                                                                                                           | 100 |
| Tabela 29 – Dados obtidos a partir do ensaio D.2 .....                                                                                                                           | 101 |



## Símbolos e abreviaturas

### Abreviaturas

FDM - Modelação por extrusão de plástico

SL/SLA - Estereolitografia

TDP - Impressão tridimensional

TPE - Elastómero termoplástico

SLS - Sinterização seletiva por laser

PA - Poliamida

PAO - Óleo lubrificante à base de polialfaolefina

PBT - Polietereftalato de butileno

PE - Polietileno

PEEK - Poli(éter-éter-cetona)

PET - Polietileno tereftalato

PFPE - Óleo lubrificante à base de poliéter perfluorado

POM - Polióxido de metileno

PP - Polipropileno

PPA - Poliftalamida

PPS - Sulfeto de polifenileno

PTFE - Politetrafluoretileno / teflon

PVC - Policloreto de vinilo

X GF – X percentagem de fibra de vidro

X PTFE – X percentagem de teflon

## Símbolos

| Símbolo           | Descrição                                                     | Unidades           |
|-------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------|
| A                 | Área                                                          | mm <sup>2</sup>    |
| A <sub>t</sub>    | Secção resistente ao corte                                    | mm <sup>2</sup>    |
| a                 | Entre-eixo                                                    | mm                 |
| a <sub>h</sub>    | Maior semi-eixo da elipse de contacto                         | mm                 |
| b                 | Largura do dente                                              | mm                 |
| b <sub>h</sub>    | Menor semi-eixo da elipse de contacto                         | -                  |
| b <sub>m</sub>    | Largura de contacto sob o diâmetro de referência              | mm                 |
| b <sub>máx</sub>  | Largura máxima do dente                                       | mm                 |
| C                 | Capacidade de carga                                           | N·mm <sup>-2</sup> |
| C <sub>lim</sub>  | Capacidade de carga limite                                    | N·mm <sup>-2</sup> |
| C <sub>d</sub>    | Comprimento de enrolamento de cabo                            | mm                 |
| d <sub>2</sub>    | Diâmetro primitivo da roda helicoidal                         | mm                 |
| d <sub>a</sub>    | Diâmetro de cabeça                                            | mm                 |
| d <sub>b</sub>    | Diâmetro de base                                              | mm                 |
| d <sub>cabo</sub> | Diâmetro de enrolamento de cabo                               | mm                 |
| d <sub>m1</sub>   | Diâmetro primitivo do parafuso sem-fim                        | mm                 |
| d <sub>s</sub>    | Diâmetro primitivo                                            | mm                 |
| d <sub>x0</sub>   | Diâmetro exterior mínimo                                      | mm                 |
| E                 | Módulo de Young                                               | N·mm <sup>-2</sup> |
| F                 | Força                                                         | N                  |
| F <sub>A</sub>    | Força aplicada                                                | N                  |
| F <sub>c</sub>    | Força no cabo                                                 | N                  |
| F <sub>n</sub>    | Força normal ao dente                                         | N                  |
| F <sub>r</sub>    | Força radial                                                  | N                  |
| F <sub>t</sub>    | Força tangencial                                              | N                  |
| F <sub>x</sub>    | Força axial                                                   | N                  |
| g <sub>an</sub>   | Percurso de contacto no <i>addendum</i>                       | mm                 |
| K <sub>A</sub>    | Fator de aplicação de carga                                   | -                  |
| K <sub>Z</sub>    | Coefficiente do número de dentes                              | -                  |
| L                 | Distância entre eixo da roda helicoidal e ponto médio do cabo | mm                 |
| M <sub>g</sub>    | Momento aplicado na roda helicoidal                           | N·m                |

|                |                                                                                          |                                       |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| $M_s$          | Momento aplicado no parafuso sem-fim                                                     | N·m                                   |
| $m_n$          | Módulo normal                                                                            | mm                                    |
| $m_t$          | Módulo aparente                                                                          | mm                                    |
| $m_x$          | Módulo axial                                                                             | mm                                    |
| $m_{x1}$       | Módulo axial do parafuso sem-fim                                                         | mm                                    |
| $N$            | Número de ciclos                                                                         | -                                     |
| $n$            | Velocidade angular                                                                       | rpm                                   |
| $n_f$          | Número de voltas da roda helicoidal                                                      | -                                     |
| $n_s$          | Número de voltas do parafuso sem-fim                                                     | -                                     |
| $P$            | Perímetro                                                                                | mm                                    |
| $p_b$          | Passo de base                                                                            | mm                                    |
| $q$            | Fator de diâmetros                                                                       | -                                     |
| $S_{at2}$      | Espessura de cabeça da roda helicoidal                                                   | mm                                    |
| $S_C$          | Fator de segurança para a capacidade de carga                                            | -                                     |
| $S_{da1}$      | Espessura do dente no diâmetro do <i>addendum</i> do parafuso sem-fim                    | mm                                    |
| $S_F$          | Fator de segurança no pé do dente                                                        | -                                     |
| $S_H$          | Fator de segurança no flanco do dente                                                    | -                                     |
| $S_{Hmin}$     | Fator de segurança mínimo no flanco do dente                                             | -                                     |
| $S_{t2}$       | Espessura do dente no círculo primitivo da roda helicoidal                               | mm                                    |
| $T$            | Binário                                                                                  | N·m                                   |
| $t_E$          | Tempo efetivo de vida                                                                    | h                                     |
| $u$            | Razão de transmissão                                                                     | -                                     |
| $v_{gs}$       | Velocidade de escorregamento                                                             | m·s <sup>-1</sup>                     |
| $W_{nk}$       | Cota tangencial sobre k dentes                                                           | mm                                    |
| $Y_\epsilon$   | Fator da razão de condução                                                               | -                                     |
| $z$            | Número de dentes                                                                         | -                                     |
| $Z_F$          | Fator do material                                                                        | (N·mm <sup>-2</sup> ) <sup>-1/3</sup> |
| $Z_R$          | Fator da rugosidade superficial                                                          | -                                     |
| $Z_{ES}$       | Fator de contacto – Capacidade de carga do flanco do dente                               | -                                     |
| $\alpha_{at2}$ | Ângulo de pressão no círculo do <i>addendum</i> da roda helicoidal na secção transversal | °                                     |
| $\alpha_n$     | Ângulo de pressão normal                                                                 | °                                     |
| $\alpha_{sn}$  | Ângulo de pressão no círculo da hélice                                                   | °                                     |

|                    |                                                  |                     |
|--------------------|--------------------------------------------------|---------------------|
| $\alpha_t$         | Ângulo de pressão aparente                       | °                   |
| $\alpha_{x0t}$     | Ângulo de pressão na secção transversal          | °                   |
| $\beta$            | Ângulo de hélice                                 | °                   |
| $\beta_b$          | Ângulo de hélice sobre círculo de base           | °                   |
| $\gamma$           | Ângulo do passo                                  | °                   |
| $\gamma_b$         | Ângulo do passo de base                          | °                   |
| $\varepsilon$      | Elongação                                        | %                   |
| $\varepsilon_n$    | Razão de condução                                | -                   |
| $\varepsilon_{nz}$ | Razão de condução em número inteiro              | -                   |
| $\eta$             | Coeficiente do semi-eixo                         | -                   |
| $\eta_{ges}$       | Eficiência total                                 | %                   |
| $\eta_{L1}$        | Eficiência do rolamento do parafuso sem-fim      | %                   |
| $\eta_{L2}$        | Eficiência do rolamento da roda helicoidal       | %                   |
| $\eta_z$           | Rendimento                                       | %                   |
| $\vartheta$        | Ângulo auxiliar                                  | °                   |
| $\mu$              | Coeficiente de atrito                            | -                   |
| $\xi$              | Coeficiente do semi-eixo                         | -                   |
| $\rho$             | Densidade                                        | -                   |
| $\rho_n$           | Raio de curvatura equivalente no ponto da hélice | mm                  |
| $\rho_{n1,2}$      | Raio de curvatura no círculo da hélice           | mm                  |
| $\rho_z$           | Ângulo de atrito                                 | °                   |
| $\delta$           | Decremento logarítmico                           | -                   |
| $\sigma$           | Tensão de cedência                               | MPa                 |
| $\sigma_{HlimN}$   | Resistência à fadiga sob contacto rolante        | N·mm <sup>-2</sup>  |
| $\sigma_{Hm}$      | Pressão de contacto média                        | N·mm <sup>-2</sup>  |
| $\sigma_{HP}$      | Pressão permissível no flanco                    | N·mm <sup>-2</sup>  |
| $\sigma_{ZSch}$    | Resistência à fadiga por tração                  | N·mm <sup>-2</sup>  |
| $\tau_F$           | Tensão de corte nominal                          | N                   |
| $\tau_{Flim}$      | Tensão de corte à fadiga admissível              | N                   |
| $\nu$              | Coeficiente de Poisson                           | -                   |
| $\phi$             | Ângulo do veio                                   | °                   |
| $\omega$           | Velocidade angular                               | rad·s <sup>-1</sup> |
| $\Sigma$           | Ângulo entre os veios                            | °                   |

## 1. Introdução

Devido à constante evolução tecnológica dos veículos atuais, torna-se necessário analisar formas de aumentar o conforto no interior do veículo, e uma das zonas essenciais em que o conforto tem de existir é no assento do condutor. Sistemas de regulação lombar não são novidade nos veículos mais recentes, mas esta é, possivelmente, uma área com grande margem para evolução. Assim sendo, esta dissertação consiste no desenvolvimento de um sistema de regulação lombar capaz de competir com os atualmente existentes.

Com o intuito de estabelecer um primeiro contacto com o mercado de trabalho e adquirir experiência profissional numa área de interesse, esta dissertação foi realizada no Grupo PR, empresa que propôs o tema do trabalho.

### 1.1. Enquadramento do projeto e objetivos

Quer seja por motivos de transporte, trabalho ou conforto, a percentagem de tempo diário que uma pessoa passa sentada é cada vez maior. Como tal, é natural que a população procure soluções que forneçam apoio adicional para as diversas zonas das costas, que contribuam para aumentar o seu conforto ou aliviar o desconforto. Este apoio adicional é maioritariamente procurado para a zona lombar, visto que esta demonstra ser a zona mais problemática na população em geral. Este tipo de apoio pode ser fornecido através de sistemas de regulação lombar, inseridos no próprio assento, sendo que, no caso da indústria automóvel, este tipo de sistemas pode estar interligado à estrutura de apoio traseiro do assento.

Uma das principais áreas de negócio do Grupo PR é a produção de peças sobreinjetadas em cabos, destinadas à indústria automóvel. Mais concretamente, a empresa realiza a dobragem destes cabos e a sobreinjeção de plástico nestes, sendo que o produto final constitui o sistema de apoio traseiro dos assentos automóveis, designado por *suspension mat*.

O tema desta dissertação surgiu com o intuito de potenciar este tipo de produto e, consequentemente, ampliar as possibilidades de negócio no mercado sobre o qual atua.

Neste sentido, os principais objetivos propostos pelo Grupo PR foram os seguintes:

- Análise do estado da arte de sistemas para conforto lombar em assentos automóveis;

- Análise do mercado atual de sistemas de conforto lombar em assentos automóveis;
- Análise de patentes de sistemas de regulação lombar;
- Desenvolvimento de um sistema de regulação lombar para um assento automóvel, cumprindo requisitos de avanço e *performance*;
- Construção de protótipo funcional;
- Testagem da solução criada segundo requisitos da indústria automóvel.

## 1.2. Apresentação da empresa

O Grupo PR é uma empresa sediada no concelho da Maia, distrito do Porto, e está subdividida em várias empresas, sendo cada uma delas especializada num ramo de produção distinto.

A primeira empresa do grupo foi fundada em 1989 e é denominada Tornipeças, dedicando-se exclusivamente à produção de peças metálicas de alta qualidade por torneamento.

Seguidamente, em 2009, o Grupo PR adquiriu a empresa Molcotex, mudando posteriormente o seu nome para PR Metal, sendo esta focada na produção e montagem de equipamentos industriais. Esta empresa possui diversos equipamentos de maquinaria, incluindo equipamentos de eletroerosão, controlo de qualidade e centros de maquinaria com controlo numérico.

Em 2010 foi fundada a empresa PPRR Plásticos SA, especializada na produção de elementos extrudidos em diversos materiais poliméricos, como POM (polióxido de metileno), PP (polipropileno), PVC (policloreto de vinilo), TPE (elastómero termoplástico) e PE (polietileno). Dois anos depois a PR Injeção foi fundada, sendo esta empresa dedicada à microinjeção de Zamak e, em 2014 este grupo adquiriu a empresa Croporto, especializada em tratamentos térmicos para produtos metálicos.

Mais recentemente, em 2016, foi formada uma parceria entre o Grupo PR e a SONAE, em que se definiu o desenvolvimento e produção de um produto eletrodoméstico. Também nesse ano foi fundada a VR Motors, encarregue do desenvolvimento e produção de motores elétricos, especialmente motores SRM (motores de relutância variável).

### 1.3. Estrutura da dissertação

De acordo com os objetivos descritos, a dissertação encontra-se repartida em 7 capítulos:

- **Capítulo 1** – Contextualização da dissertação, enquadramento do projeto, dos objetivos pretendidos e apresentação da empresa onde esta foi realizada.
- **Capítulo 2** – Análise da evolução histórica do conforto nos assentos automóveis. É também realizado um estudo acerca da aplicação de engrenagens poliméricas como meio de transmissão de movimento em sistemas de regulação lombar, explorando as suas características. São ainda analisadas as propriedades únicas das engrenagens helicoidais de eixos cruzados.
- **Capítulo 3** – São analisados os sistemas de regulação lombar utilizados atualmente na indústria automóvel, bem como as patentes que lhes estão associadas.
- **Capítulo 4** – É realizado o *benchmarking* de um sistema de regulação lombar atualmente aplicado na indústria e efetuados cálculos relativos às condições iniciais de funcionamento, geometria, capacidade de carga e eficiência da mesma. Após este estudo, os resultados são verificados com o *software* KISSsoft e é analisada a possibilidade de este sistema cumprir com os requisitos do cliente.
- **Capítulo 5** – É estudada a influência de diversos parâmetros geométricos nos resultados pretendidos, por forma a encontrar uma melhor solução. De seguida, é desenvolvida uma nova solução, seguindo a diretiva VDI 2736, e esta é modelada no *software Inventor*, com as características da capacidade de carga e eficiência melhoradas e uma geometria compacta, com o intuito de cumprir com os requisitos do cliente. É ainda apresentado o protótipo obtido por impressão 3D.
- **Capítulo 6** – É desenvolvido um banco de ensaios para a realização de testes de validação sobre o sistema, assim como um procedimento de ensaios, e são apresentados os resultados obtidos.
- **Capítulo 7** – São expostas as conclusões retiradas da realização do projeto. Por fim, são descritas as perspetivas futuras deste projeto, para que este possa ser aplicado na indústria.



## 2. Estado da arte

### 2.1. O conforto automóvel

As origens de veículos datam de 1672, quando um veículo movido a vapor foi criado como forma de entretenimento para o Imperador da China. No entanto, o primeiro veículo de combustão interna, a gasolina, foi criado por Karl Benz em 1885, sendo que este obteve a sua patente em novembro do ano seguinte. Este veículo, representado na Figura 1, era bastante rudimentar, tendo apenas 3 rodas e conseguindo atingir uma velocidade máxima de 13 km/h.

[1]



Figura 1 - Benz Patent-Motorwagen (*Wikimedia Commons*)

Este veículo era maioritariamente formado por tubos de aço e por madeira, sendo que não possuía tejadilho, deixando os passageiros completamente expostos às condições climáticas. O seu assento, à semelhança dos assentos utilizados em carruagens puxadas a cavalo, tinha lugar para duas pessoas, sendo que possuía ainda encostos revestidos em couro para as costas e braços, dando assim uma aparência luxuosa ao veículo.

A partir daqui os veículos sofreram uma rápida evolução em termos funcionais, estéticos, de segurança e de conforto. Várias melhorias foram alcançadas relativamente à confortabilidade num veículo, sendo possível destacar historicamente alguns desses avanços. Em 1910, a marca Cadillac desenvolveu o primeiro veículo com motor de arranque e cabine totalmente fechada, protegendo assim os passageiros de condições externas e, em 1927, Maurice Aaron obteve a primeira patente, denominada de “*Automobile seat cushion cover*” (patente número 1619556) para um modo de revestir um banco automóvel individual

almofadado. Nesta invenção, o revestimento poderia ser constituído por couro ou outro material igualmente adequado e cobria o topo e as laterais do assento, sendo que as respetivas abas eram costuradas na parte traseira do mesmo para que não fossem visíveis, como representado na Figura 2 [2].

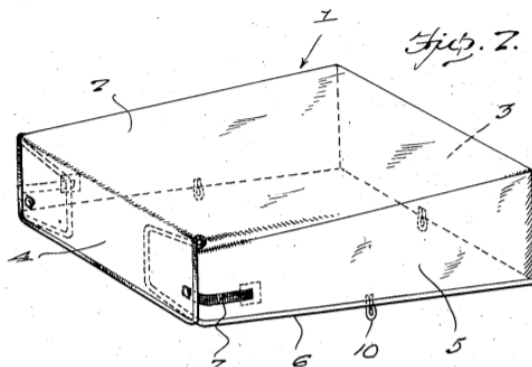


Figura 2 - Vista em perspectiva do primeiro revestimento criado para um assento automóvel [2]

Nas décadas seguintes foram introduzidas mais inovações, como os bancos reclináveis ajustáveis, representados na Figura 3 (cuja patente, com o número 2066901, é denominada de “Ratchet recliner seat back mechanism”), e bancos de potência (bancos em que os ajustes são feitos eletricamente por botões) [3]. Bancos reclináveis ajustáveis surgiram na década de 30 e foram sendo fortemente desenvolvidos em anos posteriores.

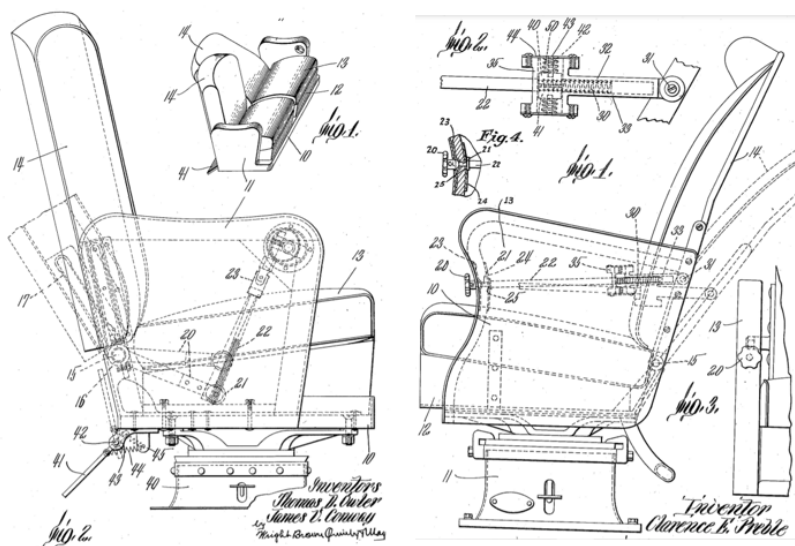


Figura 3 - Exemplos de sistemas desenvolvidos para a inclinação dos assentos, em 1935 (esquerda) e 1937 (direita) [4] [5, 6]

A introdução dos bancos de potência deu-se em 1955 com o modelo Ford Thunderbird (Figura 4), que, com o auxílio de pequenos motores elétricos, permitia o movimento em 4 direções: para a frente, para trás, para cima e para baixo [3].



Figura 4 - Motor elétrico de 12V para banco de potência do primeiro modelo do Ford Thunderbird [7]

No final da década de 60 foram também introduzidos os apoios para a cabeça, tornando as deslocções drasticamente mais seguras e confortáveis. Sem apoio de cabeça o risco de lesão era extremamente elevado e por isso surgiu, em 1989, uma norma de segurança (FMVSS 202) de modo a garantir a restrição do movimento acima da zona do pescoço [8].

## 2.2. Assento automóvel

Um banco automóvel tem quatro funções principais, sendo estas garantir proteção, apoio, postura adequada e confortabilidade ao ocupante [9]. Com o desenvolvimento de todos estes aspetos de um banco automóvel, foi possível concluir que o conforto e segurança geral de um ocupante dependia de vários fatores, estando muitos deles relacionados com a geometria e posição da pessoa relativamente ao assento automóvel. Existem vários tipos de assentos para os vários tipos de veículos de hoje, estando estes representados na Figura 5.

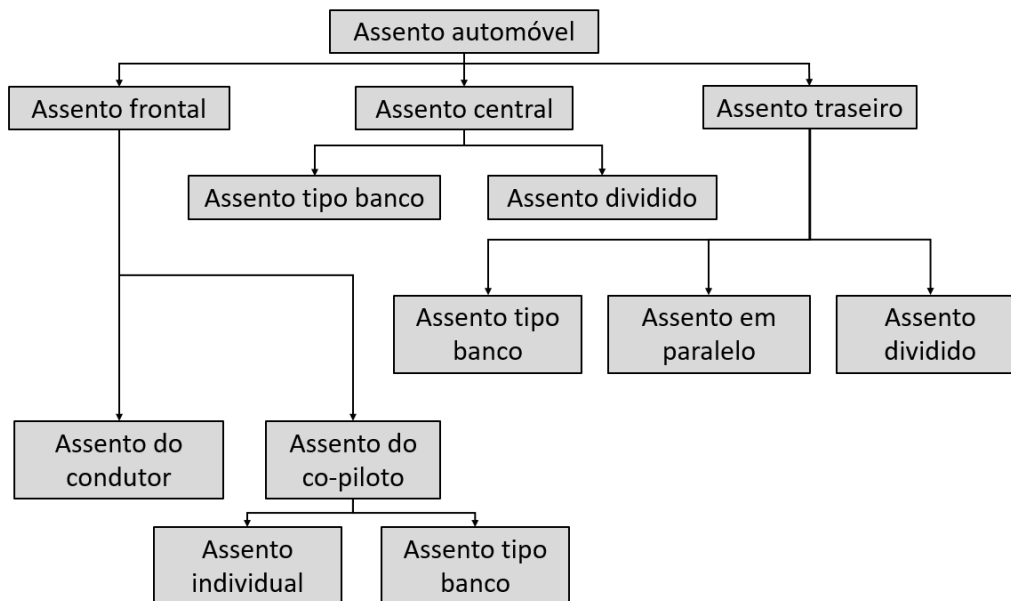


Figura 5 - Diagrama dos diferentes tipos de assentos automóveis [10]

Em qualquer veículo, o assento do condutor é um dos elementos mais importantes, pois é este que define a segurança do mesmo. Deste modo, foi criado um ponto teórico de referência, denominado de ponto H, que representa a posição relativa da anca do ocupante. Este ponto representa ainda hoje um dado crucial para o *design* dos assentos automóveis e dos veículos em si, e está simbolizado na Figura 6.

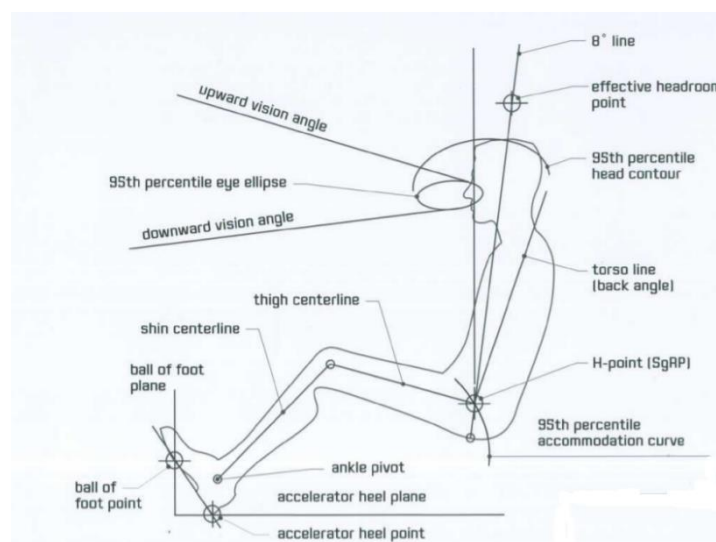


Figura 6 - Fatores a considerar para o *design* de um assento automóvel; Copyright 2014 © H-Point, 2nd Edition by Stuart Macey with Geoff Wardle | Courtesy of Design Studio Press [11]

Desde a década de 90 até aos dias de hoje, a evolução dos assentos automóveis foi drástica, e estes tornaram-se estruturas bastante complexas, por consequência de representarem elementos cruciais para definir o conforto e segurança dos ocupantes, especialmente durante o movimento do veículo. Como tal, por forma a simplificar a constituição de um assento nos dias de hoje, este pode ser dividido em 4 subcomponentes principais, representados na Figura 7: estrutura metálica (*frame*), *suspension mat*, espuma (*foam pad*) e revestimento (*cover*) [12].

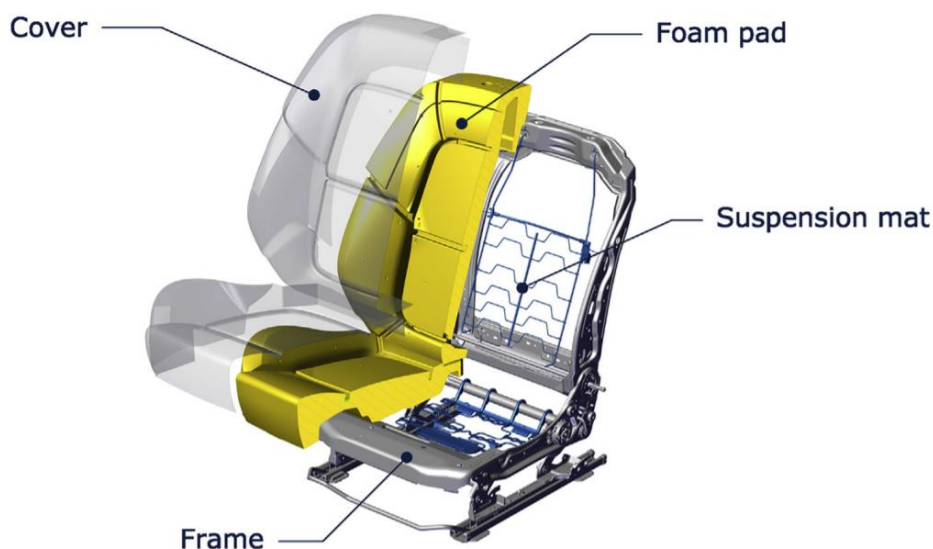


Figura 7 - Principais subcomponentes de um assento automóvel [12]

Cada um destes subcomponentes tem funções específicas, e vários estudos foram realizados para avaliar e comparar o seu comportamento de resposta a vibrações mecânicas, advindas principalmente da rugosidade e atrito existentes na interação entre estrada e pneu, bem como da vibração do motor. Foi realizado um estudo para perceber qual seria o intervalo de valores de frequências de vibração que não causam desconforto ao ocupante, concluindo que estas se situam entre 0,5 e 20 Hz [13].

A estrutura metálica do assento está ligada à restante estrutura do automóvel e tem como funções proteger o condutor, absorvendo a energia originada num eventual acidente e restringindo algum do seu movimento, suportar os restantes elementos constituintes do banco, assim como o ocupante, e estabelecer uma posição confortável para o condutor [3]. Apesar da estrutura absorver a energia resultante de eventuais acidentes, resultados de estudos realizados demonstram que a estrutura metálica tem uma influência negligenciável no amortecimento de vibrações [14]. Deste modo, tornou-se essencial acrescentar elementos ao assento que conferissem maior conforto e proteção para os ocupantes.

*Suspension mats* acrescentam flexibilidade ao assento automóvel, o que é essencial para garantir uma postura adequada e confortável ao condutor, tendo em conta que este ocupante em específico necessita de aceder facilmente a elementos como os pedais, o volante e a consola central, bem como ter uma boa visão da estrada em todos os momentos da condução. Vários estudos foram realizados acerca deste componente, e especificamente na análise do movimento *fore-aft* (longitudinal) de um assento com um *suspension mat* totalmente em plástico, a frequência natural medida na superfície do *suspension mat* atingiu os 34 Hz. Mesmo sendo necessário realizar testes para confirmar os resultados obtidos, foi possível afirmar que um *suspension mat* totalmente em plástico tem pouca influência na absorção de vibrações, quando comparado com a influência da espuma [15]. Apesar de serem necessários estudos adicionais, é inegável que este subcomponente, especialmente quando constituído por arame e plástico sobreinjetado, auxilia na absorção de vibrações, aumentando assim o conforto do ocupante [15, 16].

A espuma garante a confortabilidade do ocupante e auxilia na distribuição da carga entre ocupante e estrutura metálica. Apesar de ser evidente que este subcomponente é bastante eficaz na absorção de vibrações, há parâmetros como a espessura da espuma, composição química e densidade que podem fazer variar drasticamente a transmissibilidade de vibrações. Neste sentido, os resultados obtidos em testes realizados em que se variaram cada um destes parâmetros foi o seguinte:

- O aumento da espessura da espuma resulta numa diminuição da vibração vertical transmitida ao ocupante [17];
- Espumas de elevada durabilidade demonstram uma grande capacidade de amortecimento, especialmente a elevadas frequências de vibração [17];
- O aumento da densidade da espuma permite uma maior absorção de vibrações [18].

No entanto, quando analisados todos estes fatores em conjunto, os resultados deixam de ser tão claros, daí este ser um tópico de análise complexa.

O revestimento permite moldar a geometria da espuma e protegê-la do desgaste, fazendo com que os assentos sejam bastante duráveis. Além disso, este fornece ao ocupante uma superfície que é esteticamente agradável e de simples higienização. No entanto, no que toca à redução da transmissibilidade de vibrações, este subcomponente tem pouca influência [17, 19].

Nos dias de hoje, a espuma é maioritariamente constituída por poliuretano ou espuma com memória de forma [9].

### **2.3. *Suspension mat***

O *suspension mat* (representado na Figura 7) realiza múltiplas funções específicas num assento automóvel, tais como:

- 1) Suportar a espuma do encosto traseiro do assento;
- 2) Conferir flexibilidade ao assento;
- 3) Absorver vibrações provenientes da estrutura do veículo aos ocupantes;
- 4) Definir uma postura correta, especialmente ao condutor, para que este tenha fácil acesso ao volante, pedais e componentes centrais, tenha boa visão da estrada e do que o rodeia e este esteja numa posição confortável;
- 5) Garantir a segurança do ocupante [9].

Todas estas funcionalidades podem ser resumidas em apenas duas, que são garantir a segurança e conforto num assento automóvel.

Este subcomponente é constituído por arames em aço, que são interligados por algum tipo de plástico sobreinjetado. O arame pode ser produzido de dois modos distintos: dá-se o corte do arame para definir o seu comprimento total e depois este é dobrado num só movimento ou em várias etapas, ou então o arame é primeiramente dobrado e, após possuir a forma final, é cortado. Após a produção do arame, este é colocado num molde de injeção, o molde é fechado e dá-se a injeção do plástico [9].

Após a obtenção de um *suspension mat*, há elementos que podem ser adicionados para um aumento do conforto e segurança do condutor. Um desses elementos é precisamente o sistema de regulação lombar, que consiste num cabo Bowden, onde circula um cabo de aço, fixo ao *suspension mat* por elementos plásticos. Este cabo é distendido e contraído através da rotação da engrenagem montada numa extremidade do cabo, que é controlada manualmente ou eletricamente pelo ocupante do assento. O sistema desenvolvido nesta dissertação passa por um modelo de regulação lombar manual, como o representado na Figura 8.

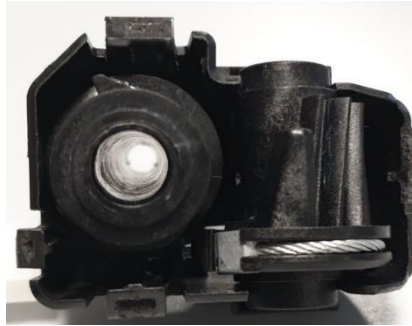


Figura 8 - Sistema de engrenagens com cabo de aço enrolado

## 2.4. Sistemas de transmissão de movimento – Engrenagens

Nos mecanismos, a transmissão ou transformação de movimento pode ser realizada de duas formas distintas: por ligação intermédia ou por contacto directo. No primeiro caso, os órgãos do sistema estão ligados por um corpo intermédio, podendo este ser uma corrente, correia ou barras rígidas, como apresentado na Figura 9 [20].

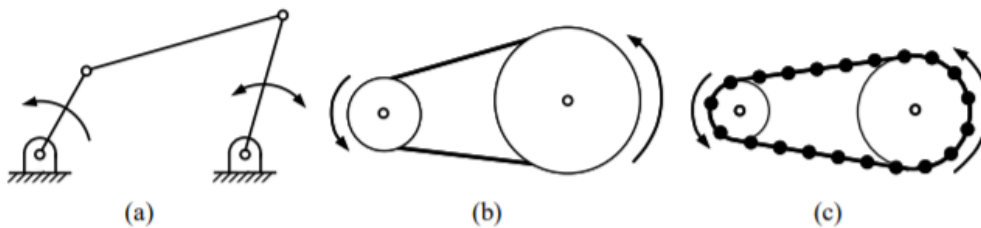


Figura 9 - Sistemas de transmissão de movimento por ligação intermédia: (a) Mecanismo de quatro barras; (b) Transmissão por correia; (c) Transmissão por corrente. [20]

No segundo caso o movimento é promovido pelo contacto entre superfícies, como é o caso de rodas de atrito, engrenagens e mecanismos do tipo came-seguidor (Figura 10) [20].

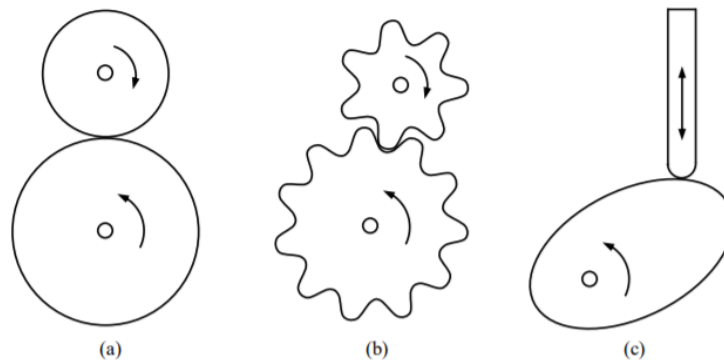


Figura 10 - Sistemas de transmissão por contacto directo: (a) Rodas de atrito; (b) Engrenagens; (c) Mecanismo came-seguidor. [20]

Esta dissertação irá estar centrada sobre um sistema de transmissão mecânica por engrenagens. Uma engrenagem é um conjunto de duas rodas dentadas em que o elemento com maior número de dentes é denominado de roda e o elemento com menor número de dentes é denominado de pinhão. A representação convencional de engrenagens em desenho técnico é realizada de acordo com a norma NP EN ISO 2203 [\[21\]](#).

As engrenagens com perfil em evolvente de círculo têm características que vão de encontro ao que é pretendido obter num sistema de regulação lombar, sendo as principais:

- Elevada resistência a sobrecargas;
- Boa fiabilidade e durabilidade;
- Dimensões de atravancamento reduzidas;
- Razão de transmissão constante e independente das cargas atuantes;
- Boa precisão na transmissão de movimento [\[20\]](#).

### 2.4.1. Classificação quanto à posição dos eixos

A transmissão de movimento por engrenagens constitui uma solução técnica com caráter universal, podendo ser aplicadas entre eixos paralelos, concorrentes ou não-complanares, como simbolizado na Figura 11 [22]. Esta última é usualmente designada por engrenagem esquerda ou torsa, representando assim engrenagens em que os seus eixos não se situam no mesmo plano.

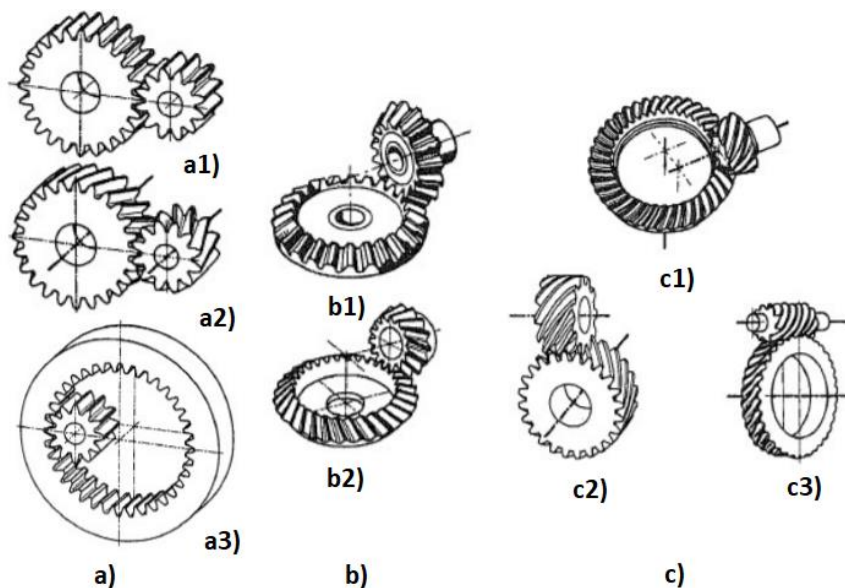


Figura 11 - Exemplos de tipos de engrenagens: a) Paralelas/cilíndricas; b) Concorrentes; c) Esquerdas/Torsas (DIN 3998)

- Engrenagens paralelas podem ser de dentado reto (a1), dentado helicoidal (a2), interiores (a3) ou exteriores (a1 e a2);
- Engrenagens concorrentes/cónicas podem ser de dentado reto (b1) ou helicoidal (b2);
- Engrenagens esquerdas/torsas podem ser de dentado helicoidal, também denominada por engrenagem hipóide (c1), ou de parafuso sem-fim e roda de coroa (c2 e c3) [23].

As engrenagens de eixos cruzados, particularmente engrenagens de parafuso sem-fim e roda de coroa, têm características muito particulares que as tornam bastante interessantes para a sua aplicação no contexto desta dissertação. A sua geometria faz com que este sistema de engrenagens seja o mais compacto de todos, permitindo assim ocupar o menor espaço possível num banco automóvel. Apesar da sua compatibilidade, este sistema permite atingir relações de

transmissão de 100:1 e velocidades na ordem dos 70 m/s. Por último, esta engrenagem pode ser não-reversível, significando assim que a roda não consegue acionar o movimento do pinhão [24]. Esta característica é crucial para que o sistema de regulação lombar se mantenha acionado sem haver reversão do movimento, independentemente da carga a atuar no mesmo. Nestas engrenagens o ângulo formado entre os eixos é, na maioria dos casos, igual a  $90^\circ$  e, consequentemente, as taxas de escorregamento são elevadas. Assim sendo, a eficiência destas engrenagens é baixa (45-70%) e podem apresentar problemas de aquecimento [20].

### 2.4.2. Classificação quanto ao tipo de dentado

Este critério diferencia as engrenagens quanto à forma do dentado. Nesta categoria, existem três tipos de engrenagens distintas:

- Engrenagens de dentado reto;
- Engrenagens de dentado helicoidal;
- Engrenagens de dentado em espiral [20].

Nas engrenagens com dentes helicoidais, como a própria designação indica, os dentes apresentam uma inclinação relativamente ao eixo das rodas, estando dispostos transversalmente, em forma de hélice, em relação a esse eixo. O ângulo de hélice (ângulo de inclinação dos dentes) situa-se, normalmente, num intervalo entre  $15^\circ$  e  $30^\circ$  [25].

Contrariamente às engrenagens de dentes retos, o engrenamento numa engrenagem de dentes inclinados decorre de forma progressiva, ou seja, o engrenamento inicia-se com um contacto pontual que se vai desenvolvendo na mesma medida que o engrenamento, como demonstrado na Figura 12.

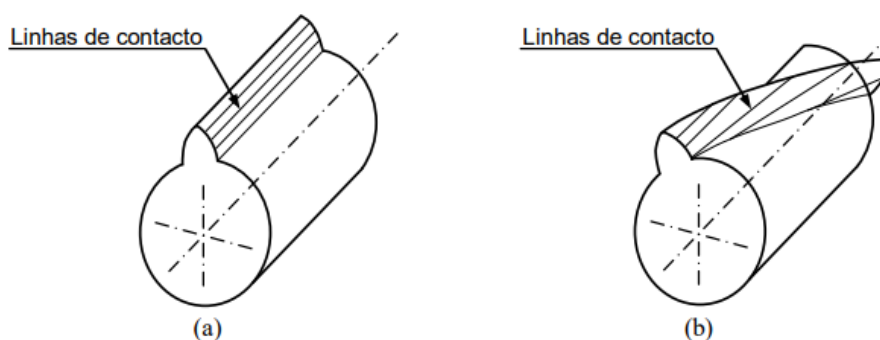


Figura 12 - Linhas de engrenamento em engrenagem cilíndrica de a) dentado reto; b) dentado helicoidal [26]

Isto significa que há, simultaneamente, vários dentes engrenados, fazendo com que as forças de contacto entre os dentes sejam transmitidas de forma gradual. Devido a esta distribuição das forças, as engrenagens cilíndricas de dentes inclinados sofrem um menor desgaste, são mais suaves e o ruído é reduzido, quando comparado com engrenagens de dentado reto. Além disso, estas características permitem que este tipo de engrenagens tenham um elevado rendimento [26]. Por estes motivos, as engrenagens cilíndricas de dentado helicoidal têm particular interesse de aplicação na área automóvel [27].

Como principais desvantagens, as engrenagens cilíndricas de dentado helicoidal desenvolvem esforços axiais durante o seu engrenamento e são, habitualmente, mais dispendiosas [26].

### **2.4.3. Engrenagens poliméricas**

Engrenagens poliméricas surgiram com o intuito de substituir engrenagens metálicas em aplicações com pequenas cargas. Este tipo de engrenagens traz bastantes vantagens na sua utilização, tais como:

- Baixa densidade;
- Baixo custo;
- Baixo ruído em funcionamento/boa absorção de vibrações;
- Capacidade de funcionar com pouca ou nenhuma lubrificação;
- Resistência à corrosão;
- Capacidade de obter geometrias complexas [28].

No entanto, engrenagens poliméricas também têm as suas desvantagens, tais como:

- Baixa resistência ao calor;
- Elevada contração e expansão térmica;
- Elevada higroscopia;
- Baixa capacidade de carga;
- Baixa resistência ao desgaste [28, 29].

Assim, é muito importante analisar o desgaste, alterações na microestrutura da superfície e possíveis danos causados pelo calor em engrenagens poliméricas aplicadas num assento automóvel, para compreender a sua viabilidade.

Todas estas propriedades podem variar consoante o tipo de ambiente em que a engrenagem é utilizada, logo, é crucial conhecer as características circundantes, como por exemplo a temperatura ambiente e nível de humidade [29].

Tendo em conta que no interior de um assento automóvel não há variações extremas de temperatura nem humidade, a carga aplicada na zona lombar é relativamente baixa e que a sua utilização não é muito frequente, a engrenagem polimérica demonstra ser a opção mais sensata. Esta consegue funcionar nas condições ambientais existentes, permite a minimização do peso total do assento devido à baixa densidade do material e é bastante durável, pois o nível de desgaste é baixo (devido à utilização pouco frequente).

Dentro do grupo dos polímeros existem vários materiais que são tipicamente utilizados para a produção de engrenagens, sendo os principais a poliamida 66 (PA 66), poli(éter-éter-cetona) (PEEK), polietileno tereftalato (PET), polióxido de metileno (POM), polietereftalato de butileno, (PBT), sulfeto de polifenileno (PPS) e poliftalamida (PPA) [30]. A alguns destes materiais é adicionada uma percentagem de fibra de vidro, por forma a melhorar as suas propriedades mecânicas, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades dos polímeros mais usados na produção de engrenagens; a) material seco; b) material molhado; c) material húmido [6, 31]

| Propriedades                                    | PA 66       |      | PEEK        | PET         | POM         | PBT         | PPS       | PPA + 30GF |
|-------------------------------------------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------|
| Densidade, $\rho$                               | 1,13 – 1,16 |      | 1,32        | 1,38 – 1,40 | 1,41 – 1,42 | 1,30 – 1,32 | 1,34      | 1,44       |
| Temperatura máxima permitida em contínuo / °C   | 80 – 100    |      | 250         | 100         | 90 – 100    | 100         | 270 – 300 | 150        |
| Temperatura máxima permitida curta duração / °C | 140 – 170   |      | 300         | 170         | 110 – 140   | 160 – 165   | 200 – 240 | 250        |
| Módulo de Young, E / MPa                        | a)          | 300  | 3500 – 3700 | 2100 – 3100 | 2600 – 3200 | 2500 – 2800 | 4000      | 11000      |
|                                                 | b)          | 1600 |             |             |             |             |           | 11000      |
|                                                 | c)          | 800  |             |             |             |             |           | -          |
| Tensão de cedência, $\sigma$ / MPa              | 85          |      |             | 55 – 80     | 60 – 75     | 50 – 60     |           |            |
|                                                 | 60          |      |             |             |             |             |           |            |
|                                                 | -           |      |             |             |             |             |           |            |

PA 66 possui boa resistência elétrica, química e ao desgaste, bem como elevada tenacidade. No entanto, a sua higroscopia é elevada e possui uma menor estabilidade dimensional do que grande parte dos restantes termoplásticos [6, 31]. No caso de PA 66 + 30 GF (adição de 30% de fibra de vidro) as propriedades mecânicas são melhoradas, tendo este componente maior rigidez, resistência à fluência e estabilidade dimensional [32].

PEEK, por sua vez, possui excelentes propriedades mecânicas, bem como elevada resistência térmica e química. Todavia, o seu custo é superior ao da maioria dos restantes materiais, logo, este é uma opção menos viável para produção em massa [6, 30].

PET tem elevada estabilidade dimensional, elevada resistência química e baixa cristalinidade [6, 30, 33].

POM é um polímero bastante vulgar para a produção de engrenagens, pois possui boa resistência química, à fadiga, à fluência e ao desgaste. Além disso, este material é pouco higroscópico (comparando com as poliamidas) e tem um baixo coeficiente de atrito. A sua principal desvantagem é apresentar uma elevada sensibilidade ao calor e a aditivos/impurezas [6, 30, 31]

PBT possui uma baixa higroscopia, elevada durabilidade e rigidez e boa resistência química e ao calor. É ainda um elemento com baixa densidade e boas propriedades elétricas, sendo, portanto, um elemento bastante versátil [6, 30, 31].

PPS apresenta também baixa higroscopia e elevada estabilidade dimensional. A adição de fibra de vidro confere ao material uma melhor resistência ao impacto, à flexão e à tração [6, 30, 31].

Por fim, PPA com 30% de fibra de vidro possui propriedades mecânicas estáveis, independentemente da humidade, tem boa resistência química e é um polímero rígido, mas frágil [6, 30, 32].

Na Tabela 2 encontram-se compiladas as principais características de materiais poliméricos, para uma melhor compreensão das vantagens e desvantagens da utilização de cada um deles.

Tabela 2 - Características tribológicas de polímeros para produção de engrenagens [6, 34, 35]

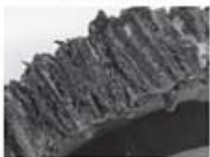
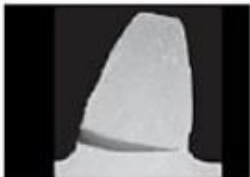
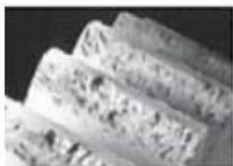
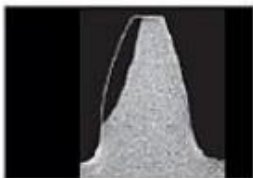
| Material                                                            | Coefficiente de atrito, $\mu$ | Intervalo de temperaturas de funcionamento / °C | Vantagens                                                                                                                                                   | Desvantagens                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Poliamidas alifáticas</b><br>(PA 46, PA 6, PA 66, PA 610, PA 11) | 0,2 - 0,5                     | -40 a 85                                        | Resistência ao desgaste;<br>Resistência a cargas cíclicas.                                                                                                  | Higroscopia elevada; Elevado coeficiente de atrito; Baixa estabilidade dimensional. |
| <b>Poliamidas aromáticas</b>                                        | 0,1 - 0,3                     | -100 a 200                                      | Resistência ao desgaste;<br>Resistência a cargas cíclicas; Estabilidade térmica.                                                                            | Custo elevado;<br>Higroscopia elevada.                                              |
| <b>Policarbonatos</b>                                               | 0,2 - 0,5                     | -60 a 125                                       | Resistência mecânica;<br>Estabilidade dimensional.                                                                                                          | Baixa resistência à fadiga.                                                         |
| <b>Poliacetil (POM)</b>                                             | 0,1 - 0,3                     | -50 a 120                                       | Resistência ao desgaste, química e à fadiga;<br>Estabilidade dimensional;<br>Resistência a cargas cíclicas; Baixa higroscopia; Baixo coeficiente de atrito. | Baixa resistência térmica (ao calor); Sensível a aditivos / impurezas.              |
| <b>Polietileno tereftalato (PET)</b>                                | 0,1 - 0,3                     | -20 a 115                                       | Resistência a fatores ambientais; Estabilidade dimensional; Elevada resistência química.                                                                    | Sensível a água quente;<br>Baixa cristalinidade.                                    |
| <b>Elastômeros termoplásticos</b>                                   | 0,3 - 0,6                     | -60 a 120                                       | Elasticidade.                                                                                                                                               | Elevado coeficiente de atrito; Baixa resistência mecânica.                          |
| <b>Poli(éter-éter-cetona) (PEEK)</b>                                | 0,2 - 0,4                     | -30 a 250                                       | Resistência térmica;<br>Resistência química;<br>Resistência à radiação.                                                                                     | Custo elevado.                                                                      |
| <b>Sulfeto de polifenileno (PPS)</b>                                | 0,2 - 0,5                     | -30 a 220                                       | Resistência ao desgaste;<br>Resistência a cargas cíclicas; Baixa higroscopia; Estabilidade dimensional.                                                     | Custo elevado.                                                                      |

#### 2.4.4. Falhas nas rodas dentadas poliméricas

Defeitos causados no dentado devem-se maioritariamente a choques entre as rodas ou outros objetos, à fluência e/ou a propriedades do material, como a baixa tensão de cedência [6, 36].

Para uma melhor perceção das avarias que podem ocorrer, os principais tipos de avarias estão representados na Tabela 3, assim como as causas de cada uma delas, tanto para dentado reto como helicoidal.

Tabela 3 – Principais tipos de avarias em rodas dentadas poliméricas e suas causas [5, 6]

| Falha                      | Dentado reto                                                                        | Dentado helicoidal                                                                   | Principais causas                                                                                            |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fusão parcial              |    |    | Temperatura excessiva dos flancos do dente.                                                                  |
| Fratura no pé do dente     |   |   | Carga demasiado elevada. (Imagens da esquerda e direita em cima: Flexão; Imagem da direita em baixo: Corte). |
| Fratura no flanco do dente |  |  | Pressão de contacto elevada, combinada com esforços de flexão                                                |
| Pitting                    |  |  | Pressão de contacto elevada                                                                                  |
| Desgaste do dente          |  |  | Baixa resistência ao desgaste                                                                                |
| Deformação do dente        |  |  | Deformação excessiva devido a cargas elevadas                                                                |

Através da contínua aplicação de uma carga no dentado, este aumenta a sua deformação. No entanto, quando a carga é retirada, o plástico consegue, eventualmente, recuperar a forma inicial, devido ao seu comportamento viscoelástico. Esta deformação é representada pela curva tensão-deformação da Figura 13.

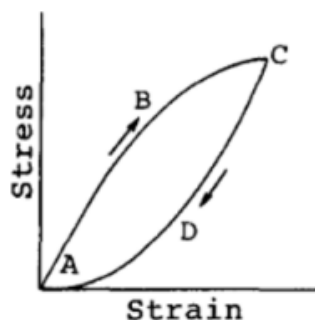


Figura 13 - Ciclo de histerese do plástico [37]

Quando uma tensão em A é aplicada, ocorre uma deformação que segue a tendência da curva B-C, com o aumento da tensão. Quando a tensão é removida em C, a deformação reduz seguindo a curva C-D, até voltar ao ponto A. A área do ciclo ABCDA representa a energia perdida sob a forma de calor, que contribui para o aumento da temperatura no dentado [37].

Quando a carga aplicada é demasiado elevada, ocorre deformação plástica do material, sendo que, nestes casos, o dentado não consegue recuperar a sua geometria inicial [37].

#### 2.4.5. Seleção de materiais

É muito importante conhecer a capacidade de carga das engrenagens para determinar se são adequadas a desempenhar a função pretendida. Para engrenagens metálicas existem cálculos padronizados que permitem determinar a sua capacidade de carga, como as normas DIN 3990 e ISO 6336, no entanto, o mesmo não acontece para engrenagens poliméricas. Estas últimas apresentam um comportamento bastante complexo, tendo em conta que são sensíveis a temperaturas elevadas e podem exibir falhas de diversos tipos, simultaneamente. Apesar da complexidade, existe uma diretiva que auxilia no dimensionamento de engrenagens poliméricas, VDI 2736, que apresenta cálculos dimensionais tendo em conta a temperatura de funcionamento e o cálculo do desgaste obtido. No entanto, esta diretiva está limitada a um

conjunto muito restrito de materiais, continuando assim a existir um entrave no desenvolvimento de engrenagens poliméricas [38].

O funcionamento adequado de uma engrenagem polimérica depende da escolha do plástico apropriado e da capacidade de utilizar as suas propriedades do modo pretendido. Há vários fatores que provocam a alteração dessas propriedades, como tal, existem certas características que ajudam a restringir esta escolha, tais como o tipo de lubrificante a utilizar, interna e externamente, tipos de falhas mais comuns do material em rodas dentadas, tipos de cargas aplicadas, ambiente circundante, o contacto com agentes químicos e o custo do material, como representado na Figura 14. Deste modo, acaba sempre por haver um compromisso entre o material seleccionado e os requisitos pretendidos [32, 38].

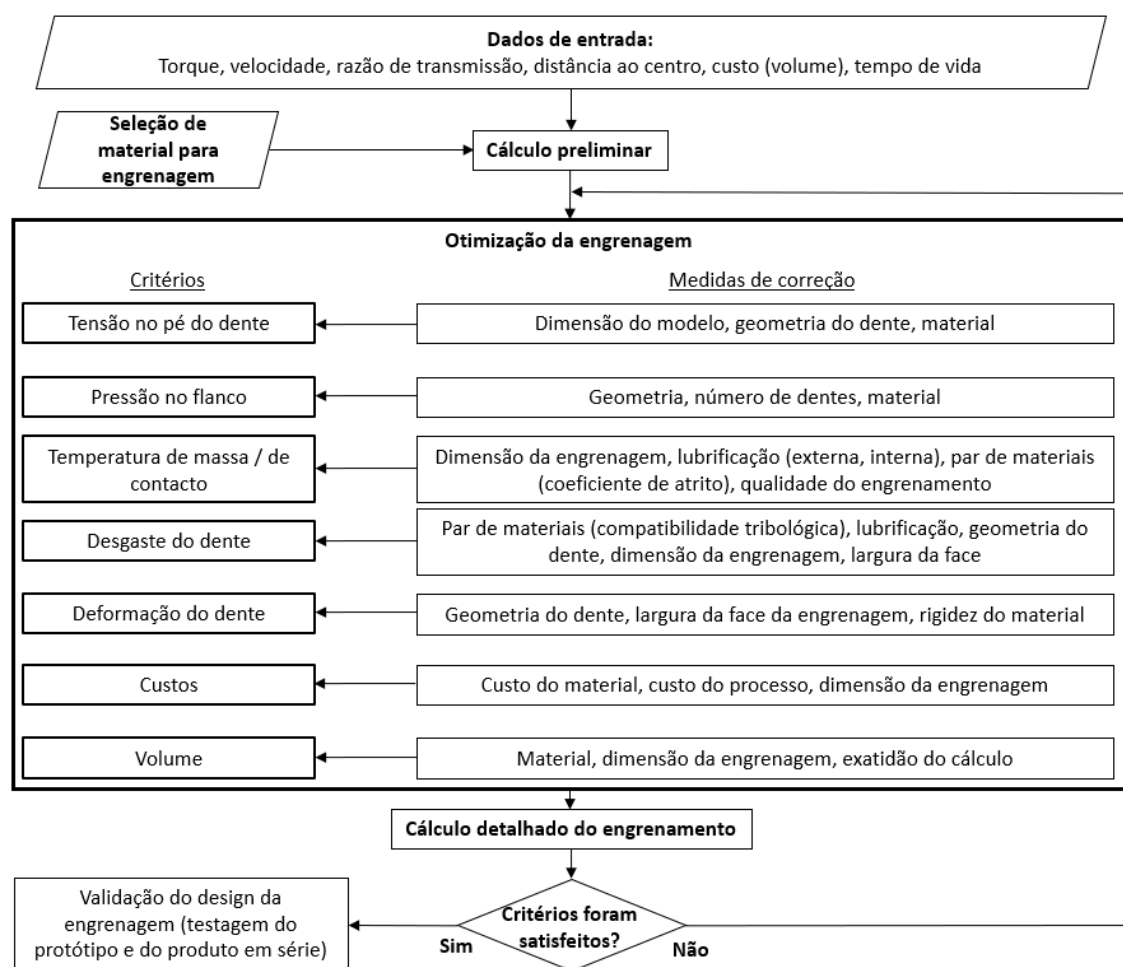


Figura 14 - Fluxograma para otimização de engrenagens e critérios que influenciam o seu design [38]

Polímeros de ótima qualidade apresentam elevada resistência ao corte, à flexão, à compressão e ao desgaste, bem como boa rigidez e baixo coeficiente de atrito.

Engrenagens poliméricas conseguem funcionar sem lubrificação, no entanto, quando estas trabalham a velocidades e binários elevados, atingem temperaturas bastante elevadas, provocando o rápido desgaste dos dentes das rodas dentadas. Assim, caso seja pretendido que a engrenagem polimérica funcione sem lubrificação, esta deve possuir boa estabilidade dimensional a elevadas temperaturas. Na hipótese de funcionamento sem lubrificação externa, as principais falhas dão-se usualmente ao nível do desgaste ou do coeficiente de atrito [32].

Engrenagens poliméricas com uma elevada rigidez são preferencialmente utilizadas para funções em que a carga aplicada é elevada e a velocidade angular é baixa. Este material deve ainda ser reforçado com fibra de vidro para melhorar as suas propriedades mecânicas [32].

No caso de não haver lubrificação, é muito provável que ocorra deformação plástica dos dentes e desgaste dos mesmos, podendo até ocorrer a sua fratura [38].

Para uma carga e velocidade angular elevadas, o atrito entre dentes é proeminente e provoca um rápido sobreaquecimento das rodas dentadas. Por este motivo, as engrenagens devem ter uma elevada estabilidade dimensional a elevadas temperaturas. No caso destas trabalharem sem lubrificação, é importante que tenham bom comportamento ao atrito e boas propriedades mecânicas tribológicas [32].

Em situações em que a carga aplicada é elevada, mas a velocidade angular é baixa, é esperado que uma engrenagem polimérica provoque bastante ruído. Deste modo, é importante que o material selecionado tenha uma elevada capacidade de amortecimento, para que o ruído seja minimizado [32].

Para uma carga aplicada de baixa intensidade durante um longo período de funcionamento e sem lubrificação, ocorrem maioritariamente falhas provocadas pela fadiga no pé do dente, desgaste dos dentes e/ou formação de fissuras. No caso da engrenagem ser lubrificada, poderão ocorrer fraturas provocadas pela fadiga entre a zona do primitivo e da cabeça, bem como *pitting* (ver Tabela 3) [38].

Na inversão do sentido de rotação de uma engrenagem são originadas forças de impacto. Para estes casos, as rodas dentadas poliméricas devem ter uma elevada resistência ao impacto e bom amortecimento. Por exemplo, no caso do policarbonato, este possui uma resistência à flexão baixa, logo, apenas pode ser utilizado para situações de baixas cargas aplicadas, assim como velocidades reduzidas [32].

Tendo em conta todos estes requisitos, as poliamidas (PA) e polióxido de metileno (POM) constituem aproximadamente 85% do material utilizado na produção de engrenagens em termoplástico [37].

#### 2.4.6. Processos de fabrico

Os principais métodos para produção de engrenagens em termoplástico são a moldação por injeção, fusão e maquinagem. A escolha do processo adequado depende essencialmente do material escolhido, da qualidade dos dentes requerida e do número, geometria e dimensões das rodas solicitadas [32].

##### Moldação por injeção

Neste processo, o termoplástico é fundido e injetado a altas pressões para a cavidade do molde com o auxílio de um parafuso que torna a mistura homogénea, como demonstrado na Figura 15.

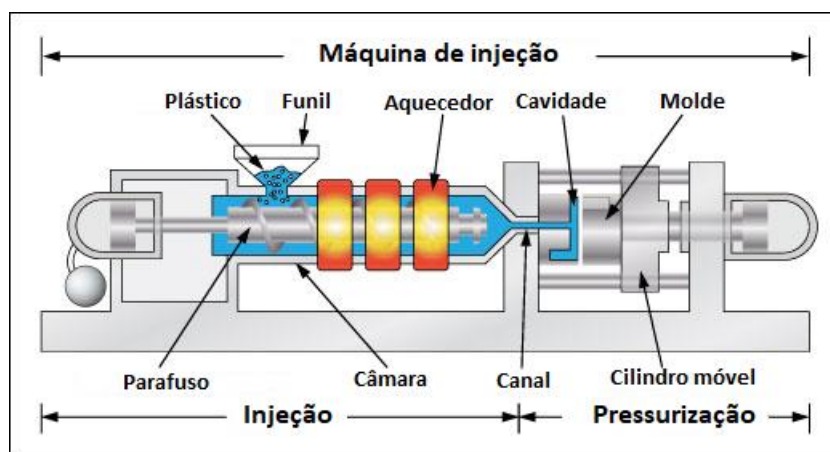


Figura 15 - Legenda de uma máquina de injeção de plástico [39]

Devido a estas condições, este método permite obter engrenagens com formas complexas e elevada precisão dimensional. Assim como noutros materiais, o termoplástico sofre alguma contração devido ao arrefecimento, estando a percentagem de contração representada na Tabela 4. Esta contração é principalmente influenciada pela temperatura de aquecimento inicial, temperatura da superfície da cavidade do molde (onde há contacto com o termoplástico),

a pressão na cavidade, localização e tamanho do ponto de injeção, fluxo de injeção e o tempo de aplicação da pressão [32].

Tabela 4 - Valores de contração na moldação por injeção de plásticos; a) X - percentagem de fibra de vidro [32]

| Plástico                                           | Abreviatura                | Contração<br>fortemente<br>restringida<br>/ % | Contração livre (%)<br>para uma espessura<br>de parede: |           |
|----------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------|
|                                                    |                            |                                               | < 4 mm                                                  | > 4 mm    |
| <b>Poliamida 66</b>                                | PA 66                      | 1,2                                           | 1,8                                                     | 2,2       |
| <b>Poliamida 66 com 25 a 35% de fibra de vidro</b> | PA 66 + GF X <sup>a)</sup> | 0,2                                           | 0,8                                                     | 0,8       |
| <b>Poli(éter-éter-cetona)</b>                      | PEEK                       | -                                             | 1,2 - 1,7                                               | 1,7 - 2,2 |
| <b>Polietileno tereftalato</b>                     | PET                        | 1,2                                           | 1,8                                                     | 2,0       |
| <b>Polióxido de metileno</b>                       | POM                        | 1,5                                           | 2,2                                                     | 2,5       |
| <b>Politereftalato de butileno</b>                 | PBT                        | 1,2                                           | 1,8                                                     | 2,0       |

Caso o molde se encontre a uma elevada temperatura, ajustada em relação aos outros parâmetros indicados, a contração pode ser minimizada de tal forma que um tratamento térmico de recozimento posterior seja desnecessário [32].

Para grandes séries, a produção de rodas dentadas por moldação por injeção é economicamente viável. Este processo garante uma elevada precisão dimensional, bem como liberdade na geometria das engrenagens. Caso seja exigida uma elevada qualidade do dentado, estes objetos podem ainda ser sujeitos a um processo de maquinagem posterior. Quanto maior for a espessura de parede das rodas dentadas, maior é o tempo de ciclo de produção, por isso, este processo é recomendado para a produção de engrenagens com espessuras até 10 mm. O reforço com fibra de vidro faz com que a peça contraia menos durante o arrefecimento e se torne independente da espessura de parede, no entanto, este fator depende também da direção das fibras de vidro, que têm grande influência na contração [32].

### Fusão

A fusão é um processo bastante simplista, sendo apenas necessário um molde aquecido, para onde o material fundido é vazado. Este molde pode ser em metal (para grandes séries de produção, pois tem um custo bastante elevado e é reutilizável) ou em plástico ou areia (para pequenas séries de produção, pois são mais baratos e não reutilizáveis). O processo de fusão é indicado para a produção de engrenagens poliméricas de grandes dimensões e peso superior a 1 kg [32].

No caso das poliamidas, a contração no arrefecimento situa-se entre 2 e 4%, tornando a correção do molde bastante complexo. Assim, a peça é produzida com uma rugosidade elevada no dentado, que é posteriormente maquinado. A fusão centrífuga garante um melhor preenchimento do molde e reduz a contração deste tipo de materiais para um intervalo entre 1 e 2%, fazendo com que um processo de maquinagem posterior seja desnecessário. Este método é mais oneroso, justificando-se a sua utilização apenas para a produção de engrenagens em grandes quantidades [32].

### Maquinagem

À semelhança de maquinagem de engrenagens metálicas, na maquinagem de termoplásticos o material é cortado com o auxílio de ferramentas de corte, em que as forças de corte aplicadas são tão baixas que, usualmente, o acabamento superficial é realizado numa só operação de corte. O processo de maquinagem utiliza ferramentas com custo bastante inferior às utilizadas na moldação por injeção e, deste modo, este processo é especialmente adequado para produções em pequenas ou médias séries. As peças produzidas são de excelente qualidade, considerando que o tempo de produção é curto, devido às elevadas velocidades de corte (400 m/min) e de avanço (entre 1,55 e 3,5 mm/rev). As ferramentas a utilizar na maquinagem de peças metálicas são também adequadas para maquinar peças plásticas, sendo que a qualidade superficial depende apenas da qualidade da ponta da ferramenta de corte: quanto mais afiada esta for, melhor será a qualidade superficial da peça final. No entanto, ferramentas previamente utilizadas para maquinagem de peças metálicas não podem ser utilizadas para maquinar polímeros, correndo o risco de obter peças com fraca qualidade superficial [32].

### 2.4.7. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas de um polímero não dependem apenas do material, mas também das características circundantes, sendo por isso crucial comparar todos os materiais através de testes realizados nas mesmas condições. A temperatura, humidade, características da carga aplicada e processo de produção têm uma grande influência nas propriedades de uma engrenagem polimérica [32].

O aumento da temperatura enfraquece as ligações moleculares entre os plásticos, diminuindo a sua rigidez (Figura 16). Além disso, altas temperaturas favorecem a absorção de água por parte dos polímeros. A humidade, por sua vez, provoca uma diminuição do módulo de elasticidade e da tensão de cedência deste tipo de materiais (Figura 16 e Figura 17) [32].

Comparando a Figura 16 e Figura 17 é possível observar que a adição de fibra de vidro faz o polímero aumentar drasticamente o seu módulo de elasticidade, ou seja, a sua rigidez. Além disso, a resistência a temperaturas elevadas também aumenta consideravelmente, tornando-se assim num polímero com propriedades mecânicas mais apelativas.

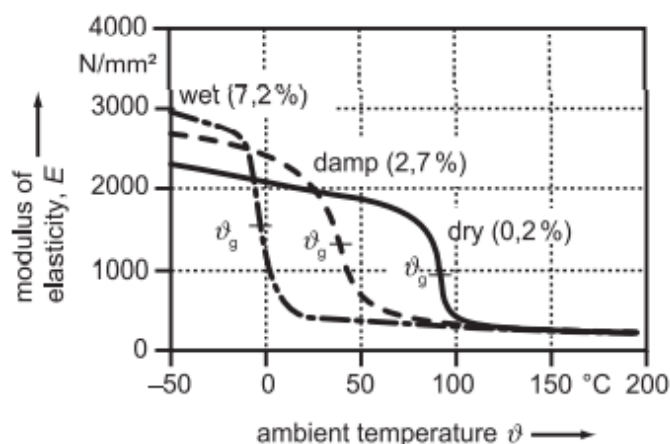


Figura 16 - Influência da temperatura e humidade no módulo de elasticidade (PA 66) [32]

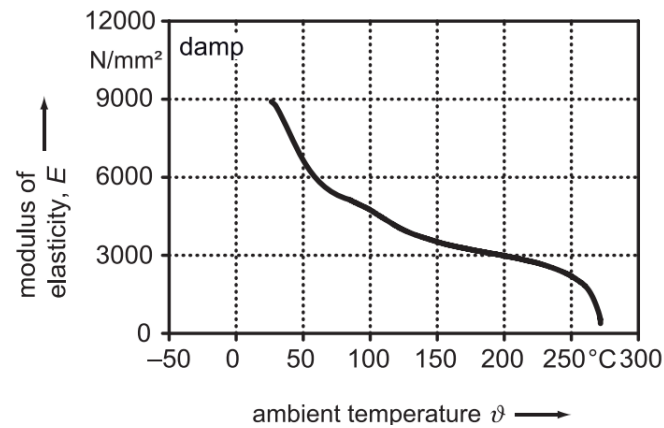


Figura 17 - Influência da temperatura e umidade no módulo de elasticidade (PA 66 + 30 GF) [32]

Pela comparação da Figura 18 e Figura 19 pode-se afirmar que a adição de fibra de vidro ao polímero PA 66 torna o material muito mais resistente à tração (tensão de cedência duplica, para o mesmo nível de umidade e alongação) e, mais uma vez, o material torna-se bastante mais rígido.

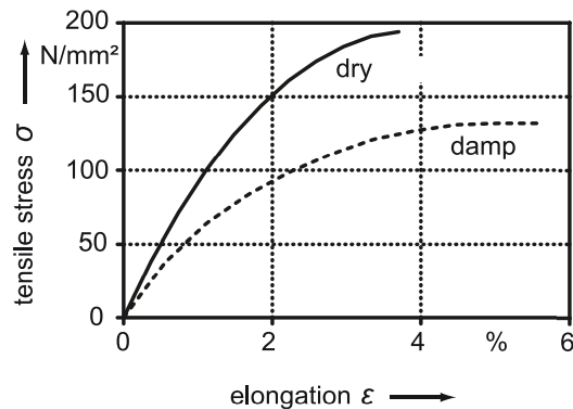


Figura 18 - Influência da umidade na curva tensão-deformação (PA 66) [32]

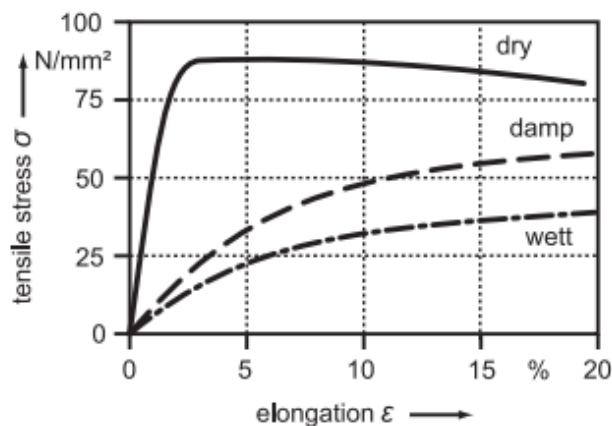


Figura 19 - Influência da umidade na curva tensão-deformação (PA 66 + 30 GF) [32]

Outra característica relevante para análise dentro do grupo dos polímeros para rodas dentadas é o amortecimento, pois é a partir do conhecimento desta propriedade que se consegue diminuir o ruído produzido pelo sistema. O amortecimento de um sistema pode ser caracterizado pelo decremento logarítmico,  $\delta$ , que se define como sendo a taxa de atenuação de amplitude de vibração livre amortecida [40].

Materiais com um elevado valor de decremento logarítmico têm uma excelente capacidade de absorver energia, enquanto que materiais com um valor de decremento logarítmico igual a zero representam materiais com um comportamento completamente elástico, como demonstrado na Figura 20 [32].

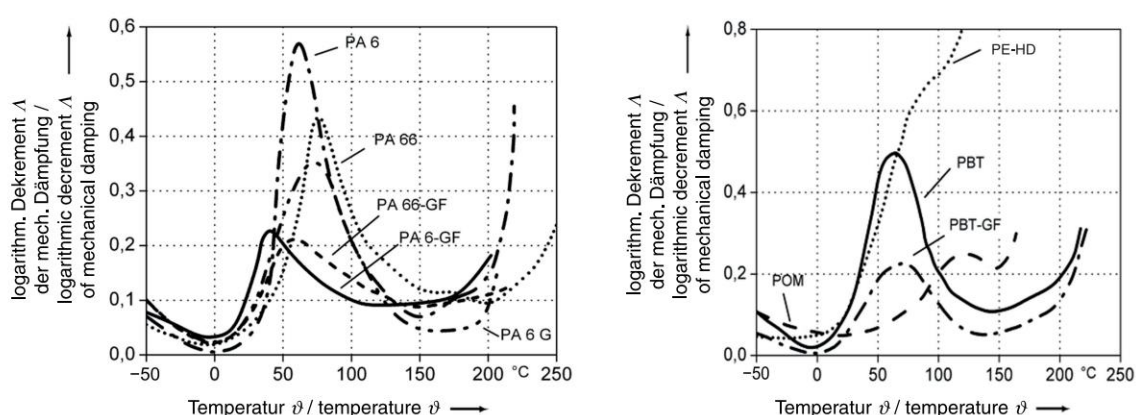


Figura 20 - Influência da temperatura no decremento logarítmico de materiais poliméricos [32]

#### 2.4.8. Resistência térmica

A temperatura pode provocar alterações dimensionais numa engrenagem polimérica, influenciando assim a qualidade da transmissão de movimento (Figura 21) [32].

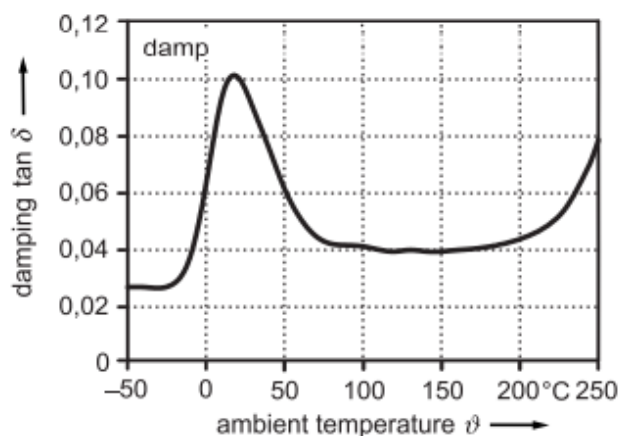


Figura 21 - Influência da temperatura no amortecimento (PA 66) [32]

A adição de fibra de vidro reduz esta deformação provocada pela variação de temperatura. A condutividade térmica dos polímeros é substancialmente inferior à dos metais, sendo assim mais difícil dissipar o calor gerado durante o funcionamento do engrenamento. Certos aditivos com boa condutividade térmica como metais, cerâmica e grafite podem ser adicionados por forma a melhorar esta propriedade, no entanto, estes têm também influência no desgaste sofrido pelos polímeros [32].

Se a temperatura de funcionamento for ultrapassada durante um extenso período de tempo, a estrutura polimérica é afetada, alterando irreversivelmente a capacidade de carga da engrenagem. Polímeros com aditivos que os tornem mais estáveis na presença de calor, desenvolvem mais lentamente esta alteração na capacidade de carga, como é notório na Figura 22.

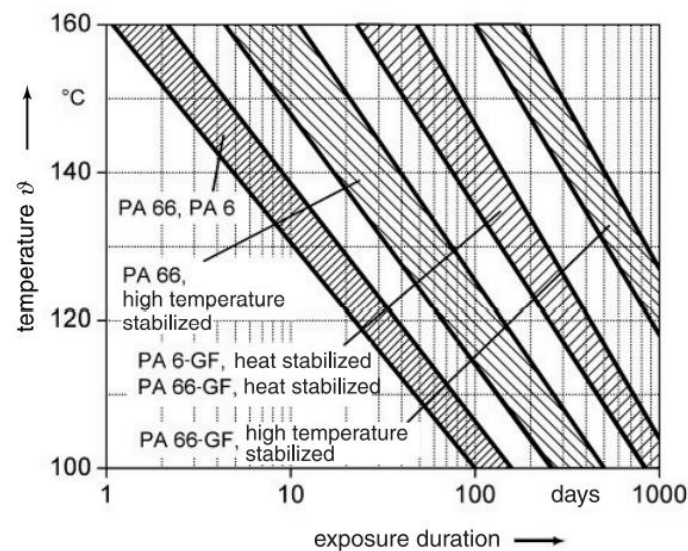


Figura 22 - Influência de estabilizadores térmicos em PA 6 e PA 66, com e sem fibra de vidro, no tempo de vida da roda dentada [32]

### 2.4.9. Resistência química

Na presença de agentes químicos, os plásticos podem sofrer alterações estruturais, provocando assim a alteração de propriedades mecânicas e até alterações dimensionais. Assim sendo, este é um tópico de importante análise, e a resistência dos polímeros evidenciados anteriormente a diversos agentes químicos está evidenciada na Tabela 5.

Tabela 5 - Resistência química dos materiais: Resistente (+); Parcialmente resistente (o); Não resistente (-) [32]

| Composto químico |                       | POM | PA 66 | PA 46 | PPA | PET | PBT | PEEK | PPS | PF |
|------------------|-----------------------|-----|-------|-------|-----|-----|-----|------|-----|----|
| Álcoois          | Metanol               | +   | o     | +     | +   | +   | +   | +    | +   | +  |
|                  | Etanol                | +   | o     | +     | +   | +   | +   | +    |     | +  |
|                  | Propanol              | +   | o     | +     | +   | +   | +   | +    |     |    |
| Água             | Fria                  | +   | +     | +     | +   | +   | +   | +    | +   | +  |
|                  | Quente                | o   | o     | o     |     | -   | -   | +    | o   | o  |
| Combustíveis     | Petróleo              | +   | +     | +     | +   | +   | +   | +    | +   | o  |
|                  | Diesel                | +   | +     | +     | +   | +   | +   | +    | +   |    |
| Ácidos           | Ácido clorídrico      | -   | -     | -     | -   | -   | o   | o    |     |    |
|                  | Ácido sulfúrico       | -   | -     | -     | -   | -   | -   | -    |     |    |
|                  | Ácido acético         | -   | -     | -     | -   | -   | -   | +    |     |    |
|                  | Concentrado           | -   | -     |       | -   | o   | -   | o    |     | -  |
|                  | Diluído               | o   | -     |       | -   | +   | o   | +    |     | o  |
| Alcalinos        | Hidróxido de potássio | +   | +     |       |     | -   | -   | +    |     |    |
|                  | Hidróxido de sódio    | +   | +     |       |     |     | -   | +    |     |    |
|                  | Hidróxido de amónio   | +   | o     |       |     | o   | o   | +    |     |    |
|                  | Concentrado           | +   | o     |       | +   | -   | +   | +    |     | -  |
|                  | Diluído               | +   | o     |       | o   | o   | +   | +    |     | o  |

### 2.4.10. Desgaste

Os principais tipos de desgaste que ocorrem no dentado são o desgaste mecânico (por escorregamento) e erosão [34]. Em todos estes, o desgaste altera a superfície do dentado e reduz a área da secção reta dos dentes [32]. A ocorrência de desgaste pode ser dividida em três etapas distintas, sendo estas a rodagem, desgaste linear e desgaste final rápido. Na primeira etapa ocorre um desgaste consideravelmente elevado, num curto período de tempo. Na segunda parte do processo ocorre pouco desgaste mas de forma progressiva, e na última etapa ocorre um rápido desgaste do dente [41]. A Figura 23 representa os resultados obtidos num teste realizado com quatro combinações de materiais diferentes, em que N representa Nylon (PA) e A representa Acetal (POM), sendo que a primeira letra do conjunto se refere ao material da roda mandante. Os testes foram inteiramente realizados com um binário de 10 N·m e uma velocidade angular de 1000 min<sup>-1</sup> [41].

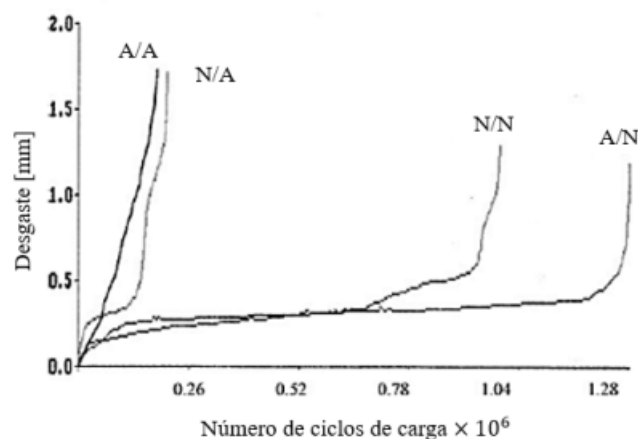


Figura 23 - Evolução do desgaste em função dos materiais da engrenagem [41]

Através desta figura é possível aferir que apenas no caso de N/N e A/N ocorrem as três etapas de desgaste, enquanto nos restantes casos ocorre um rápido desgaste praticamente desde o início da testagem. Concluindo, a escolha do material para a roda mandante é crucial, pois a combinação A/N aumenta o tempo de vida da engrenagem, comparativamente à combinação N/A [41].

### 2.4.11. Lubrificação

Como referido anteriormente, uma das vantagens das engrenagens poliméricas é a possibilidade de funcionarem com pouca ou nenhuma lubrificação. No entanto, a sua utilização tem a vantagem de melhorar consideravelmente a *performance* das engrenagens, ao influenciar o atrito, ruído e desgaste provocado nas rodas dentadas [6].

A lubrificação pode ser de dois tipos: interna ou externa. Quanto à lubrificação interna, consiste na adição de aditivos ao material da engrenagem para que, durante o processo de produção, estes sejam libertados para a interface entre o polímero e outra superfície do equipamento. A película formada previne a adesão das superfícies da engrenagem, facilitando o processo de produção, e permite a redução do atrito no engrenamento, o que diminui o seu desgaste, aumentando assim o tempo de vida das rodas dentadas [6].

#### Óleos

O tipo de óleo a seleccionar depende da temperatura de funcionamento da engrenagem, bem como do material que a constitui, como demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Lubrificação recomendada em função do intervalo de temperaturas de funcionamento [30, 32]

| Temperatura de funcionamento / °C | Lubrificante aconselhado       |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| [-80;20]                          | Óleos sintéticos               |
| [20;60]                           | Óleos minerais                 |
| [60;100]                          | PAO, óleos de éster            |
| [100;120]                         | Óleos de éster, silicone, PFPE |

Os termoplásticos mais utilizados para a produção de engrenagens são poliamidas (PA) e polióxido de metileno (POM), e são ambos polímeros polares. Nestes casos, se possível, é recomendada a utilização de lubrificantes não-polares, como por exemplo, PAO. O inverso também se aplica, ou seja, para engrenagens constituídas por polímeros não-polares, devem-se utilizar lubrificantes polares [32].

### Massas lubrificantes

Este tipo de lubrificante tem como base óleos minerais ou sintéticos, havendo diferenças entre os dois. Massas minerais contêm um maior coeficiente de piezoviscosidade, podendo assim ter uma maior capacidade de lubrificação, enquanto que massas sintéticas são mais resistentes ao envelhecimento. Para velocidades circunferenciais superiores a 5 m/s, existe o risco da massa lubrificante ser projetada para fora dos flancos dos dentes, prejudicando assim a lubrificação [6, 32].

#### **2.4.12. Engrenagem helicoidal de eixos cruzados**

Dentro dos vários tipos de engrenagens existentes, o parafuso sem-fim e roda de dentado helicoidal tem características particularmente interessantes para o contexto desta dissertação. Neste tipo de engrenagem, o parafuso sem-fim possui, normalmente, um ou mais dentes (não se costumam utilizar mais do que quatro), sendo que estes representam o número de entradas do sem-fim, e estes dentes formam uma espiral em volta do parafuso. Por sua vez, a roda dentada possui mais dentes que o parafuso e encaixa no dentado do mesmo, sendo que os seus eixos estão perpendicularmente dispostos [42-44].

### Razão de transmissão

A razão de transmissão do engrenamento ( $u$ ) é calculada através do conhecimento do número de dentes do parafuso e da roda dentada, e é dada pela seguinte fórmula:

$$u = \frac{Z_{roda\ dentada\ helicoidal}}{Z_{parafuso\ sem-fim}} \quad (1)$$

Como o número de dentes do parafuso sem-fim é bastante baixo (normalmente um ou dois), a razão de transmissão é consideravelmente elevada.

### Autobloqueio

A transmissão de movimento é caracterizada como sendo irreversível quando a transmissão de torque se dá apenas numa direção. Isto quer dizer que o parafuso sem-fim consegue acionar a rotação da roda dentada, mas o inverso já não acontece. A partir de um certo valor do ângulo da hélice, a força de contacto exercida pela roda dentada sobre o parafuso sem-fim não consegue contrariar a força de atrito existente na zona de contacto entre os dentes.

Um parafuso sem-fim com apenas uma entrada consegue ter um ângulo do passo ( $\gamma$ ) (representado na Figura 24) menor do que no caso de ter múltiplos dentes, pois este consegue realizar mais espirais sobre o parafuso, por ter mais espaço livre [43].

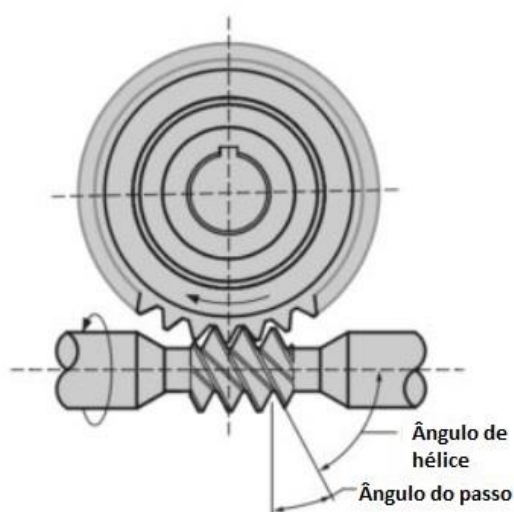


Figura 24 - Ângulo de hélice e ângulo do passo (HBD/Winsmith, Inc.) [45]

### Eficiência

Para engrenagens deste tipo que não necessitem de autobloqueio, a eficiência pode atingir valores acima de 90%, pois esta é a característica prioritária a melhorar na engrenagem. No entanto, quando o autobloqueio existe, devido às elevadas forças de atrito existentes, a eficiência diminui drasticamente, sendo normalmente inferior a 50% para situações deste tipo. Para parafusos sem-fim com mais do que uma entrada, o ângulo do passo é maior, o que diminui as forças de atrito existentes, tornando a capacidade de autobloqueio menor [43]. Além disso a área de contacto entre dentes aumenta, aumentando assim a eficiência da transmissão de força.



### 3. Análise de mercado

#### 3.1. Soluções existentes

Atualmente existem vários sistemas de regulação lombar distintos, tanto elétricos como mecânicos, aplicáveis a assentos automóveis. Quanto aos sistemas mecânicos, estes são usualmente integrados no interior do assento, não influenciando assim o aspeto estético do banco automóvel e, simultaneamente, rentabilizando o espaço existente.

Uma das soluções atualmente utilizada está patenteada (patente número 6955399 denominada de “*Lumbar support for car seat*”) e representada na Figura 25. Esta consiste num apoio metálico ou polimérico com grande elasticidade e que contém um cabo de aço fixo à parte inferior do objeto (existem várias versões desta solução), que está disposto na vertical, como o apoio. Quando este cabo é tensionado, a zona inferior sobe no sentido vertical, fazendo com que a peça metálica aumente a sua curvatura na zona lombar, oferecendo melhor apoio ao ocupante nesta zona.

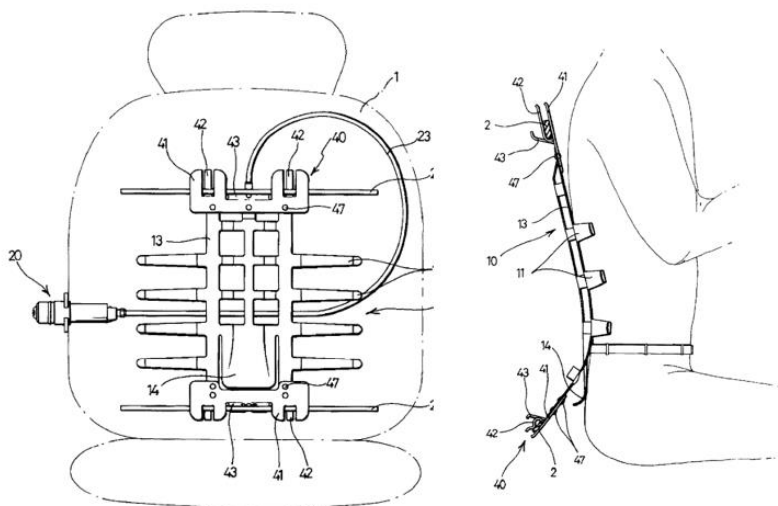


Figura 25 - Sistema mecânico vertical de apoio lombar para assento automóvel [46]

Outra solução utilizada atualmente consiste numa peça polimérica que cobre toda a extensão da zona lombar do assento, por vezes incluindo a parte lateral da mesma, como demonstrado na Figura 26. Este sistema está patenteado, tendo o número 8020933 e como título “*Lumbar support device of seat for vehicles*”.

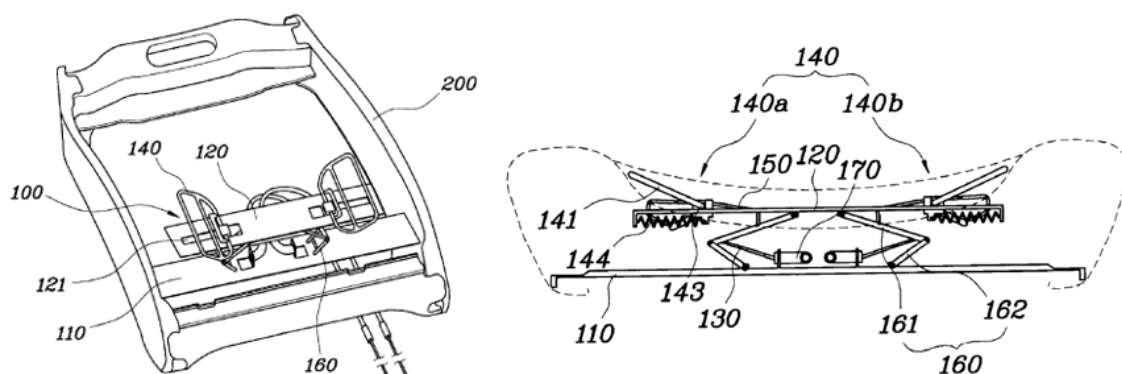


Figura 26 - Sistema mecânico horizontal de apoio lombar para assento automóvel [47]

Este sistema é fixo à estrutura do assento e contém elementos de ligação (elemento 160) que possibilitam a aproximação do apoio à zona lombar do ocupante, envolvendo-a apropriadamente em toda a largura do assento. Esta movimentação do sistema, à semelhança da solução anterior, é provocada pela extensão de cabos de ligação, que fazem com que os apoios laterais (elemento 141) aumentem o seu ângulo com o painel de suporte (elemento 120). A principal vantagem deste tipo de solução é o de envolver totalmente a zona lombar do ocupante, proporcionando assim um maior conforto e segurança do que no caso de um sistema que apenas proporcione apoio na parte traseira da lombar.

Existem ainda sistemas que fornecem apoio lombar através do enchimento de bolsas de ar instaladas no interior do assento, como o da Figura 27. Estes sistemas são bastante leves e de fácil instalação, sendo uma excelente solução utilizada atualmente.



Figura 27 - Sistema de apoio lombar através de bolsas de ar

Em oposição aos sistemas internamente integrados, existem ainda soluções que podem ser instaladas no exterior do assento, como o apresentado na Figura 28, referente à patente número 5533787 e intitulada de *“Add-on adjustable back support for car seat”*.

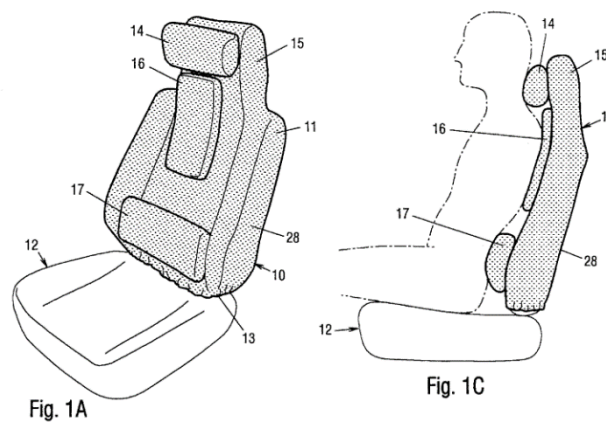


Figura 28 - Sistema de apoio lombar exterior [48]

Estes acolchoamentos possuem tiras para permitir a sua fixação à volta do assento ou então contêm velcro na zona traseira do acolchoamento, com o mesmo propósito. Devido ao tipo de fixação, este tipo de apoio pode ser fixo em qualquer zona do assento, conferindo ao ocupante grande liberdade na escolha da zona que pretende assegurar um maior conforto.



## 4. Projeto de sistema de regulação lombar segundo a diretiva VDI 2736

### 4.1. *Benchmarking* do sistema existente

O principal objetivo deste mecanismo é permitir o ajuste lombar de um assento automóvel de acordo com a preferência do ocupante. Como já referido sucintamente no capítulo 2.3, esta regulação é feita através de um cabo de aço, que é distendido ou contraído, consoante o funcionamento de um sistema de engrenagens helicoidais de eixos cruzados. Uma das extremidades do cabo está acoplada a uma roda helicoidal e a sua contração acontece quando este enrola numa zona da roda dentada adaptada para tal, provocando a aproximação do *suspension mat* à zona lombar do ocupante, melhorando assim o seu apoio e conforto.

Através de um processo de *benchmarking*, foi utilizado como referência um sistema com engrenagens de um sistema de regulação lombar, semelhante ao idealizado para esta dissertação. O sistema de engrenamento consiste numa roda dentada helicoidal e um parafuso sem-fim, demonstrados nas Figura 29 e Figura 30, respetivamente.



Figura 29 - Roda dentada helicoidal



Figura 30 - Parafuso sem-fim

Esta engrenagem é acoplada numa caixa de material polimérico, de modo a impedir qualquer movimento de translação, tanto da roda como do parafuso sem-fim, bem como proteger a engrenagem de elementos externos. A Figura 31 representa um exemplo desta mesma caixa.



Figura 31 - Caixa da engrenagem

Por forma a obter a sua geometria, foram realizadas diversas medições, utilizando uma máquina de medição de coordenadas 3D com elevada precisão, bem como um paquímetro.

Devido à complexa geometria da roda de dentado helicoidal, foi medida a cota tangencial sobre 2 e 3 dentes, no plano real, com o paquímetro, como demonstrado na Figura 32.

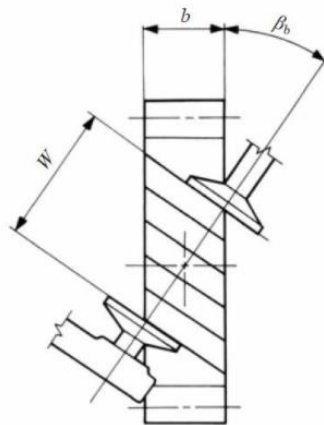


Figura 32 - Cota tangencial sobre k dentes de uma roda de dentado helicoidal

Considerando a Equação (2) para o cálculo da cota tangencial real sobre k dentes ( $W_{nk}$ ),

$$W_{nk} = m_n \times \cos(\alpha_n) \times (k - 0,5) \times \pi + z \times \text{inv}(\alpha_t) \quad (2)$$

e a Equação (3) para o passo de base ( $p_b$ ),

$$p_b = m_n \times \cos(\alpha_n) \quad (3)$$

é possível determinar o passo de base, através da dedução:

$$W_{nk=3} - W_{nk=2} = p_b \quad (4)$$

Para a obtenção de exatidão na medição do entre-eixo, este foi medido diretamente na caixa da engrenagem. Foi utilizada uma máquina de medição de coordenadas 3D, obtendo-se a posição do centro do furo para o parafuso sem-fim e a posição do eixo da roda helicoidal, como apresentado na Figura 33.

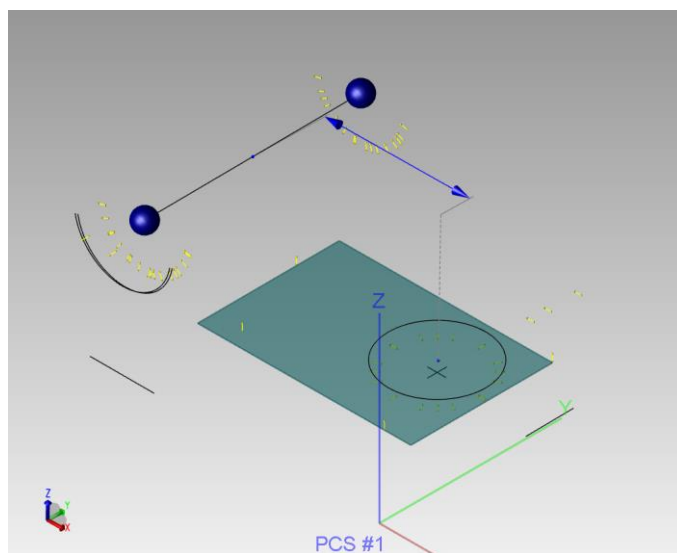


Figura 33 - Medição do entre-eixo na máquina de medição de coordenadas 3D

Por observação visual é possível concluir que o parafuso sem-fim possui 2 entradas, correspondendo assim ao número de dentes desta roda dentada. No entanto, para a roda de dentado helicoidal, esta análise não é tão direta, pois esta não possui o dentado completo em torno de toda a circunferência da roda dentada. Para realizar uma correta estimativa do número de dentes total, foi utilizada a máquina de medição de coordenadas 3D, estabelecendo um diâmetro aproximado para a roda e dividindo a circunferência obtida por vários pontos equidistantes, num intervalo de 13 a 17. Observou-se que, para 14 pontos, a ponteira de medição contactava constantemente na mesma zona dos dentes existentes na roda, concluindo assim que a roda dentada helicoidal tem, na sua totalidade, 14 dentes.

Com a mesma máquina de medição de coordenadas 3D foi medido o ângulo da hélice, obtendo o valor de 79,7667°. No entanto, este ângulo não foi medido sob o círculo primitivo do

dente, logo, é apenas um valor aproximado daquele que é pretendido. Assim, foi considerado um ângulo de hélice de 82°, permitindo obter um entre-eixo próximo do esperado.

O ângulo de pressão normal foi assumido como sendo 20° e, a partir deste valor, foi possível calcular o módulo normal ( $m_n$ ), através da Equação (5), tendo obtido o valor de 1,3211.

$$m_n = \frac{p_b}{\pi \times \cos(\alpha_n)} \quad (5)$$

Contudo, para engrenagens de dentado reto ou helicoidal existem valores normalizados do módulo, indicados na norma DIN 780 - Parte 1. Alguns dos valores normalizados estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 - Séries de valores para o módulo normal de engrenagens de dentado reto ou helicoidal [49]

| Módulo ( $m_n$ ) / mm |          |
|-----------------------|----------|
| Série I               | Série II |
| 0,5                   | 0,55     |
| 0,6                   | 0,65     |
| 0,7                   | 0,75     |
| 0,8                   | 0,85     |
| 0,9                   | 0,95     |
| 1                     | 1,125    |
| 1,25                  | 1,375    |
| 1,5                   | 1,75     |
| 2                     | 2,25     |

Como o valor calculado não faz parte do conjunto de valores normalizados, a diretiva VDI 2736 - Parte 3 recomenda a utilização do módulo mais elevado seguinte, de acordo com a norma DIN 780 - Parte 1. Deste modo, o módulo normal considerado foi de 1,375 mm.

As larguras das rodas dentadas foram medidas com o auxílio de um paquímetro, sendo os seus valores de 11,87 mm e 17,04 mm para o parafuso sem-fim e a roda de dentado helicoidal, respetivamente. O paquímetro foi ainda utilizado para medir o diâmetro da estrutura de enrolamento do cabo, pertencente à roda helicoidal, bem como a espessura do cabo de aço. Este último mede 1,5 mm, logo, o diâmetro de enrolamento do cabo utilizado para calcular o deslocamento total do cabo consiste no diâmetro medido mais 0,75 mm, correspondente ao

ponto médio do cabo. Assim sendo, o diâmetro medido foi de 25,6 mm. Na Tabela 8 estão agrupados os dados retirados deste estudo.

Tabela 8 - Dados obtidos a partir do *benchmarking* do sistema

| Designação                                             | Símbolo    | Parafuso sem-fim | Roda helicoidal |
|--------------------------------------------------------|------------|------------------|-----------------|
| Cota tangencial sob 2 dentes <sup>1</sup>              | $W_{nk=2}$ | 6,15 mm          |                 |
| Cota tangencial sob 3 dentes <sup>1</sup>              | $W_{nk=3}$ | 10,05 mm         |                 |
| Passo de base <sup>2</sup>                             | $p_b$      | 3,90 mm          |                 |
| Módulo normal <sup>2</sup>                             | $m_n$      | 1,3750 mm        |                 |
| Nº de dentes <sup>1</sup>                              | $z$        | 2                | 14              |
| Ângulo entre os veios <sup>1</sup>                     | $\Sigma$   | 90 °             |                 |
| Ângulo de pressão normal <sup>3</sup>                  | $\alpha_n$ | 20°              |                 |
| Ângulo de hélice <sup>1</sup>                          | $\beta$    | 82°              |                 |
| Diâmetro de enrolamento de cabo <sup>1</sup>           | $d_{cabo}$ | 25,6 mm          |                 |
| Largura do dente <sup>1</sup>                          | $b$        | 11,87 mm         | 17,04 mm        |
| 1- Valor medido; 2- Valor calculado; 3- Valor assumido |            |                  |                 |

## 4.2. Condições de funcionamento

Após a realização das medições na engrenagem existente, é essencial analisar as condições de funcionamento para o cálculo da capacidade de carga da engrenagem. Como tal, a diretiva VDI 2736 - Parte 3 apresenta a sequência de cálculo a realizar para verificação da capacidade de carga da engrenagem, como representada na Figura 34.

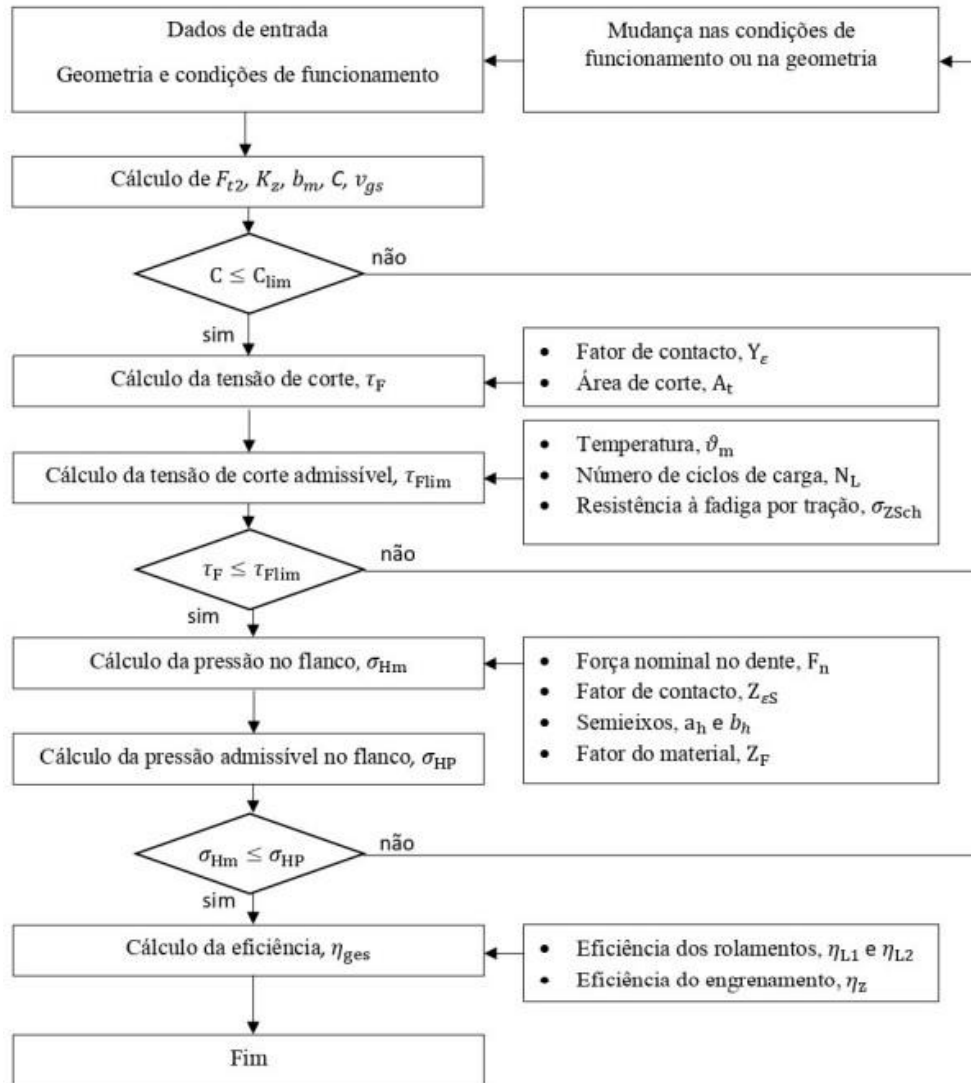


Figura 34 - Sequência de cálculo para verificação da capacidade de carga de uma engrenagem helicoidal de eixos cruzados [6, 44]

#### 4.2.1. Velocidade angular

Através de testes práticos foi concluído que, numa situação real, o acionamento do sistema de regulação lombar demoraria 2 segundos para o parafuso sem-fim realizar uma volta completa. Por motivos de segurança, este tempo foi reduzido para 1,5 segundos, para que a velocidade de escorregamento considerada seja maior, e, consequentemente, o resultado da capacidade de carga limite da engrenagem seja menor, como demonstrado no capítulo 4.3. Deste modo, a velocidade angular do parafuso sem-fim é de 40 rpm. Considerando que a razão de transmissão ( $u$ ) é também dada pela Equação (6), a velocidade angular da roda dentada helicoidal é de 5,71 rpm.

$$u = \frac{\omega_{ent}}{\omega_{saída}} \quad (6)$$

#### 4.2.2. Tempo de vida

Durante o processo de *benchmarking* do sistema, duas das condições iniciais pretendidas para o sistema de regulação lombar eram a de suportar um mínimo de 4000 ciclos e o parafuso sem-fim apenas poder realizar 3 voltas completas desde o ponto inicial até ao fim do curso. Considerando um ciclo como sendo a realização de 3 voltas completas do parafuso sem-fim, o tempo de vida esperado é de 5 horas.

Caso não seja pretendido utilizar o número de ciclos mínimo como parâmetro de cálculo do tempo de vida estimado, este último pode ser calculado de outra forma. Considerando a duração média de um veículo até ao seu fim de vida, o tempo de vida esperado para um sistema deste género pode ser sobredimensionado para um valor de 20 anos. Para calcular o tempo efetivo de funcionamento do engrenamento, estimou-se ainda que o número de utilizações diárias do sistema seria de 10 vezes. Assim sendo, o período de funcionamento efetivo é dado pela Equação (7), em que  $\Delta t$  representa o tempo de um ciclo da engrenagem (neste caso 4,5 segundos), resultando em 91,3 horas de tempo de vida efetivo de funcionamento.

$$t_E = \left[ \frac{\left( (20 \text{ anos} \times 365) \text{ dias} \times 10 \right) \text{ vezes} \times \Delta t \right) \text{ segundos}}{60 * 60} \right] \text{ horas} \quad (7)$$

#### 4.2.3. Coeficientes de segurança

A diretiva VDI 2736 - Parte 3 apresenta valores típicos de coeficientes de segurança para o pé e flanco do dente, bem como para a capacidade de carga permitida. Quanto ao coeficiente de segurança para a capacidade de carga, este é representado pela simbologia  $S_c$  e a diretiva recomenda um valor de  $S_c = 2$  para casos em que as engrenagens apresentem uma elevação da temperatura durante o funcionamento. No caso desta engrenagem, sendo utilizada para regular o apoio lombar de um assento automóvel, a sua utilização não é contínua, logo, não é esperado que exista uma elevada diferença de temperaturas durante a sua utilização. Assim sendo, este coeficiente de segurança pode ser definido pelo fabricante e/ou cliente, desde que seja igual ou superior a 1.

Quanto ao fator de segurança para o pé do dente,  $S_{Fmin}$ , a diretiva VDI 2736 aconselha um valor de 2,0 para operação contínua e  $10^8$  ciclos, e de 1,6 para operação intermitente, independentemente do número de ciclos. O valor mínimo deste fator de segurança também pode ser deixado ao critério do cliente/fabricante.

Por último, a diretiva VDI 2736 define como valor mínimo para o coeficiente de segurança no flanco do dente  $S_{Hmin} = 1,4$  para operação contínua e  $10^8$  ciclos, e de 1,25 para operação intermitente, independentemente do número de ciclos.

O *software* KISSsoft sugere valores típicos para os coeficientes de segurança, dependendo do valor do módulo, estando estes apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Fatores de segurança para materiais plásticos, aplicados pelo *software* KISSsoft

| Aplicação do fator de segurança | Símbolo          | $m_n \leq 0,5 \text{ mm}$ | $m_n = 1,0 \text{ mm}$ | $m_n \geq 2,0 \text{ mm}$ |
|---------------------------------|------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| Pé do dente                     | $S_{Fmin}$       | 0,800                     | 1,200                  | 1,600                     |
| Flanco do dente                 | $S_{Hmin}$       | 0,800                     | 1,000                  | 1,250                     |
| Deformação                      | $S_{\delta min}$ | 1,000                     | 1,000                  | 1,000                     |

#### 4.2.4. Temperatura de funcionamento

Para efeitos de cálculo com recurso ao *software* KISSsoft, as temperaturas de funcionamento da engrenagem nas zonas do pé e flanco do dente foram definidas, tendo ambas o valor de 25 °C (Figura 35), porque esta engrenagem não vai ser utilizada de modo contínuo, logo, o aumento da temperatura observado é desprezável. Quanto à temperatura ambiente em que a engrenagem funciona, esta foi definida como sendo de 23 °C.

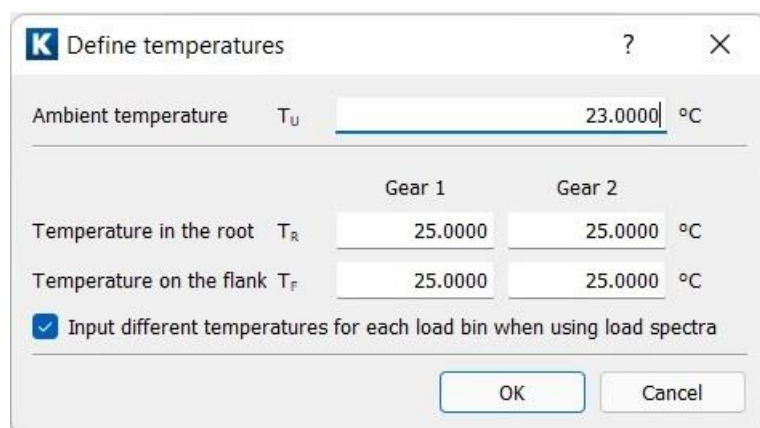


Figura 35 - Temperaturas de funcionamento no *software* KISSsoft

### 4.3. Valor de carga característico

A partir do *benchmarking* efetuado torna-se possível realizar todos os cálculos necessários para obter a geometria e características da engrenagem, sendo que estes cálculos foram confirmados através do programa KISSsoft. As características geométricas da engrenagem e os resultados dos cálculos descritos são apresentados no Anexo B.1: *Benchmarking* do sistema existente.

Segundo a diretiva VDI 2736 - Parte 3, o valor de carga característico é calculado de modo a obter uma estimativa da capacidade de carga no flanco do dente (C) de uma engrenagem helicoidal de eixos cruzados, e é dado pela Equação (8).

$$C = \frac{F_{t2} \times K_A}{K_z \times b_m \times m_{x1} \times \pi} \quad (8)$$

$K_A$  representa o fator de aplicação de carga e foi selecionado o valor de 1,25, pois é previsto que este sistema não sofra choques significativos e trabalhe com baixos binários, como justificado na Tabela 10.

Tabela 10 - Fator de aplicação de carga [50]

| Máquina Motora                                                                    | Máquina Moviada                                                                                            |                                                                                                   |                                                                                                                                  |                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   | Uniforme<br>(Trans-<br>missões por<br>correia uni-<br>formemente<br>carregados,<br>elevadores<br>ligeiros) | Choques<br>ligeiros<br>(trans-<br>missões<br>por correia<br>não unifor-<br>memente<br>carregados) | Choques<br>modera-<br>dos (ex-<br>trusão de<br>borracha,<br>máquinas<br>para ma-<br>deira,<br>engrena-<br>gens de<br>elevadores) | Choques<br>impor-<br>tantes<br>(engre-<br>nagens<br>de esca-<br>vadoras,<br>máquinas<br>pesadas<br>para side-<br>rurgia) |
| <b>Uniforme</b> (turbinas, motores elétricos com baixo binário de arranque)       | 1                                                                                                          | 1.25                                                                                              | 1.5                                                                                                                              | 1.75                                                                                                                     |
| <b>Choques ligeiros</b> (turbinas, motores elétricos de alto binário de arranque) | 1.10                                                                                                       | 1.35                                                                                              | 1.60                                                                                                                             | 1.85                                                                                                                     |
| <b>Choques moderados</b> (motor de combustão interna multi-cilindros)             | 1.25                                                                                                       | 1.50                                                                                              | 1.75                                                                                                                             | 2.00                                                                                                                     |
| <b>Choques importantes</b> (motor de combustão interna de 1 cilindro)             | 1.50                                                                                                       | 1.75                                                                                              | 2                                                                                                                                | >2.25                                                                                                                    |

$K_z$  representa o coeficiente do número de dentes,  $b_m$  a largura de contacto sob o diâmetro de referência, como representado na Figura 36,  $m_{x1}$  o módulo na secção axial do parafuso sem-fim e  $F_{t2}$  a força tangencial à roda dentada helicoidal, e os seus valores são dados pelas Equações (9), (10), (11) e (12) , respetivamente.

$$K_z = 1,8974 \times 10^{-6} \times z_2^3 - 5,0262 \times 10^{-4} \times z_2^2 + 4,9159 \times 10^{-2} \times z_2 - 0,1385 \quad (9)$$

$$b_m = \sqrt{d_{a1}^2 - d_{m1}^2} \quad (10)$$

$$m_{x1} = \frac{m_n}{\cos \gamma_{m1}} \quad (11)$$

$$F_{t2} = \frac{F_c \times d_{cabo}}{d_2} \quad (12)$$

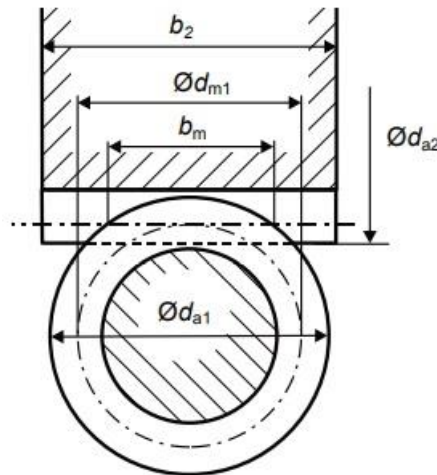


Figura 36 - Largura de contacto sobre o diâmetro de referência,  $b_m$  [44]

O fator de segurança da capacidade de carga característica é dado pela Equação (13),

$$S_c = \frac{C_{lim}}{C} \quad (13)$$

sendo que  $C_{lim}$  representa o valor de carga característico permitido e é dependente da velocidade de escorregamento, como representado na Figura 37.

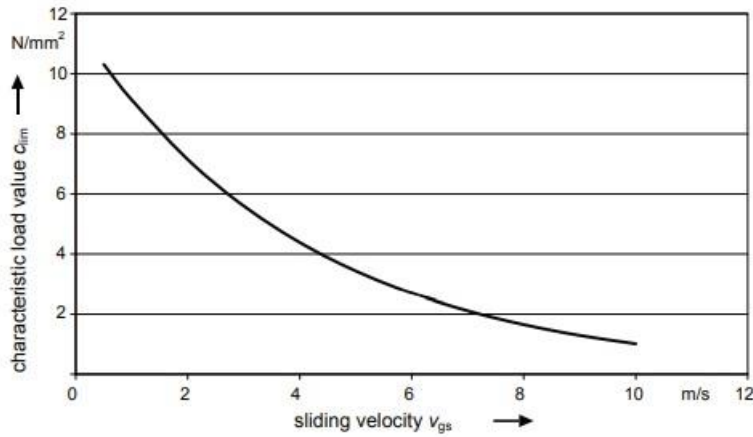


Figura 37 - Valor de carga característico permitido para POM e PA 66

Por sua vez, a velocidade de escorregamento é dada pela Equação (14),

$$v_{gs} = \frac{d_{1,2} \times \omega_{1,2} \times \sin \Sigma}{2 \times \cos \beta_{2,1}} \quad (14)$$

sendo que  $\Sigma$  representa o ângulo entre os veios e  $\beta$  o ângulo da hélice.

Para valores de velocidades de escorregamento inferiores a 1 m/s e número de ciclos reduzido, como é o caso desta aplicação, o valor de  $C_{lim}$  obtido graficamente pode ser multiplicado por 2.

Como estes resultados não dependem das propriedades do material da engrenagem, os valores obtidos são iguais considerando PA 66 ou PA 66 + 35 GF. No entanto, nos subcapítulos seguintes, o material tem influência nos resultados obtidos, podendo-se assim comparar a adição de fibra de vidro nas características da engrenagem.

#### 4.4. Capacidade de carga no pé do dente

As formulações apresentadas neste capítulo advêm da diretiva VDI 2736 e os resultados de todos estes cálculos estão apresentados no Anexo B.1: *Benchmarking* do sistema existente.

O fator de segurança da fratura do dente ( $S_F$ ) é calculado através da Equação (15),

$$S_F = \frac{\tau_{Flim}}{\tau_F} \geq S_{Flim} \quad (15)$$

em que  $S_{Flim}$  é igual a 1,6, como visto anteriormente.

A tensão de corte nominal ( $\tau_F$ ) é dada pela Equação (16) e a resistência à fadiga por corte ( $\tau_{Flim}$ ) é, aproximadamente, 75% do valor da resistência à fadiga por tração, que é obtido através da Figura 38, considerando uma temperatura de funcionamento de 23 °C.

$$\tau_F = \frac{F_{t2} \times K_A}{A_\tau} \times Y_E \quad (16)$$

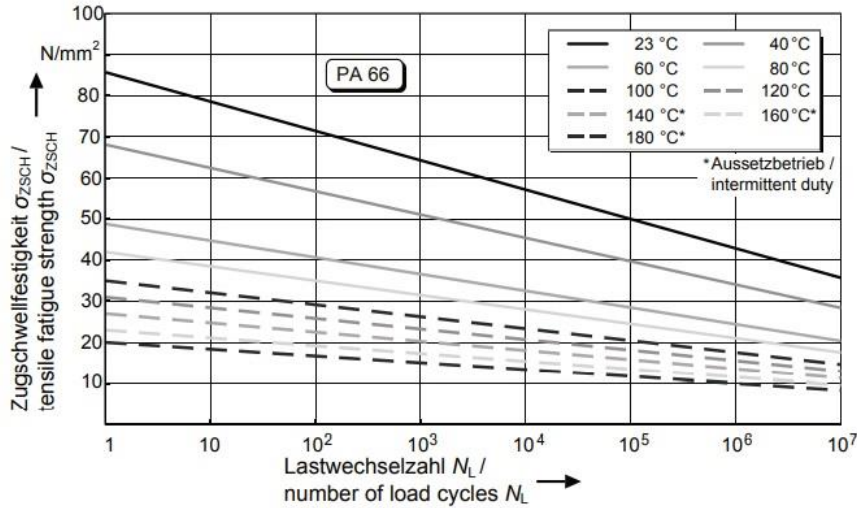


Figura 38 - Resistência à fadiga por tração,  $\sigma_{ZSCH}$ , em função do número de ciclos, para PA 66

$Y_\epsilon$  é denominado por fator da razão de condução e contabiliza a distribuição da força tangencial pelos pares de dentes engrenados, sendo o seu valor dado pela Equação (17).

$$Y_\epsilon = \frac{1}{\epsilon_{nz}} \quad (17)$$

A razão de condução ( $\epsilon_n$ ) é dada pela Equação (18),

$$\epsilon_n = \frac{g_{an1} + g_{an2}}{m_n \times \pi \times \cos \alpha_n} \quad (18)$$

e a razão de condução em número inteiro ( $\epsilon_{nz}$ ) é, como o próprio nome indica, o número inteiro da razão de condução calculada. O percurso de contacto da engrenagem no *addendum*, também denominado por comprimento de engrenamento ( $g_{an}$ ) é dado pela Equação (19).

$$g_{an1,2} = \frac{\left( \sqrt{d_{a1,2}^2 - d_{b1,2}^2} - \sqrt{d_{s1,2}^2 - d_{b1,2}^2} \right)}{2 \times \cos \beta_{b1,2}} \quad (19)$$

$A_\tau$  simboliza a secção resistente ao corte, é obtida através da projeção radial paralela da área de fratura e está representada na Figura 39. Esta propriedade é calculada através da Equação (20).

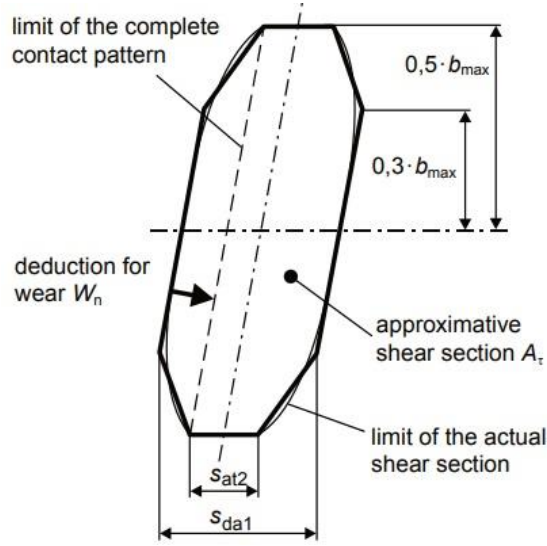


Figura 39 - Aproximação para cálculo da secção resistente ao corte

$$A_\tau = \frac{b_{\max}}{5} \times (4 \times s_{da1} + s_{at2}) \quad (20)$$

A largura máxima do dente ( $b_{\max}$ ) é dada pela Equação (21).

$$b_{\max} = \min \left( 2 \times \sqrt{\left(\frac{d_{a1}}{2}\right)^2 - \left(a - \frac{d_{a2}}{2}\right)^2} ; b_2 \right) \quad (21)$$

A espessura do dente no círculo de *addendum* do parafuso sem-fim é calculada através da Equação (22),

$$s_{da1} = d_{x0} \times \left( \frac{s_{t2}}{d_2} + \text{inv } \alpha_{t2} - \text{inv } \alpha_{x0t} \right) \quad (22)$$

sendo que  $d_{x0}$  representa o diâmetro exterior mínimo e  $\alpha_{x0t}$  o ângulo de pressão na secção transversal, e são calculados pelas Equações (23) e (24), respetivamente.

$$d_{x0} = 2 \times a - d_{a1} \quad (23)$$

$$\alpha_{x0t} = \cos^{-1} \left( \frac{d_{b2}}{d_{x0}} \right) \quad (24)$$

A espessura do dente no círculo de referência da roda helicoidal ( $s_{t2}$ ) é obtida pela Equação (25),

$$s_{t2} = m_{t2} \times \left( \frac{\pi}{2} + 2 \times x_2 \times \tan \alpha_n \right) \quad (25)$$

sendo que o módulo aparente da roda helicoidal ( $m_{t2}$ ) é calculado a partir da Equação (26).

$$m_{t2} = \frac{m_n}{\cos \beta_2} \quad (26)$$

Por fim, a espessura do dente da roda helicoidal no círculo de *addendum* ( $s_{at2}$ ) e o correspondente ângulo de pressão são dados pelas Equações (27) e (28), respetivamente.

$$s_{at2} = d_{a2} \times \left( \frac{s_{t2}}{d_2} + \text{inv } \alpha_{t2} - \text{inv } \alpha_{at2} \right) \quad (27)$$

$$\alpha_{at2} = \cos^{-1} \left( \frac{d_{b2}}{d_{a2}} \right) \quad (28)$$

#### 4.5. Capacidade de carga no flanco do dente

Nesta zona do dente, a projeção da área de contacto toma uma forma elíptica devido à deformação sofrida. Assim, as tensões de compressão encontram-se distribuídas na forma de um elipsoide sobre a área projetada. A pressão existente no flanco é o principal fator a ter em conta na estimativa da capacidade de carga no flanco do dente. No Anexo B.1: *Benchmarking* do sistema existente estão apresentados os resultados de todos os cálculos apresentados neste capítulo, provenientes da diretiva VDI 2736.

A pressão de contacto média ( $\sigma_{Hm}$ ) é calculada através da Equação (29).

$$\sigma_{Hm} = \frac{3}{2} \times \frac{F_n \times K_A \times Z_{\varepsilon S}}{\pi \times a_h \times b_h} \leq \sigma_{HP} \quad (29)$$

Este valor é dependente da força normal ao dente ( $F_n$ ), fator de aplicação de carga ( $K_A$ ), já definido anteriormente, fator de contacto ( $Z_{eS}$ ) e dos maior e menor semi-eixos da elipse de contacto ( $a_h$  e  $b_h$ , respetivamente).

A força normal é dada pela Equação (30),

$$F_n = \frac{F_{t2} \times \cos \rho_z}{\cos \alpha_{sn} \times \cos(\beta_z + \rho_z)} \quad (30)$$

onde o ângulo de atrito ( $\rho_z$ ) é dado pela Equação (31), em que  $\mu$  representa o coeficiente de atrito.

$$\rho_z = \tan^{-1} \left( \frac{\mu}{\cos \alpha_n} \right) \quad (31)$$

O coeficiente de atrito de uma engrenagem constituída por PA 66 + 35 GF com massa lubrificante é desconhecida. No entanto existem intervalos de valores para uma engrenagem em que o parafuso sem-fim é constituído por aço e a roda constituída por um material termoplástico, lubrificada, sendo que estes valores estão representados na Tabela 11.

Tabela 11 – Gama de coeficientes de atrito para uma engrenagem em aço/plástico lubrificado [44]

| Material da roda | Coeficiente de atrito, $\mu$ |
|------------------|------------------------------|
| <b>POM</b>       | 0,040 - 0,060                |
| <b>PA 66</b>     | 0,034 - 0,051                |
| <b>PA 46</b>     | 0,040 – 0,060                |
| <b>PA 6</b>      | 0,032 – 0,048                |
| <b>PEEK</b>      | 0,050 – 0,075                |
| <b>PPS</b>       | 0,050 – 0,075                |
| <b>PA 66-GF</b>  | 0,080 – 0,120                |
| <b>PPS-GF</b>    | 0,100 – 0,150                |

Tendo em conta estes valores, o coeficiente de atrito para esta aplicação, em que o material a considerar é PA 66 + 35 GF, foi estimado como sendo igual a 0,010.

O fator de contacto e os semi-eixos são dados pelas Equações (32), (33) e (34), respetivamente.

$$Z_{\varepsilon S} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_n}} \quad (32)$$

$$a_h = Z_F \times \xi \times \sqrt[3]{K_A \times F_n \times \rho_n} \quad (33)$$

$$b_h = \frac{\eta}{\xi} \times a_h \quad (34)$$

Por sua vez, o fator do material ( $Z_F$ ) é calculado através da Equação (35).

$$Z_F = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \times \left( \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \right)} \quad (35)$$

A influência da geometria é representada através de coeficientes (Equações (36) e (37)) que dependem do ângulo auxiliar ( $\vartheta$ ) (Equação (38)).

$$\eta = 0,09727 \times \vartheta^{0,488} \quad (36)$$

$$\xi = 39,26 \times \vartheta^{-0,786} \quad (37)$$

$$\cos \vartheta = \rho_n \times \sqrt{\frac{1}{\rho_{n1}^2} + \frac{1}{\rho_{n2}^2} + \frac{2 \times \cos(2 \times \varphi)}{\rho_{n1} \times \rho_{n2}}} \quad (38)$$

O ângulo auxiliar é dependente do ângulo do veio ( $\varphi$ ) que é dado pela Equação (39), e dos raios de curvatura equivalentes no círculo da hélice ( $\rho_{n1}$  e  $\rho_{n2}$ ), calculados pela Equação (40).

$$\varphi = \tan^{-1}(\tan \beta_1 \times \sin \alpha_n) + \tan^{-1}(\tan \beta_2 \times \sin \alpha_n) \quad (39)$$

$$\rho_{n1,2} = \frac{\sqrt{d_{s1,2}^2 - d_{b1,2}^2}}{2 \times \cos \beta_{b1,2}} \quad (40)$$

Assim, o raio de curvatura equivalente no ponto da hélice ( $\rho_n$ ) pode ser obtido através da Equação (41).

$$\frac{1}{\rho_n} = \frac{1}{\rho_{n1}} + \frac{1}{\rho_{n2}} \quad (41)$$

Como indicado na Equação (29), o valor da pressão de contacto média deve ser menor que a pressão permissível no flanco, calculado através da Equação (42).

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{HlimN} \times Z_R}{S_{Hmin}} \quad (42)$$

Tendo em conta que o valor da resistência à fadiga sob contacto rolante ( $\sigma_{HlimN}$ ) não está definido para o material requerido (PA 66 + 35 GF), este será obtido através do gráfico da Figura 40. Em gráficos de tensão vs número de ciclos é comum que o valor da tensão seja aproximadamente constante para um baixo número de ciclos, pelo que não é possível extrapolar o valor da tensão para 4000 ciclos. Assim, o valor retirado corresponde ao valor da tensão para  $10^5$  ciclos, sendo esta uma aproximação fiável.

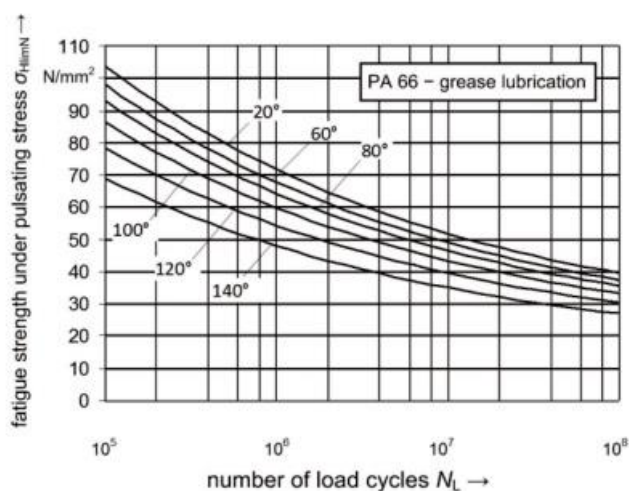


Figura 40 - Resistência à fadiga sob contacto rolante,  $\sigma_{HlimN}$ , relativamente ao n° de ciclos [51]

$Z_R$  representa o fator de rugosidade superficial, que no caso de engrenagens plásticas é tipicamente considerado  $\approx 1$ .

#### 4.6. Eficiência

Em engrenagens helicoidais de eixos cruzados, a eficiência depende essencialmente do ângulo do passo ( $\gamma$ ) e do coeficiente de atrito ( $\mu$ ). A eficiência total é dada pela Equação (43).

$$\eta_{ges} = \eta_{L1} \times \eta_{L2} \times \eta_z \quad (43)$$

Visto não existirem rolamentos nesta aplicação, o rendimento dos rolamentos,  $\eta_{L1}$  e  $\eta_{L2}$ , é considerado 100%. De modo a analisar se a propriedade de autobloqueio existe nesta engrenagem, a eficiência total tem de ser inferior a 50%. No entanto, existem forças de atrito a atuar entre a caixa que protege a engrenagem e a engrenagem em si, fazendo com que a eficiência total seja inferior à calculada, garantindo assim o autobloqueio pretendido.

Para uma engrenagem helicoidal de eixos cruzados em que o parafuso sem-fim é a roda mandante, a eficiência da engrenagem é dada pela Equação (44).

$$\eta_z = \frac{\tan \beta_{s2}}{\tan(\beta_{s2} + \rho_z)} \quad (44)$$

No Anexo B.1: *Benchmarking* do sistema existente encontram-se os resultados obtidos para este parâmetro da engrenagem.

#### 4.7. Comparação dos resultados com o *software* KISSsoft

Por forma a validar os resultados obtidos, foi utilizado o programa KISSsoft para a verificação da engrenagem com os mesmos parâmetros iniciais indicados. Foram comparados os resultados obtidos implementando a diretiva VDI 2736 neste trabalho, com os do KISSsoft, considerando o material PA 66 em ambos, pois o KISSsoft não contém dados disponíveis acerca do material PA 66 + 35 GF. Como tal, ao validar os resultados considerando PA 66, é possível validar todo o processo de cálculo realizado, sendo então possível alterar as propriedades do material para as do PA 66 + 35 GF de modo a obter os resultados pretendidos seguindo a diretiva VDI 2736.

Este *software* utiliza a diretiva VDI 2736 para a realização dos seus cálculos, como tal, existem algumas restrições a garantir nas características da engrenagem para que os resultados sejam fidedignos:

- Parafuso sem-fim constituído por aço e roda helicoidal plástica;
- Número de dentes do parafuso sem-fim inferior a 6;
- $m_n \geq 0,30$  mm;
- $\Sigma = 90^\circ$ .

Neste tipo de aplicação, a engrenagem é totalmente constituída por um material plástico, como tal, este é um aspeto que não está em concordância com a diretiva. No entanto, como todos os restantes parâmetros são cumpridos, a exigência de um parafuso sem-fim em aço foi desprezada.

A comparação dos principais resultados obtidos encontra-se na Tabela 12, enquanto que a totalidade dos cálculos realizados com o KISSsoft se encontra apresentada no Anexo C.1: *Benchmarking* do sistema existente.

Tabela 12 - Comparação dos principais resultados obtidos através do KISSsoft e da diretiva VDI 2736, para a engrenagem helicoidal de eixos cruzados, constituída por PA 66

| Propriedade                     | VDI 2736 | KISSsoft |
|---------------------------------|----------|----------|
| $C / N \cdot mm^{-2}$           | 23,0     | 23,0     |
| $S_c$                           | 1,0      | 1,0      |
| $\tau_F / N$                    | 17,4     | 17,4     |
| $S_F$                           | 2,5      | 3,2      |
| $\sigma_{Hm} / N \cdot mm^{-2}$ | 94,6     | 99,1     |
| $S_H$                           | 0,9      | 0,9      |
| $\eta_{ges} / \%$               | 56,1     | 56,1     |

Através da observação da Tabela 12 é possível constatar que os valores do fator de segurança no pé do dente,  $S_F$ , bem como a pressão de contacto média ( $\sigma_{Hm}$ ) obtidos pelos dois métodos são ligeiramente distintos, logo, necessitam de apropriada justificação.

Quanto ao fator de segurança no pé do dente, este depende do valor da resistência à fadiga por tração ( $\sigma_{ZSch}$ ) e da tensão de corte nominal ( $\tau_F$ ) logo, a discrepância situa-se no cálculo da resistência à fadiga. Utilizando a diretiva VDI 2736, este valor é obtido através do diagrama apresentado na Figura 38, sendo que a equação da reta pretendida foi estimada com o auxílio

de um *software* disponível em [[www.graphreader.com](http://www.graphreader.com)] [52]. Já no KISSsoft, considera o cálculo de operação contínua, ao invés de operação intermitente, como é o caso, influenciando assim a resistência à fadiga da engrenagem. Tendo em conta estas distinções, considera-se então que a diferença entre os resultados obtidos é aceitável, podendo-se então prosseguir a análise.

No que toca à pressão de contacto média, quando calculado através da diretiva VDI 2736, este é dependente de  $g_{an}$ . Por sua vez, este último dá um valor ligeiramente diferente do obtido no KISSsoft pois o *software* contém uma modificação de microgeometria recomendada para este tipo de engrenagem denominada de *tip relief*, em que este cria um chanfro na zona da cabeça do dente para diminuir as tensões aplicadas, alterando assim o percurso de contacto.

Além disso, o fator de segurança no flanco do dente,  $S_H$ , tem um valor menor do que o fator de segurança mínimo ( $S_H = 1,25$ ) para o caso de uma engrenagem que opera intermitentemente. Este coeficiente de segurança é calculado através da Equação (45).

$$S_H = \frac{\sigma_{HP}}{\sigma_{Hm}} \quad (45)$$

Como indicado anteriormente, não existem curvas limite para a pressão permissível no flanco ( $\sigma_{HP}$ ) para PA 66 + 35 GF, sendo que este foi estimado como sendo semelhante a PA 66. Assim sendo, o valor de  $\sigma_{HP}$  foi calculado através da Equação (42), que é aplicada para todo o tipo de engrenagens poliméricas e não para o caso específico de engrenagens com eixos cruzados. Neste último caso, o contacto entre dentes é pontual e, por isso, menor do que no caso de uma engrenagem com dentado reto, em que o contacto é linear. A diretiva VDI 2736 alerta mesmo para o facto de o coeficiente de segurança obtido através da Equação (45) ser uma estimativa inferior ao valor real do mesmo.

#### 4.8. Validação dos requisitos iniciais

Em posse dos dados da geometria e da capacidade de carga da engrenagem, é importante analisar se esta cumpre com os requisitos pretendidos e averiguar que tipo de alterações podem ser feitas na engrenagem para melhorar as suas características. Os requisitos iniciais estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Requisitos iniciais estipulados para o sistema de regulação lombar

|                                            |           |
|--------------------------------------------|-----------|
| <b>Curso de cabo a enrolar / mm</b>        | 40        |
| <b>Nº de rotações do utilizador</b>        | 3         |
| <b>Binário do utilizador / N·m</b>         | 0,3 a 1,5 |
| <b>Força máxima exercida pelo cabo / N</b> | 300       |

Por forma a obter estes dados em função dos parâmetros iniciais, é necessário calcular a força máxima exercida pelo cabo. Para isso, definiu-se um coeficiente de segurança para a capacidade de carga  $S_c = 1$ , diferindo do valor 0,9944 calculado anteriormente. Este ajuste deve-se ao facto de este ser o valor mínimo aceitável para a definição da engrenagem, por forma a garantir a segurança mínima do conjunto. O procedimento de cálculo para obter a força exercida pelo cabo está representada pelas Equações (46) a (49), em que  $T_2$  representa o binário na roda helicoidal e  $F_c$  a força no cabo.

$$C = \frac{C_{lim}}{S_c} \quad (46)$$

$$F_{t2} = \frac{C \times K_z \times b_m \times m_{x1} \times \pi}{K_A} \quad (47)$$

$$T_2 = \frac{F_{t2} \times d_2}{2000} \quad (48)$$

$$F_c = \frac{T_2 \times 2000}{d_{cabo}} \quad (49)$$

O binário aplicado pelo utilizador é calculado pela Equação (50) e o curso do cabo possível de ser enrolado é obtido através da Equação (51).

$$T_1 = \frac{T_2}{u \times \eta_z} \quad (50)$$

$$c = P \times n_f \quad (51)$$

P representa o perímetro da zona da engrenagem em que o cabo enrola e  $n_f$  o número de voltas realizadas pela roda helicoidal quando o parafuso sem-fim realiza  $n_s$  voltas, sendo este último calculado pela Equação (52).

$$n_f = \frac{n_s}{u} \quad (52)$$

O perímetro é calculado considerando a distância L desde o ponto médio do cabo, que tem 1,5 mm de espessura, até ao eixo da engrenagem, segundo a Equação (53).

$$P = 2 \times \pi \times L \quad (53)$$

Algumas destas variáveis estão representadas na Figura 41.

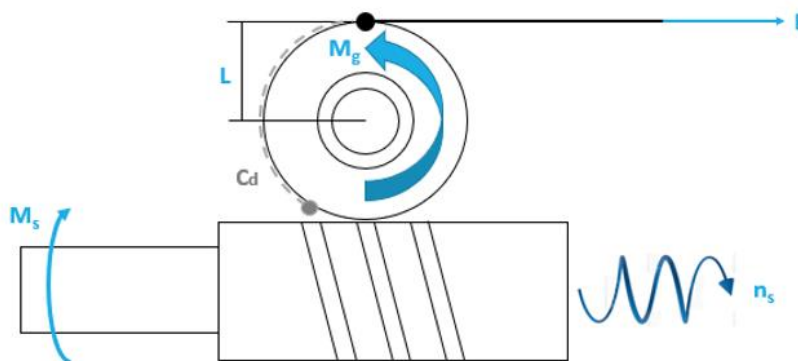


Figura 41 - Legenda das variáveis a utilizar para o procedimento de cálculo

Os resultados obtidos podem então ser comparados com os requisitos iniciais e estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Comparação entre os requisitos iniciais e as propriedades da engrenagem inicial

| Designação                             | Requisito inicial | Engrenagem inicial |
|----------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Curso do cabo a enrolar / mm           | 40                | 34,5               |
| Nº de rotações máximo do utilizador    | 3                 | 3                  |
| Binário de rotação do utilizador / N·m | 0,3 a 1,5         | 1,1                |
| Força máxima exercida pelo cabo / N    | 300               | 298,3              |

Através da análise da Tabela 14 é possível aferir que a força máxima e o comprimento máximo de enrolamento do cabo são inferiores aos valores exigidos. Assim, é essencial criar uma

nova solução capaz de melhorar estes parâmetros e, ao mesmo tempo, aumentar o coeficiente de segurança da capacidade de carga, tendo também em atenção as dimensões da engrenagem e caixa de proteção.

#### 4.9. Análise e seleção de materiais

Como já foi referido no capítulo 2.4.7, o material PA 66 tem propriedades mecânicas diferentes do PA 66 + 35 GF, sendo que as características mais relevantes para o cálculo da capacidade de carga e eficiência (coeficiente de atrito, módulo de elasticidade e coeficiente de atrito) para PA 66 + 35 GF não estão claramente definidas em bases de dados existentes. Assim, os seus valores foram obtidos através de casos de estudo particulares, sendo desconhecido a que temperatura foi obtido o valor do módulo de Young do PA 66 + 35 GF apresentado na Tabela 15. Através destes dados é possível realizar os cálculos da capacidade de carga segundo a diretiva VDI 2736, no entanto, é também importante realizar os mesmos cálculos com o auxílio do *software* KISSsoft, de modo a confirmar os resultados obtidos. Como este programa não contém uma base de dados para PA 66 + 35 GF, foi utilizada a base de dados, fornecida pela empresa *SABIC*, do material com características mais próximas, sendo este o PA 66 + 30 GF + 15 PTFE. O politetrafluoretileno (PTFE), também conhecido por teflon, é um polímero com baixo coeficiente de atrito e baixa resistência à tração e, quando adicionado a uma poliamida com fibra de vidro, reduz o coeficiente de atrito e módulo de elasticidade global do material.

Na prática, é pretendido produzir este sistema por moldação por injeção e este processo é bastante dispendioso, daí apenas ser utilizado para grandes volumes de produção, de modo a amortizar o custo inicial do molde e respetivas máquinas. Numa fase inicial é pretendido desenvolver um protótipo e realizar testes de validação sobre este, como tal, não se justifica que este seja produzido pelo processo inicialmente referido. Assim sendo, o processo selecionado para a produção do protótipo foi a impressão 3D, mais especificamente o processo de SLS (sinterização seletiva por laser). Neste processo, o custo de produção de uma peça individual é substancialmente mais baixo, no entanto, não é possível sinterizar PA 66 + 35 GF. Como alternativa, foi utilizado um material selecionado pelo fornecedor, denominado iglidur® I3, com características semelhantes ao do material considerado, que podem ser consultadas no Anexo A.4: iglidur® I3. Este material é particularmente adequado para a produção de polímeros de alta *performance*, incluindo todo o tipo de engrenagens poliméricas em que a elevada

resistência seja importante. Na Tabela 15 estão agrupadas as principais propriedades de cada um dos materiais referidos.

Tabela 15 - Principais propriedades mecânicas dos materiais em consideração para cálculos segundo a diretiva VDI 2736 teóricos e produção de protótipo [32, 53-55]

|                                                                      | PA 66 | PA 66 + 35 GF | PA 66 + 30 GF +<br>15 PTFE | iglidur® I3 |
|----------------------------------------------------------------------|-------|---------------|----------------------------|-------------|
| <b>Coeficiente de atrito, <math>\mu</math></b>                       | 0,10  | 0,13          | 0,10                       | 0,11        |
| <b>Módulo de Young, <math>E / \text{N}\cdot\text{mm}^{-2}</math></b> | 2000  | 3341          | 4886                       | 1800        |
| <b>Coeficiente de Poisson, <math>\nu</math></b>                      | 0,40  | 0,34          | 0,43                       | 0,4         |

Por forma a analisar a influência do material nas propriedades da engrenagem, foram efetuados cálculos para a capacidade de carga para PA 66 e PA 66 + 35 GF. Na Tabela 16 encontram-se o rendimento e os coeficientes de segurança obtidos através das simulações realizadas, de acordo com a diretiva VDI 2736. Embora haja fontes que indiquem valores para o Módulo de Young superiores ao indicado, foi considerado um valor mais conservador para a realização dos cálculos.

Tabela 16 - Comparação dos coeficientes de segurança e eficiência obtidos na engrenagem, para PA 66 e PA 66 + 35 GF, segundo a diretiva VDI 2736

|                                     | PA 66  | PA 66 + 35 GF | Diferença |
|-------------------------------------|--------|---------------|-----------|
| <b><math>S_c</math></b>             | 0,9944 | 0,9944        | 0,0000    |
| <b><math>S_F</math></b>             | 2,4694 | 3,3638        | + 0,8944  |
| <b><math>S_H</math></b>             | 0,8881 | 1,1825        | + 0,2944  |
| <b><math>\eta_{ges} / \%</math></b> | 56,06  | 49,41         | - 6,65    |

A partir destes resultados é possível concluir que a adição de 35% de fibra de vidro melhora significativamente as propriedades da engrenagem, não tem influência no valor da capacidade de carga característico e torna a engrenagem auto bloqueante, pois a eficiência total desta engrenagem diminui para um valor inferior a 50%.

## 5. Desenvolvimento de uma nova solução

### 5.1. Novos requisitos iniciais

Durante o desenvolvimento do novo sistema, um dos novos requisitos apresentados pelo cliente foi o de considerar que o tempo necessário para a realização de 3 voltas completas do parafuso sem-fim fosse de 1 segundo. Deste modo, a velocidade angular exigida para este componente passou a ser de 180 rpm, ao invés dos 40 rpm considerados no processo de *benchmarking*. Além disso, o cliente reduziu o número de ciclos mínimo de 4000 para 1000, alterando assim o tempo de vida requerido. No entanto, como este valor é bastante reduzido para aplicação industrial, é mais apelativo desenvolver um sistema mais durável. Assim sendo, este foi dimensionado para 10000 ciclos, que, mesmo assim, é um valor baixo, considerando a sua aplicação, mas já torna as características do sistema mais interessantes.

### 5.2. Características do novo sistema

O desenvolvimento de uma nova solução tem como objetivo principal cumprir com os requisitos indicados na Tabela 13, bem como melhorar a solução, tanto na sua geometria como na sua capacidade de carga e eficiência. Dois dos principais problemas a destacar no produto já existente são o comprimento de enrolamento do cabo e a sua força máxima suportada, que são inferiores aos valores pretendidos. Por forma a obter uma melhor solução, importa analisar a influência das diferentes características da engrenagem nos resultados pretendidos.

#### 5.2.1. Influência da distância L

Como apresentado na Equação (51), o comprimento de enrolamento do cabo depende do perímetro da roda na zona de enrolamento e do número de rotações efetuadas pela roda helicoidal.

Mantendo a razão de transmissão da engrenagem analisada ( $u=7$ ) e o número de voltas efetuadas pelo parafuso sem-fim ( $n_s=3$ ) constantes, pode ser estudada a influência da distância L (representada na Figura 41) no comprimento de enrolamento de cabo, sendo que os resultados obtidos estão apresentados na Figura 42.

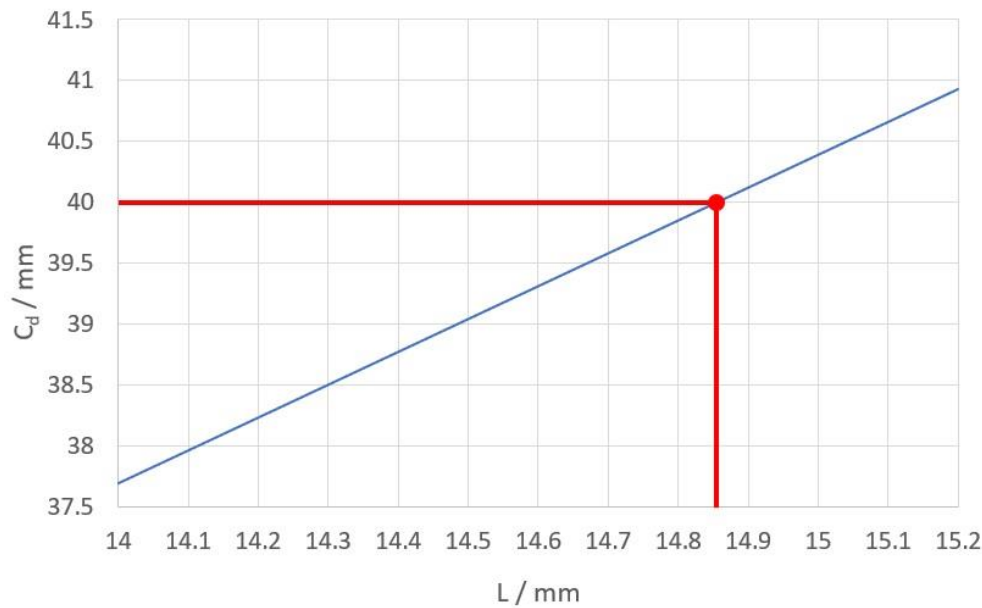


Figura 42 - Influência da distância ( $L$ ) ao eixo da engrenagem no comprimento de enrolamento de cabo ( $C_d$ )

Entendendo que a relação entre a distância  $L$  e o comprimento de enrolamento de cabo é linear, pode ser delineado um intervalo de valores mais curto para analisar a influência dos restantes parâmetros na variável  $C_d$ , tendo sempre em consideração que um dos objetivos é que este último tenha um valor mínimo de 40 mm.

### 5.2.2. Influência do número de dentes

Através dos resultados obtidos, importa agora analisar a influência da razão de transmissão no comprimento de enrolamento de cabo, visto que o número de voltas máximo a realizar pelo parafuso sem-fim é constante. Para este tipo de engrenagens de eixos cruzados, é usual que o parafuso sem-fim tenha 1 ou 2 dentes, visto que para valores maiores se torna praticamente impossível obter o efeito de *selflocking* desejado. No que toca à roda dentada helicoidal, esta tem uma margem maior para a variação do número de dentes e, por isso, foram analisadas a influência de  $L$ ,  $z_1$  e  $z_2$ , simultaneamente, no comprimento de enrolamento de cabo. Foram realizadas verificações para distâncias ao eixo da engrenagem entre 14,5 e 15,2 mm, sabendo que o objetivo é obter o menor valor de  $L$  possível para o qual o requisito do comprimento de cabo é cumprido, e os resultados obtidos encontram-se representados nos gráficos da Figura 43 e Figura 44.

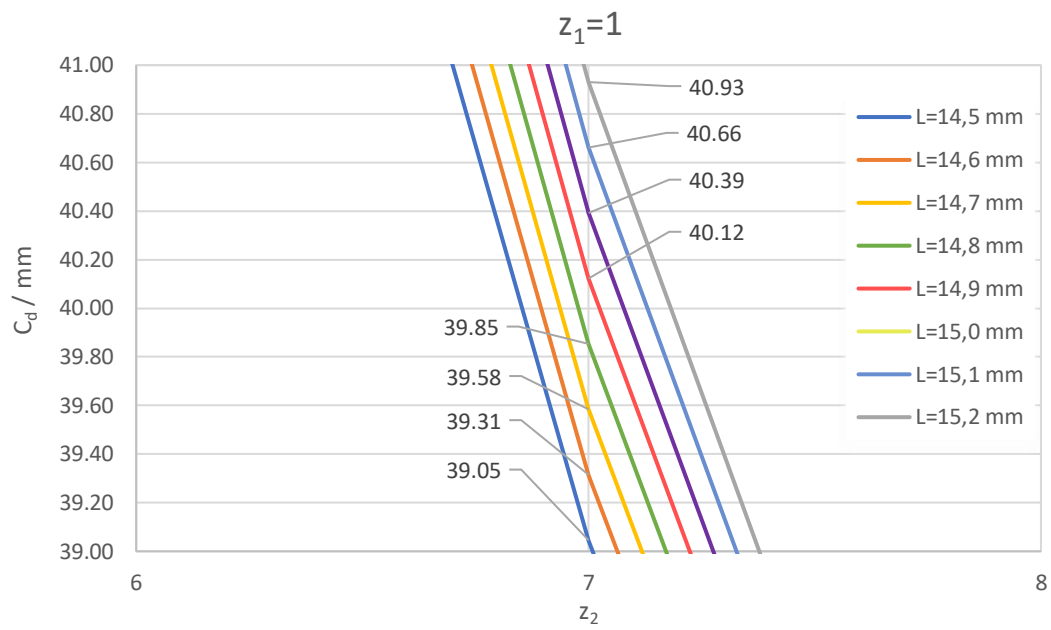


Figura 43 - Influência do número de dentes da roda helicoidal no comprimento de enrolamento de cabo, para  $z_1=1$

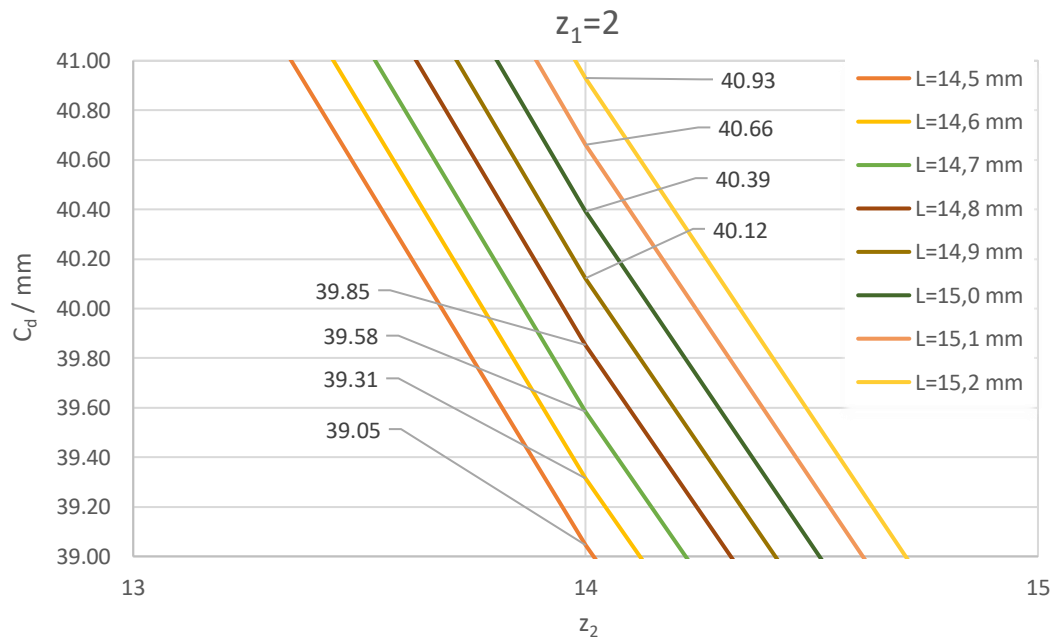


Figura 44 - Influência do número de dentes da roda helicoidal no comprimento de enrolamento de cabo, para  $z_1=2$

A partir destes gráficos podem-se retirar algumas ilações, tais como:

- O comprimento de enrolamento de cabo atinge os 40 mm a partir de uma distância  $L$  próxima de 14,9 mm, tanto para  $z_1=1$  e  $z_1=2$ ;
- O comprimento de enrolamento de cabo obtido varia mais com a alteração do número de dentes da roda dentada helicoidal do que do parafuso sem-fim.

Tendo em conta os resultados obtidos, foi delineado que a solução ótima passa por uma engrenagem cujo parafuso sem-fim e roda helicoidal tenham 2 e 14 dentes, respetivamente (ou seja, uma razão de transmissão de  $u=7$ ).

### **5.2.3. Influência do módulo**

Esta propriedade tem uma influência significativa tanto na geometria como na capacidade de carga da engrenagem, pois participa em grande parte dos cálculos realizados segundo a diretiva VDI 2736.

Devido ao aumento do diâmetro da zona onde o cabo é enrolado, em comparação com o sistema pré-existente, o fator de segurança da capacidade de carga diminui, tendo este um valor inferior a 1. Por forma a garantir a segurança do novo sistema, é pretendido que o valor do coeficiente de segurança da capacidade de carga seja de, pelo menos, 1,1. Assim, seguindo a diretiva mencionada, é necessário alterar o módulo para o valor mais alto seguinte, de acordo com a norma DIN 780 - Parte 1 (Tabela 7), que faz referência a valores de módulos normalizados para engrenagens cilíndricas. Como consequência do aumento do módulo, os diâmetros primitivos do parafuso sem-fim e roda helicoidal aumentam, fazendo com que a dimensão da engrenagem seja maior que a do sistema já existente. No entanto, importa salvaguardar que o valor do coeficiente de segurança da capacidade de carga também depende do ângulo da hélice, sendo que é necessário realizar iterações com estes dois parâmetros para obter uma solução eficiente, segura e compacta.

#### 5.2.4. Influência do ângulo da hélice

O ângulo da hélice é dos parâmetros que mais influencia a geometria da engrenagem, assim como os seus fatores de segurança. Além disso, este também tem um peso significativo no valor da eficiência total. Quanto maior o valor do ângulo da hélice do parafuso sem-fim, maiores serão as dimensões gerais da engrenagem e menor será a sua eficiência. Assim, importa estabelecer um valor que satisfaça as condições de autobloqueio (eficiência total inferior a 50%) e, simultaneamente, torne a engrenagem o mais compacta possível. Assim, foram realizadas várias iterações para obter uma solução melhorada, e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Principais características da engrenagem para diferentes valores do módulo normal e ângulo da hélice, para PA 66 + 35 GF

|                                                                          | $m_n = 1,375 \text{ mm}$ |                      | $m_n = 1,5 \text{ mm}$ |                      |                      |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
|                                                                          | $\beta = 82,5^\circ$     | $\beta = 85,8^\circ$ | $\beta = 82,5^\circ$   | $\beta = 82,6^\circ$ | $\beta = 82,7^\circ$ |
| <b>Entre-eixo, <math>a</math> / mm</b>                                   | 20,242                   | 28,425               | 22,083                 | 22,234               | 22,391               |
| <b>Coeficiente de segurança da capacidade de carga, <math>S_c</math></b> | 0,848                    | 1,104                | 1,097                  | 1,103                | 1,110                |
| <b>Eficiência total, <math>\eta_{ges}</math> / %</b>                     | 49,91                    | 36,17                | 49,91                  | 49,59                | 49,26                |

A partir destes resultados pode-se concluir que a consideração de um módulo de 1,375 é inviável para esta solução, pois para obter um coeficiente de segurança de 1,1, o valor do ângulo da hélice tem de ser bastante elevado e a eficiência total é bastante inferior ao valor pretendido. No entanto, para valores de  $m_n = 1,5 \text{ mm}$  e  $\beta = 82,6^\circ$  obtêm-se valores de  $S_c$  e eficiência satisfatórios, fazendo com que estes sejam os parâmetros de entrada considerados para obtenção de uma melhor solução.

### 5.3. Resultados obtidos através da diretiva VDI 2736

Considerando todos os parâmetros de entrada relativos à geometria da engrenagem, estes estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Principais parâmetros de entrada da solução melhorada

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| $m_n / \text{mm}$             | 1,5  |
| $z_1$                         | 2    |
| $z_2$                         | 14   |
| $d_{\text{cabo}} / \text{mm}$ | 29,8 |
| $\beta_1 / ^\circ$            | 82,6 |

Tendo em conta estes parâmetros e as principais propriedades dos materiais referidos no capítulo 4.9, é possível realizar os cálculos para a engrenagem segundo a diretiva VDI 2736, para poder concluir acerca daquilo que é esperado obter da engrenagem com cada material. Os principais resultados obtidos estão apresentados na Tabela 19, enquanto que a totalidade dos resultados, assim como dos parâmetros de entrada, estão expostos no Anexo B.2: Nova solução.

Tabela 19 - Coeficientes de segurança e eficiência para os materiais considerados

|                          | PA 66 | PA 66 + 35 GF | PA 66 + 30 GF + 15 PTFE | iglidur® I3 |
|--------------------------|-------|---------------|-------------------------|-------------|
| $S_c$                    | 1,103 | 1,103         | 1,103                   | 1,103       |
| $S_F$                    | 2,854 | 3,888         | 2,777                   | 1,795       |
| $S_H$                    | 0,936 | 1,247         | -                       | 0,550       |
| $\eta_{\text{ges}} / \%$ | 54,20 | 49,59         | 54,20                   | 51,80       |

Comparando os resultados obtidos através do *benchmarking* do sistema existente com a nova solução desenvolvida, esta última foi melhorada em 10% no valor do coeficiente de segurança para a capacidade de carga característica,  $S_c$ , 14% no coeficiente de segurança na raiz do dente,  $S_F$ , e 5% no coeficiente de segurança no flanco do dente,  $S_H$ . A eficiência da engrenagem foi ainda reduzida em 1,86% para garantir o autobloqueio.

#### 5.4. Comparação dos resultados com o *software* KISSsoft

Foram realizados cálculos para os materiais PA 66 e PA 66 + 30 GF + 15 PTFE, visto que não existem bases de dados completas relativamente a PA 66 + 35 GF e iglidur® I3 que se possam implementar no KISSsoft. Os termos de comparação mais relevantes estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Comparação dos principais resultados da nova solução, segundo diretiva VDI 2736 e KISSsoft

|                   | PA 66    |          | PA 66 + 30 GF + 15 PTFE |          |
|-------------------|----------|----------|-------------------------|----------|
|                   | VDI 2736 | KISSsoft | VDI 2736                | KISSsoft |
| $S_c$             | 1,1      | 1,1      | 1,1                     | 1,1      |
| $S_F$             | 2,9      | 3,4      | -                       | -        |
| $S_H$             | 0,9      | 0,9      | -                       | -        |
| $\eta_{ges} / \%$ | 54,2     | 54,2     | 54,2                    | 54,2     |

Observando os resultados obtidos para o PA 66, pode-se afirmar que estes estão em conformidade entre si, sendo que a diferença de valores para o coeficiente de segurança no pé do dente,  $S_F$ , já era esperada, tendo sido previamente analisada no capítulo 4.7.

A base de dados do material PA 66 + 30 GF + 15 PTFE não contém os dados necessários para calcular a resistência da engrenagem no flanco e no pé do dente, daí não ser possível obter os coeficientes de segurança para estas zonas. No entanto, os restantes valores obtidos pelos dois métodos são concordantes, podendo-se então tomar estes resultados como fidedignos.

À semelhança do PA 66, o baixo coeficiente de atrito deste material faz com que a eficiência seja superior a 50%, fazendo com que o autobloqueio não esteja teoricamente comprovado neste caso.

Visto que os resultados não estão completos e os materiais em estudo no programa KISSsoft são diferentes dos que serão utilizados para produção de um protótipo (igidur® I3, por sinterização seletiva por laser) e futura produção em série (PA 66 + 35 GF por moldação por injeção), os resultados obtidos a partir dos cálculos da diretiva VDI 2736 têm uma maior relevância neste estudo, pois podem ser aplicados para qualquer material polimérico.

### 5.4.1. Fine sizing

O KISSsoft possui uma ferramenta capaz de melhorar a geometria de uma engrenagem através da geração de todas as soluções possíveis, considerando um intervalo de valores para algumas propriedades genéricas. Assim, foram realizadas várias iterações considerando os dados definidos anteriormente, acrescentando uma variação de  $\pm 2\%$  para o ângulo da hélice,  $\beta_1$ , e o entre-eixo,  $a$ , bem como a possibilidade de o módulo normal ter os valores normalizados de 1,375 ou 1,5 (Figura 45).

| Conditions I                                |            | Conditions II |            | Results   | Graphics                            |
|---------------------------------------------|------------|---------------|------------|-----------|-------------------------------------|
| Maximal no of solutions                     |            | 1000          |            |           |                                     |
| Nominal ratio/deviation in $\pm\%$ $i, i_e$ |            | 7.5000        |            | 5.0000    |                                     |
|                                             |            | Minimum       | Maximum    | Step      |                                     |
| Normal module                               | $m_n$      | 1.3750        | 1.5000 mm  | 0.1250 mm | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Normal pressure angle                       | $\alpha_n$ | 20.0000       | 21.0000 °  | 0.2000 °  | <input type="checkbox"/>            |
| Helix angle at ...e circle gear 1           | $\beta_1$  | 81.0000       | 84.0000 °  | 0.1000 °  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Center distance                             | $a$        | 21.8000       | 22.7000 mm | 0.1000 mm | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Profile shift coefficient gear 1            | $x_1$      | 0.0000        | 0.0000     | 0.1000    | <input type="checkbox"/>            |
| Range for profi...fficient gear 2           | $x_2$      | -0.1000       | 0.1000     |           |                                     |
| Number of teeth, gear 1                     | $z_1$      | 2             | 4          | 1         | <input type="checkbox"/>            |
|                                             |            | Gear 1        | Gear 2     |           |                                     |
| Fix number of teeth                         | $z$        | 2             | 14         |           | <input checked="" type="checkbox"/> |

Figura 45 - Parâmetros iniciais para *fine sizing*

Através destas iterações observou-se que os valores de  $b_1$  e  $b_2$  eram constantes em todas as soluções, sendo estes 13,05 e 8,25, respetivamente, e correspondem aos valores de largura mínimos para que haja correto engrenamento e transmissão de movimento. No entanto, para garantir que não haja problemas de engrenamento entre dentes, a largura do dente da roda helicoidal foi aumentada para 17 mm. Deste modo, mesmo que haja algum deslocamento lateral inesperado do parafuso sem-fim dentro da caixa, este continuará engrenado na roda helicoidal.

## 5.5. Desenvolvimento de protótipo

Estando a geometria da engrenagem definida, procedeu-se à modelação 3D dos componentes do sistema de regulação lombar através do *software Inventor*, começando pela engrenagem. O sistema completamente montado encontra-se representado na Figura 50, e os desenhos de definição de todas estas peças podem ser analisados no Anexo D.

O parafuso sem-fim representado na Figura 46 contém um veio, tendo duas funções principais:

- Permitir a fixação do elemento à estrutura metálica do assento, impedindo o seu deslocamento linear;
- Permitir a adição de uma roda de acionamento que possibilita ao utilizador regular manualmente a posição do ajuste lombar.

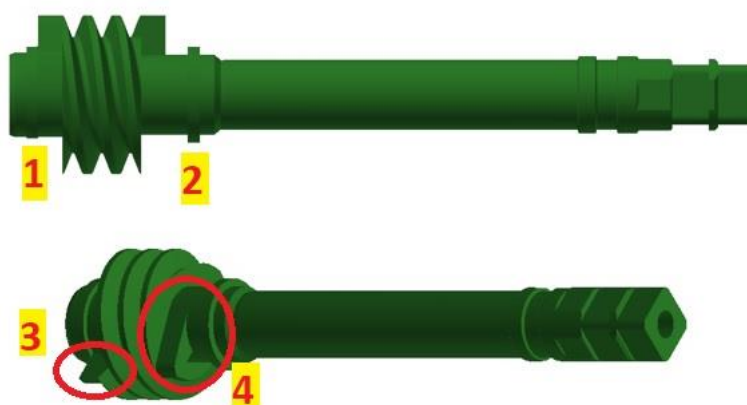


Figura 46 - Parafuso sem-fim

Os batentes 1 e 2 estão em contacto com a peça inferior e superior da caixa da engrenagem, respetivamente, impedindo o deslocamento linear do parafuso sem-fim dentro dessa mesma caixa. Além disso, esta peça possui mais dois batentes (3 e 4) que, em conjunto com os batentes 5 e 6 da roda dentada helicoidal representada na Figura 47, definem os fins-de-curso do movimento rotativo.

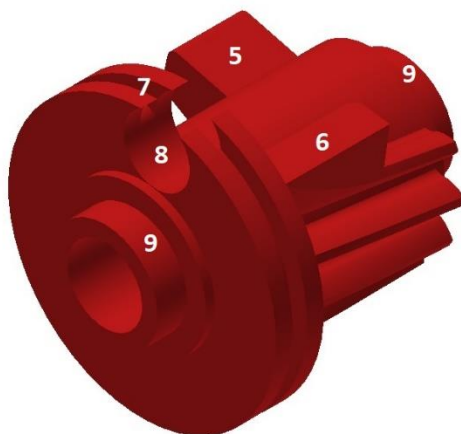


Figura 47 - Roda dentada helicoidal

Esta roda apenas necessita de 9 dos 14 dentes referidos anteriormente para que haja transmissão contínua do movimento desde o ponto inicial até ao fim-de-curso, em que 40 mm de cabo se encontram enrolados na roda, logo, apenas foram colocados os dentes necessários na roda helicoidal. A esta engrenagem foi adicionada uma roda de maior diâmetro com uma reentrância (7) onde o cabo é enrolado, sendo que a extremidade do cabo tem uma forma paralelepípedica e é colocada no furo realizado para esse efeito (8), ficando fixa nesta zona. Além disto foram acrescentados dois apoios (9), um de cada lado da roda helicoidal, para que esta fique apropriadamente apoiada nas peças inferior e superior da caixa da engrenagem da engrenagem, impedindo assim o seu deslocamento linear.

A peça inferior (Figura 48) e peça superior (Figura 49) da caixa foram desenvolvidas com o intuito de tornar o sistema o mais compacto possível, proteger a engrenagem de fatores externos e permitir a sua fixação à estrutura do assento automóvel, logo, a atenção ao detalhe no desenvolvimento da geometria é também bastante importante nestas peças.

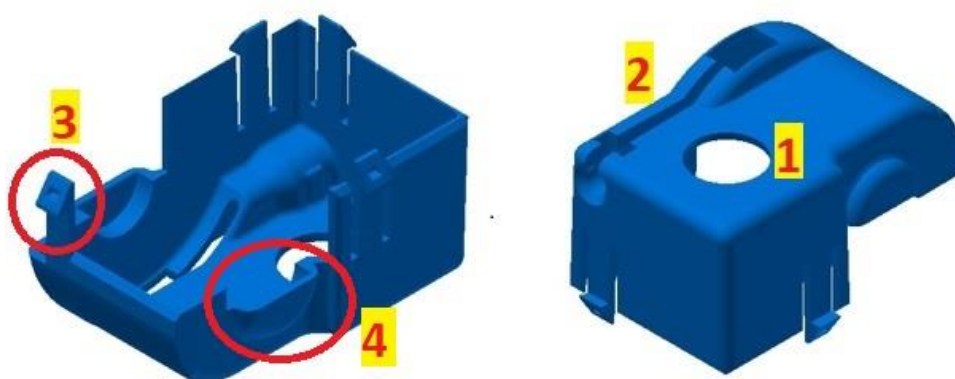


Figura 48 - Peça inferior da caixa da engrenagem

A peça inferior contém um furo (1) que permite a passagem de uma das extremidades do parafuso sem-fim, sendo que este último contém um batente (batente 1 da Figura 46) que, como referido anteriormente, encosta na parte interior da peça, limitando assim o deslocamento do parafuso sem-fim. O pormenor 2 é uma saliência geometricamente detalhada que permite a montagem do cabo Bowden na peça inferior da caixa. O cabo de aço circula dentro do cabo Bowden e a rotação da roda dentada helicoidal faz com que este distenda ou contraia, consoante a direção de rotação do parafuso sem-fim provocada pelo utilizador. O pormenor 3 representa um dos 4 apoios que fixam esta peça à peça superior. Por fim, foram adicionadas duas saliências (4) onde os apoios da roda dentada helicoidal (pormenor 9 da Figura 47) são colocados, permitindo apenas a rotação deste componente.

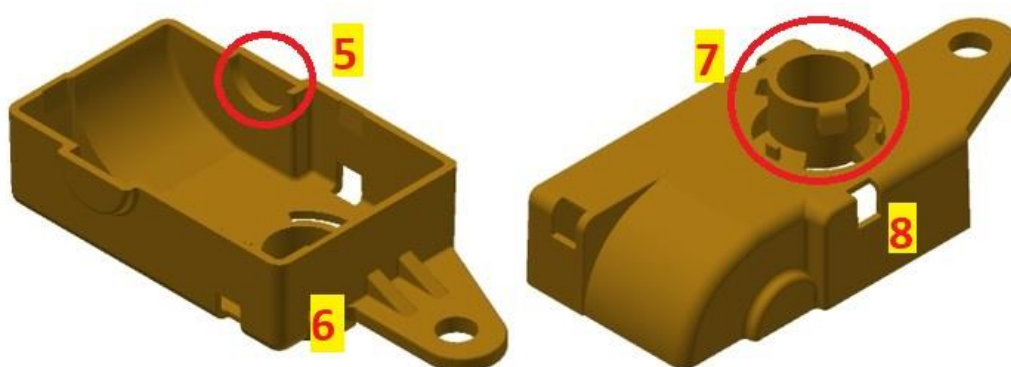


Figura 49 - Peça superior da caixa da engrenagem

A peça superior contém as mesmas saliências (5) que a peça inferior, sendo o seu propósito também o mesmo. Os pormenores 6 e 7 são extensões que permitem a fixação do sistema à estrutura metálica do assento automóvel, sendo o encaixe 6 fixo através de um parafuso, enquanto que o pormenor 7 é um encaixe puramente mecânico. Por último, esta peça contém rasgos (8) por onde passam os apoios da peça inferior, ficando assim o sistema completamente montado.

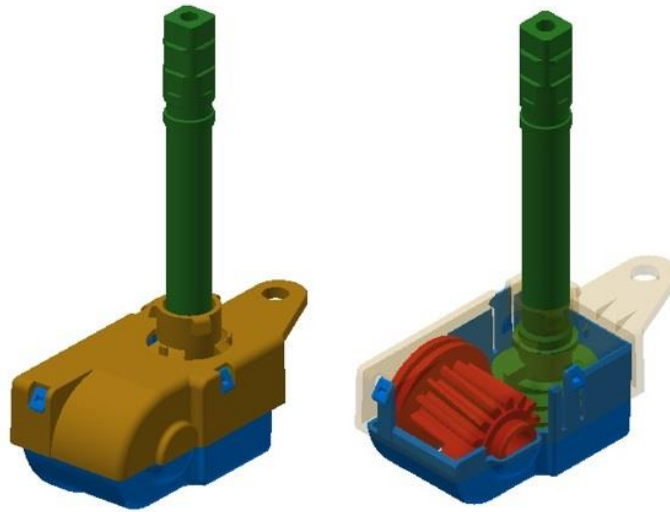


Figura 50 – Modelo 3D da nova solução de sistema de regulação

### 5.6. Análise estática da caixa e engrenagem redutora

O acionamento da engrenagem origina a atuação de forças sobre esta, provocando reações da mesma intensidade na peça superior e inferior da caixa. Assim, torna-se importante realizar uma análise estática da caixa e da engrenagem redutora, por forma a conhecer a intensidade das forças atuantes e analisar se estas peças resistirão às forças que serão aplicadas.

Na Figura 51 está representado o diagrama de corpo livre da roda helicoidal.

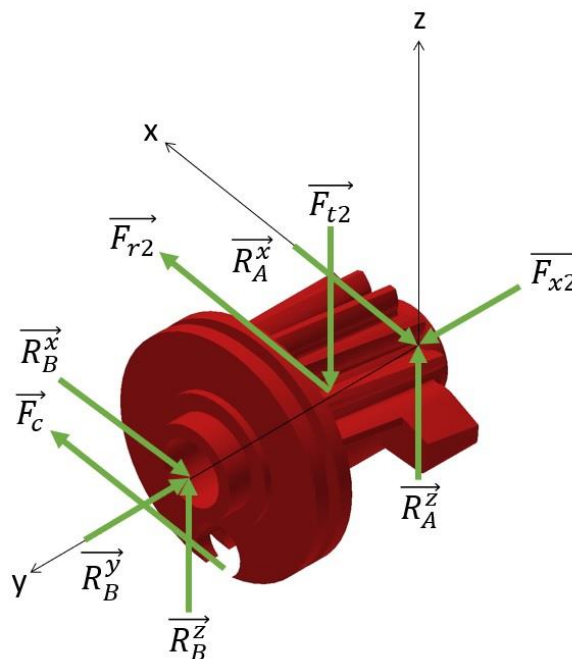


Figura 51 - Diagrama de corpo livre da roda helicoidal

Visto que cada peça da engrenagem redutora está em equilíbrio estático, é possível retirar 4 equações a partir deste diagrama, sendo estas as Equações (54), (55), (56) e (57).

$$\sum \overrightarrow{F^x} = \vec{0} \Leftrightarrow \overrightarrow{R_A^x} + \overrightarrow{R_B^x} = \overrightarrow{F_{r2}} + \overrightarrow{F_C} \quad (54)$$

$$\sum \overrightarrow{F^y} = \vec{0} \Leftrightarrow \overrightarrow{F_{x2}} = \overrightarrow{R_B^y} \quad (55)$$

$$\sum \overrightarrow{F^z} = \vec{0} \Leftrightarrow \overrightarrow{R_A^z} + \overrightarrow{R_B^z} = \overrightarrow{F_{t2}} \quad (56)$$

$$\sum \overrightarrow{M_B^x} = \vec{0} \Leftrightarrow -17,88 \times \overrightarrow{F_{t2}} - 35,75 \times \overrightarrow{R_A^z} = \vec{0} \quad (57)$$

Para efeitos de cálculo, as distâncias foram consideradas em milímetros.

Sabe-se ainda que  $F_n$ ,  $F_{r1}$  e  $F_{x2}$  são dados pelas Equações (30), (58) e (59), respetivamente,

$$F_{r1} = -F_{r2} = F_{t1} \times \frac{\tan \alpha_n}{\sin(\gamma_1 + \rho_z)} \quad (58)$$

$$\overrightarrow{F_{x2}} = -\overrightarrow{F_{t1}} \quad (59)$$

e que a reação da força tangencial da roda helicoidal é igualmente distribuída por ambos os apoios da roda helicoidal, pois encontram-se à mesma distância do seu ponto de aplicação.

$$\overrightarrow{R_A^z} \cong \overrightarrow{R_B^z} \quad (60)$$

A partir destas equações, constata-se que existem 7 incógnitas ( $R_A^x$ ,  $R_A^z$ ,  $R_B^x$ ,  $R_B^y$ ,  $R_B^z$ ,  $F_{r2}$ ,  $F_{x2}$ ) para 7 equações e os seus resultados encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados do equilíbrio estático da roda helicoidal

|                                  |         |
|----------------------------------|---------|
| $R_A^x / \text{N}$               | -82,73  |
| $R_A^z / \text{N}$               | 211,14  |
| $R_B^x / \text{N}$               | -382,68 |
| $R_B^y / \text{N}$               | -105,86 |
| $R_B^z / \text{N}$               | 211,03  |
| $F_{r2} / \text{N}$              | 165,41  |
| $F_{x2} / \text{N}$              | 105,86  |
| $F_{t1}^* / \text{N}$            | 105,86  |
| $F_{t2}^* / \text{N}$            | -422,17 |
| $F_C^* / \text{N}$               | 300,00  |
| $F_n / \text{N}$                 | 460,03  |
| * Valores previamente conhecidos |         |

O equilíbrio estático do parafuso sem-fim é representado pelo diagrama de corpo livre da Figura 52 e pelas Equações (61), (62) e (63).

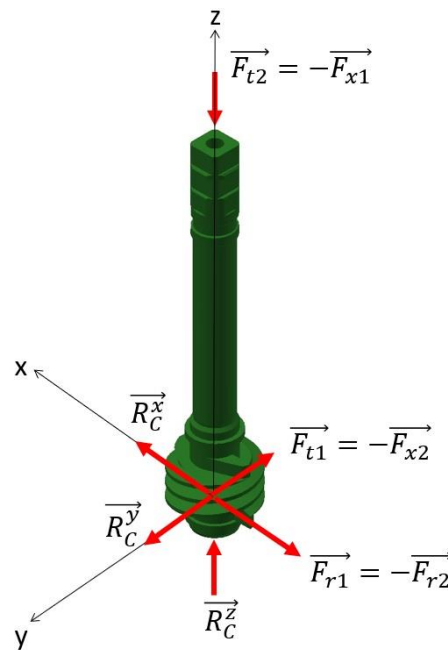


Figura 52 - Diagrama de corpo livre do parafuso sem-fim

$$\sum \vec{F}^x = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{R}_C^x = \vec{F}_{r1} = 165,41 \text{ N} \quad (61)$$

$$\sum \vec{F}^y = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{R}_C^y = \vec{F}_{t1} = 105,86 \text{ N} \quad (62)$$

$$\sum \vec{F}^z = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{R}_C^z = \vec{F}_{t2} = -422,17 \text{ N} \quad (63)$$

Por fim, os diagramas de equilíbrio estático da peça inferior e superior estão representados na Figura 53 e Figura 54, respectivamente.

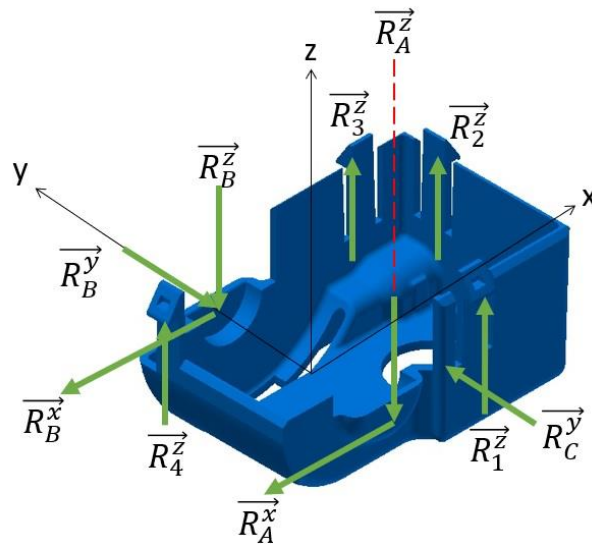


Figura 53 - Diagrama de corpo livre da peça inferior

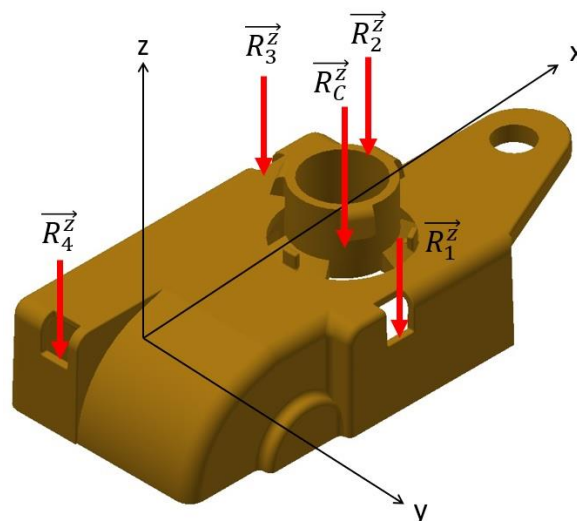


Figura 54 - Diagrama de corpo livre da peça superior

As reações nos apoios ( $R_1^z$ ,  $R_2^z$ ,  $R_3^z$  e  $R_4^z$ ) são originadas a partir da força axial no parafuso sem-fim ( $F_{x1}$ ) que é distribuída pelas reações  $R_A^z$  e  $R_B^z$  na peça inferior. Estas 4 incógnitas são calculadas a partir das Equações (64), (65), (66) e (67).

$$\sum \vec{F}^y = \vec{0} \quad (64)$$

$$\sum \vec{M}^x = \vec{0} \quad (65)$$

$$\sum \vec{M}^y = \vec{0} \quad (66)$$

$$\sum \vec{M}_2^x = \vec{0} \quad (67)$$

Resolvendo este sistema de equações, os resultados obtidos indicavam que a reação no apoio 3 tinha o sentido contrário às restantes. Tendo isto em conta, foi considerado que a reação neste ponto seria nula, estando a força distribuída pelos restantes 3 apoios. Assim sendo, os resultados das reações nos apoios da caixa da engrenagem estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados do equilíbrio estático na peça inferior

|             |        |
|-------------|--------|
| $R_1^z / N$ | 142,56 |
| $R_2^z / N$ | 50,99  |
| $R_3^z / N$ | 0      |
| $R_4^z / N$ | 228,62 |

A partir destes valores, é possível calcular a tensão aplicada em cada um destes apoios, através da Equação (68),

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (68)$$

em que A representa a área de interseção entre a peça inferior e superior nos apoios. Os valores de tensão máxima aplicada estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados da tensão aplicada nos apoios da caixa da engrenagem

|                  |       |
|------------------|-------|
| $\sigma_1$ / MPa | 12,26 |
| $\sigma_2$ / MPa | 5,95  |
| $\sigma_3$ / MPa | 0     |
| $\sigma_4$ / MPa | 19,66 |

A tensão limite de elasticidade do material do qual será constituído o protótipo é de 36 MPa, ou seja, o fator de segurança é de 1,8 no apoio 4, que suporta maior carga.

Para esta análise, foram desprezados os efeitos da flexão nestes apoios.

### 5.7. Análise de processos de prototipagem do sistema

Para a produção de um protótipo foram considerados dois tipos de processos: impressão 3D e maquinagem. O processo de maquinagem permite obter peças com elevada precisão dimensional e bom acabamento superficial, que são características importantes para a realização de testes funcionais na engrenagem. No entanto, as peças possuem várias arestas vivas, sendo que as ferramentas de corte não conseguem replicar esta geometria devido à sua forma circular. Assim, este método é inviável para a produção do protótipo.

Quanto ao processo de impressão 3D, existem várias alternativas disponíveis, tais como a estereolitografia (SL/SLA), sinterização seletiva por laser (SLS), modelação por extrusão de plástico (FDM), impressão tridimensional (TDP), entre outros. A empresa fornecedora do protótipo (igus) tem bastante facilidade em produzir peças por SLS, sendo então este o processo selecionado. Este método confere às peças excelentes propriedades mecânicas, sendo uma boa opção para a construção de um protótipo funcional. Como principal desvantagem, as peças produzidas por este processo possuem tolerâncias dimensionais alargadas, o que pode influenciar o funcionamento do sistema. Além disso, obtém-se peças com elevada rugosidade superficial e porosidade, mas estes parâmetros não devem influenciar significativamente os resultados dos testes de validação, pois estes são realizados em ambientes com baixo nível de humidade (assim como o interior de um assento automóvel), permitindo que as propriedades mecânicas se mantenham constantes.

## 5.8. Prototipagem do sistema

O protótipo idealizado, constituído pelo material iglidur® I3, foi produzido por impressão 3D (SLS) pela empresa igus, sendo que as peças obtidas estão representadas na Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58 e Figura 59.



Figura 55 - Protótipo do parafuso sem-fim

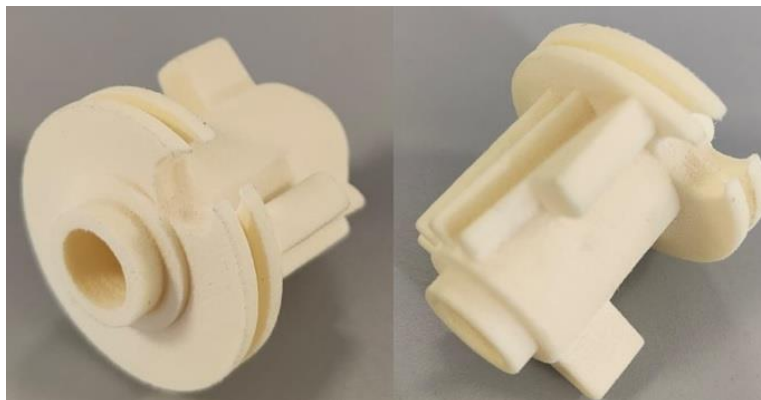


Figura 56 - Protótipo da roda dentada helicoidal

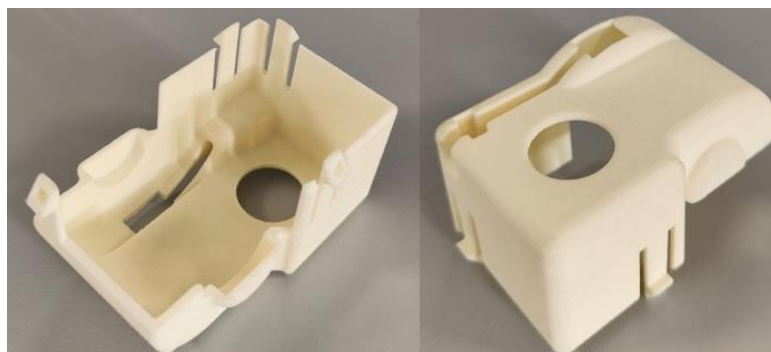


Figura 57 - Protótipo da peça inferior



Figura 58 - Protótipo da peça superior



Figura 59 - Protótipo do sistema de regulação lombar montado

Assim como previsto inicialmente, é possível observar que a rugosidade superficial do material é elevada, mas esta terá pouca influência no funcionamento mecânico do sistema. Após a análise visual detalhada de cada peça prototipada e da montagem do sistema, concluiu-se que deviam ser realizadas algumas alterações na geometria da peça inferior, pois existia alguma margem de movimentação lateral entre esta e a peça superior, algo que era difícil prever através do modelo 3D desenvolvido no *software Inventor*. Além disso, foi possível denotar que as tolerâncias de fabrico da caixa da engrenagem eram pouco apertadas.

Assim, a empresa Reiman produziu uma nova peça com um material diferente (Hyperion Resistent), sendo que a geometria desta foi melhorada, por forma a garantir o bom funcionamento da engrenagem, e este novo elemento está representado na Figura 60.

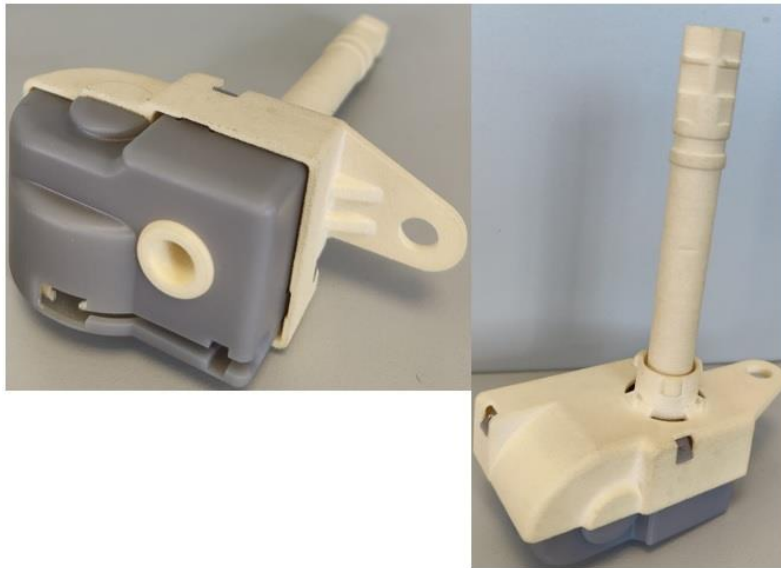


Figura 60 - Nova peça inferior

Além disso, após montagem do sistema, a extremidade do cabo de aço não permanecia fixo na roda helicoidal de um modo satisfatório. Como tal, foi produzido um casquilho pela empresa Tornipeças, cujo desenho de definição está exposto no Anexo D.5: Casquilho de ajuste do cabo de aço na roda helicoidal, para tornar o furo da roda helicoidal menor e, consequentemente, dar menos margem de movimentação à extremidade do cabo, como representado na Figura 61.



Figura 61 - Roda helicoidal com casquilho de ajuste

## 6. Validação do conceito

### 6.1. Testes de validação

Por forma a conhecer a aplicabilidade deste sistema na indústria automóvel, é necessário realizar testes que verifiquem se o sistema cumpre com os requisitos exigidos. Estes requisitos garantem que o sistema tem resistência à tração, flexão, fadiga e térmica, por forma a garantir o seu bom funcionamento durante o tempo de vida esperado, bem como a segurança dos ocupantes. Os critérios a aplicar para este sistema foram fornecidos pela empresa Faurecia e encontram-se apresentados de seguida.

#### A. Teste de deslocamento

Teste de flexão realizado num *suspension pad* sem revestimento, aplicando uma placa oval de 250 x 300 mm.

#### B. Teste de deslocamento

Ajuste lombar mínimo:

- Aplicação de força de 10 daN no ponto nº 1 (zona Hx);
- Aplicação de força de 10 daN no ponto nº 2 (zona lombar);
- Aplicação de força de 5 daN no ponto nº 3 (zona dorsal).

#### C. Teste de deslocamento

Ajuste lombar máximo:

- Aplicação de força de 10 daN no ponto nº 1 (zona Hx);
- Aplicação de força de 10 daN no ponto nº 2 (zona lombar);
- Aplicação de força de 5 daN no ponto nº 3 (zona dorsal).

#### D. Teste de binário em assento completo

Binário de  $1,5 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 1 \text{ N}\cdot\text{m}$  (depende da espuma, revestimento e estrutura metálica).

E. Teste de uso indevido

- Aplicação de um binário de 11 N·m durante 2 s no sistema;
- Aplicação de uma força de 500 N no cabo de aço.

F. Teste de autobloqueio

- Aplicação de uma força estática de 250 N enquanto o sistema está acionado;
- Aplicação de uma força variável entre 0 e 200 N enquanto o sistema está acionado.

G. Teste de resistência ao choque

- Resistência ao choque a temperatura ambiente (23 °C);
- Resistência ao choque a baixa temperatura: 4h a -30 °C.

Não pode haver danos, formação de ranhuras ou alteração da aparência (deformação permanente, branqueamento, etc)

H. Teste de resistência ao calor

- Armazenamento de um banco completo numa câmara climática: 22h a 90 °C;
- Requerimentos no fim de um ciclo (4h a 23 °C): não haver mudanças visuais, deformações e alterações na funcionalidade.

I. Teste de inflamabilidade

Relatório do material relativamente à norma FMVSS 302.

No teste A não é indicado qual o valor pretendido para a deformação do *suspension mat*, logo, este não será realizado até obter conhecimento desse valor. Para todos os efeitos, a placa oval referida foi projetada. Para os testes B a F, foram projetados diversos elementos para que estes possam ser realizados, estando estes apresentados no capítulo 6.2. Relativamente ao teste D, continuará a ser considerado o requisito inicial do cliente, em que o binário se deve situar entre 0,3 e 1,5 N·m, pois foi seguindo este parâmetro que a engrenagem foi dimensionada. No que toca aos testes G, H e I, apenas poderão ser realizados num protótipo constituído pela matéria prima final (PA 66 + 35 GF), pois estão relacionados com as propriedades do material constituinte do sistema. Assim, estes não serão realizados no protótipo obtido neste projeto.

## 6.2. Projeto de banco de ensaios

O banco de ensaios foi projetado de modo a que se pudessem realizar todos os testes de validação exigidos, considerando ainda que o mesmo pode ser utilizado no futuro para realizar diferentes testes com *suspension mats*. Na Tabela 24 é apresentada a lista de peças desenvolvidas para o banco de ensaios, sendo que os seus desenhos de definição podem ser consultados no Anexo E.

Tabela 24 - Lista de peças desenvolvidas para o banco de ensaios

| Nome                         | Material     | Quantidade | Anexo                                     |
|------------------------------|--------------|------------|-------------------------------------------|
| Mesa                         | Al 5754      | 1          | E.1: Mesa                                 |
| Castelo horizontal           | CK 45        | 2          | E.2: Torres de apoio                      |
| Castelo vertical             | CK 45        | 2          | E.2: Torres de apoio                      |
| Castelo vertical para o cabo | CK 45        | 1          | E.2: Torres de apoio                      |
| Castelo de fixação           | CK 45        | 2          | E.2: Torres de apoio                      |
| Chapa de fixação             | St 37        | 1          | E.3: Chapa de fixação                     |
| Braço                        | Al 5754      | 1          | E.4: Braço                                |
| Placa de forma oval          | Al 5754      | 1          | E.5: Elemento de forma oval               |
| “Mini form”                  | Al 5754      | 1          | E.6: “Mini form”                          |
| Cavilha                      | Aço<br>Prata | 3          | E.7: Outros elementos de pequena dimensão |
| Pino                         | CK 45        | 2          | E.7: Outros elementos de pequena dimensão |
| Tampa para castelo vertical  | Al 5754      | 2          | E.7: Outros elementos de pequena dimensão |
| Casquilho                    | Al 5754      | 2          | E.7: Outros elementos de pequena dimensão |
| Calço                        | Al 5754      | 7          | -                                         |

As propriedades do alumínio 5754 estão expostas na Tabela 25.

Tabela 25 - Propriedades mecânicas do alumínio 5754

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| <b>Densidade</b>                  | 2,66    |
| <b>Módulo de Young / GPa</b>      | 68      |
| <b>Resistência à tração / MPa</b> | 220-270 |
| <b>Dureza Brinell / HB</b>        | 63      |

A mesa do banco de ensaios apresentada na Figura 62 é constituída por alumínio, tendo 15 mm de espessura para garantir a rigidez da estrutura.

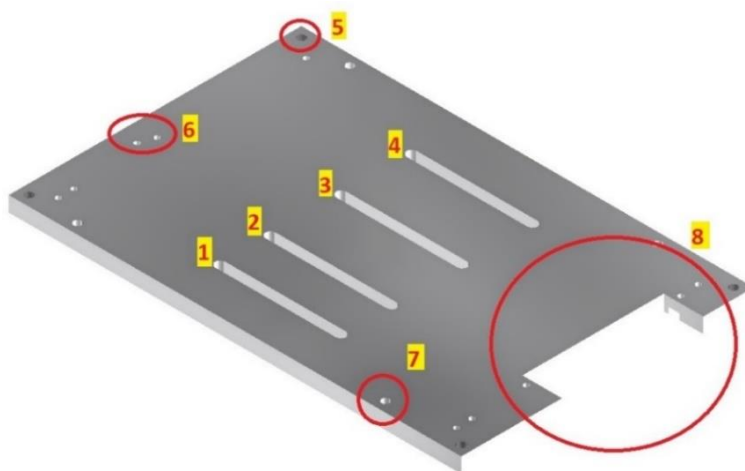


Figura 62 - Mesa do banco de ensaios

Esta possui 4 rasgos localizados nas principais zonas de um *suspension mat*, sendo estas a zona representativa do ponto H (1), zona lombar (2), zona intermédia entre lombar e dorsal (3) e zona dorsal (4), permitindo assim a medição do deslocamento nestas zonas, através da colocação de um cabo que atravessa estes rasgos e um dinamómetro suspenso neste. Para que o banco de ensaios não esteja assente no chão, existe a opção de colocar pés (zona 5 é um dos 4 furos roscados existentes) que permitem a regulação da sua altura total. Os pés seleccionados para este banco de ensaios provêm do fabricante *Elesa Ganter*, estão representados na Figura 63 e as suas propriedades são explicitadas na Tabela 26.



Figura 63 - Pés LSX.A-AS do fabricante *Elesa Ganter*

Tabela 26 – Especificações dos pés provenientes do fabricante *Elesa Ganter*

| Especificações                   |                       |
|----------------------------------|-----------------------|
| <b>Designação</b>                | LSX.A-26-10-AS-M10x45 |
| <b>Quantidade</b>                | 4                     |
| <b>Código do artigo</b>          | 531531                |
| <b>Diâmetro da base / mm</b>     | 26                    |
| <b>Diâmetro do parafuso</b>      | M10                   |
| <b>Altura para ajuste / mm</b>   | 45                    |
| <b>Carga estática máxima / N</b> | 4000                  |
| <b>Peso / g</b>                  | 35                    |

O peso total do banco de ensaios, sistema de regulação lombar e forças aplicadas neste nunca passará dos 4000 N, logo, estes pés serão suficientes para suportar este conjunto.

Os furos semelhantes aos da zona 6 permitem a fixação mecânica das diferentes torres à mesa do banco de ensaios através da adição de parafusos de cabeça cilíndrica de oco hexagonal M5. A mesa possui caixas para que as cabeças dos parafusos estejam inseridas nesta, como demonstrado na Figura 64, garantindo assim que o banco de ensaios possa ser pousado em qualquer superfície sem danificar os parafusos e tornando também o banco de ensaios mais apelativo.

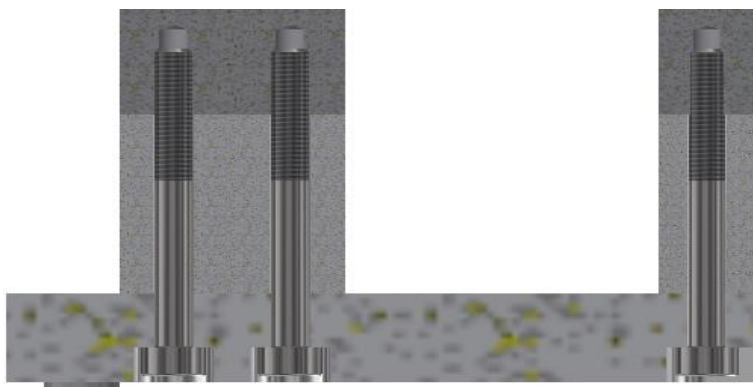


Figura 64 - Vista em corte dos furos cegos roscados para alojar os parafusos na mesa do banco

O furo da zona 7 e os restantes 3 furos simétricos permitem a fixação do banco de ensaios a uma estrutura pré-existente, com uma altura suficiente para realizar testes com um dinamómetro, pois a altura obtida com os pés indicados anteriormente poderá não ser tão adequada.

Por fim, o rasgo da zona 8 permite a montagem do sistema de regulação lombar na mesma posição que estaria caso este fosse colocado num banco no interior de um automóvel.

O sistema está ainda fixo a um componente da estrutura metálica do assento automóvel, replicando assim do melhor modo possível a posição dos componentes que interagem com o sistema de regulação lombar.

Para que o *suspension mat* esteja tensionado no banco de ensaios da mesma forma que se encontra num banco automóvel, foram criadas várias torres de fixação para o efeito, representadas na Figura 65.

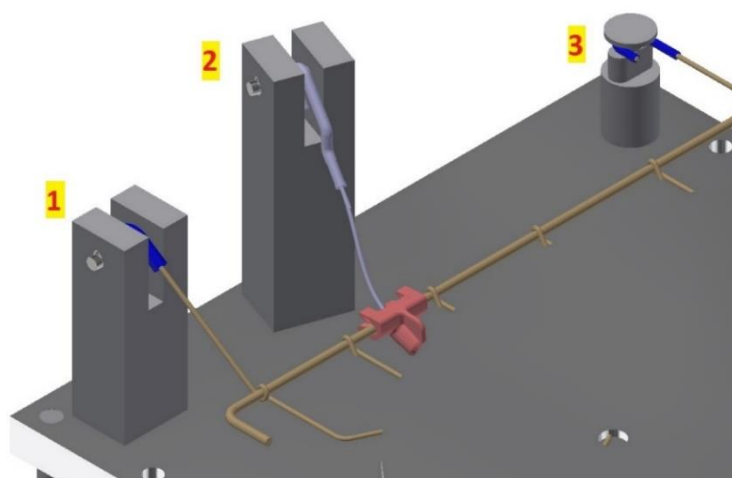


Figura 65 - Torres de fixação do *suspension mat* ao banco de ensaios

As torres de fixação 1 e 2, constituídas por aço estrutural CK45 e acabamento superficial galvanizado, possuem cavilhas que possibilitam a colocação dos ganchos do *suspension mat*, simulando o mesmo tipo de encaixe existente na estrutura metálica de um assento automóvel representado na Figura 66. Estas cavilhas estão alojadas nas torres de fixação com anéis elásticos, bloqueando assim o seu movimento.

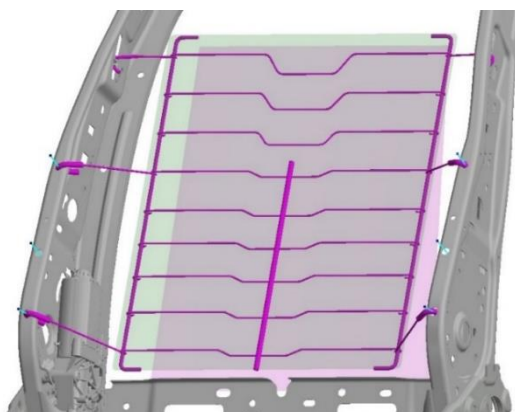


Figura 66 - Exemplo do tipo de encaixe existente na estrutura de um assento automóvel para o *suspension mat*

A torre de fixação 3 tem uma geometria diferente pois o gancho que aqui encaixa tem uma posição horizontal, contrariamente aos restantes. Assim, foi criado um pino que rosca neste castelo de fixação e tensiona o gancho, sendo que o impede de escapar caso este se mova verticalmente.

Para a colocação do sistema de regulação lombar no banco de ensaios foi criada uma chapa de aço estrutural ST 37 (1), fixada em castelos com parafusos de cabeça cilíndrica de oco hexagonal M5 (2), simbolizados na Figura 67.

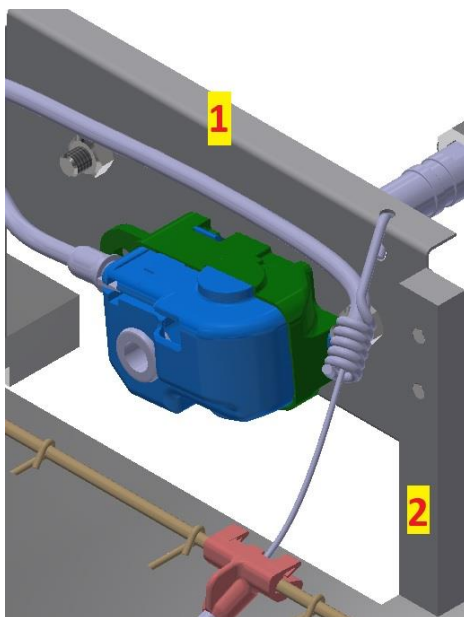


Figura 67 - Sistema de regulação lombar afixado ao banco de ensaios

Do lado oposto do regulador lombar é colocado o componente da estrutura metálica do assento, sendo este afixado à chapa por parafusos M6 (3), casquilhos (4) (ambos simbolizados na Figura 68) e porcas hexagonais (visíveis na Figura 67).

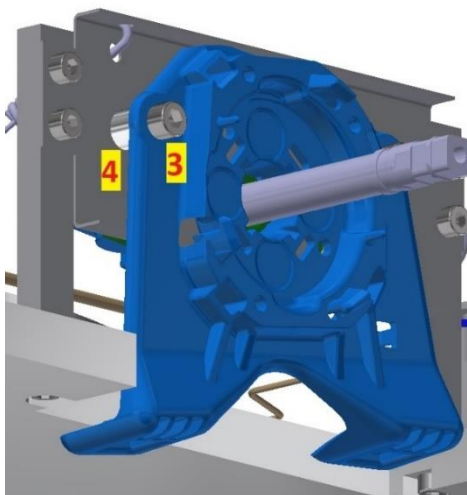


Figura 68 - Peça pertencente à estrutura metálica de um assento automóvel

Para a aplicação de binário no sistema foi ainda desenvolvido um braço (representado na Figura 69), também em alumínio, com 2 furos, distanciados em 30 e 100 mm do centro do veio de ligação, que encaixa no veio do parafuso sem-fim. Este braço é fixo no veio através de 2 parafusos M3 de cabeça cilíndrica com fenda (5) que apenas intersejam com uma saliência desse mesmo veio, tendo assim a função de batente.

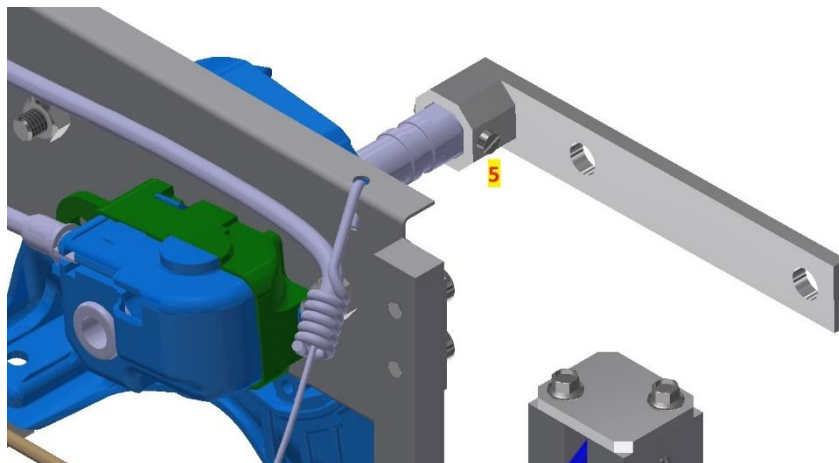


Figura 69 - Braço de encaixe

Por fim, para a realização do teste de validação A, foi gerada uma placa de forma oval como a da Figura 70, em alumínio, com as dimensões 250 x 300 x 3 mm e 8 furos, situados nas zonas coincidentes com os rasgos da mesa do banco de ensaios, permitindo assim a passagem de um cabo onde irá estar suspenso um dinamómetro para a medição do deslocamento do produto aquando da aplicação de uma força na placa. O intuito de ter uma placa aplicada com esta forma é a de simular a distribuição da força exercida pelas costas do utilizador durante o funcionamento do mecanismo.

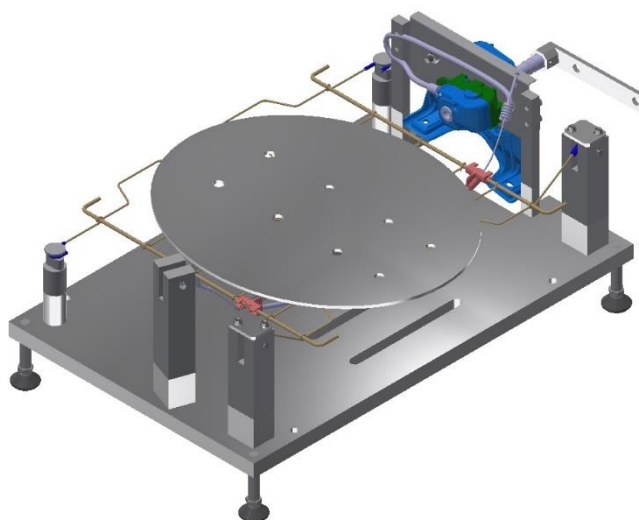


Figura 70 – Placa de forma oval

Foi também desenvolvida uma chapa retangular, designada de “mini form”, para a realização do teste de validação B/C, podendo esta ser visualizada na Figura 71.

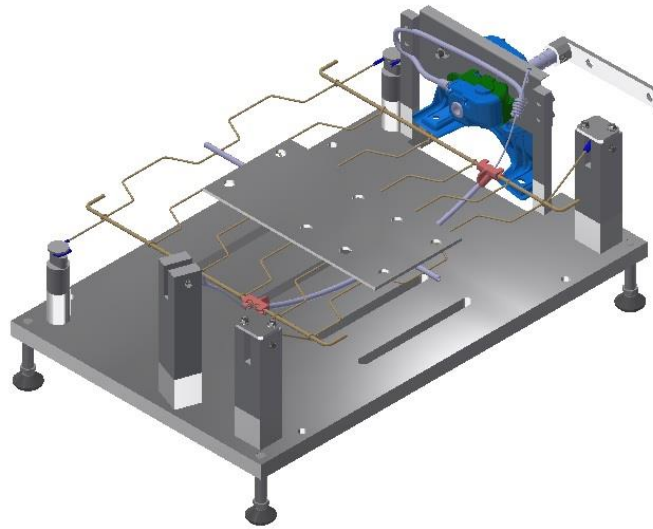


Figura 71 - Chapa "mini form"

O banco de ensaios com pés e sem a aplicação da placa oval pode ser visualizado na Figura 72 e o banco de ensaios montado sob a estrutura metálica para realização de testes de deslocamento está representado na Figura 73.

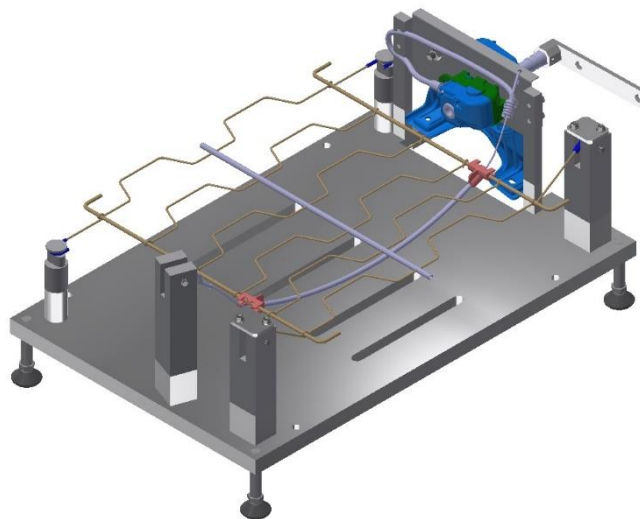


Figura 72 - Banco de ensaios sem aplicação da placa oval

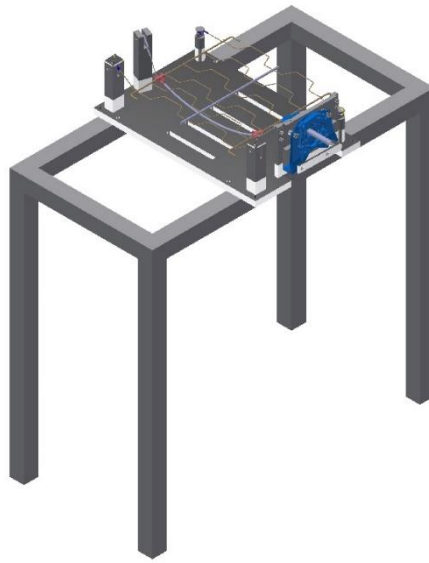


Figura 73 - Banco de ensaios fixo a uma mesa pré-existente

### 6.3. Produção do banco de ensaios

O banco de ensaios desenvolvido foi produzido, sendo que o seu aspeto final se encontra representado na Figura 74.

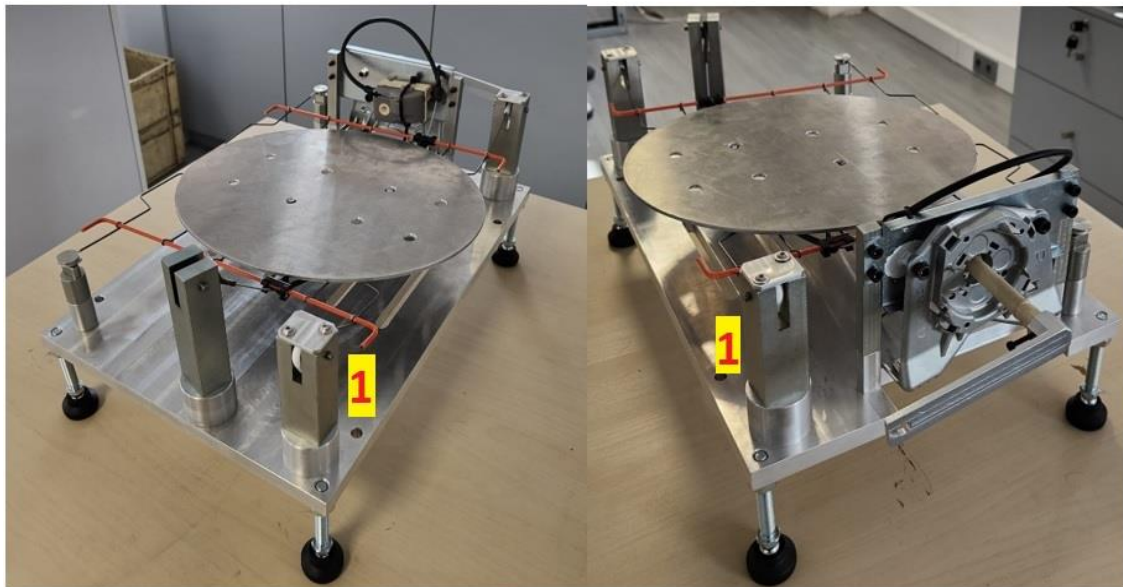


Figura 74 - Banco de ensaios montado

Após montagem do banco de ensaios inicialmente concebido, denotou-se que a aplicação de uma força vertical no *suspension mat* provoca uma deformação maior do que o

esperado no mesmo, causando a interseção do cabo Bowden com a mesa do banco de ensaios. Assim, foram acrescentados calços com 30 mm de altura a todas as torres de apoio, por forma a aumentar a distância entre o *suspension mat* e a mesa, garantindo assim que não há contacto entre as duas partes. Além disso, o funcionamento do regulador lombar provoca uma deformação substancial do arame fixo no castelo vertical (1), fazendo com que os ganchos se elevem e deixem de estar em contacto com as cavilhas. Para garantir que estes ganchos não se afastariam das cavilhas onde estão afixados, foram adicionadas tampas aparafusadas a estes castelos.

## 6.4. Ensaios B/C: Teste de deslocamento

### 6.4.1. Procedimento de ensaio

A informação relativa ao procedimento a cumprir para a realização destes testes é escassa, logo, apenas contactando com o fornecedor destes testes de validação seria possível realizar os mesmos corretamente. Visto que não se obteve acesso a este procedimento, foi utilizado um método para a obtenção do deslocamento nas várias zonas do *suspension mat*.

Este consistiu em colocar o centro da “mini form” nas zonas dorsal, lombar e zona representativa do ponto H e aplicar forças de 5, 50 e 100 N no seu centro. A medição do deslocamento foi feita na zona de aplicação da força, com um comparador, como representado na Figura 75.

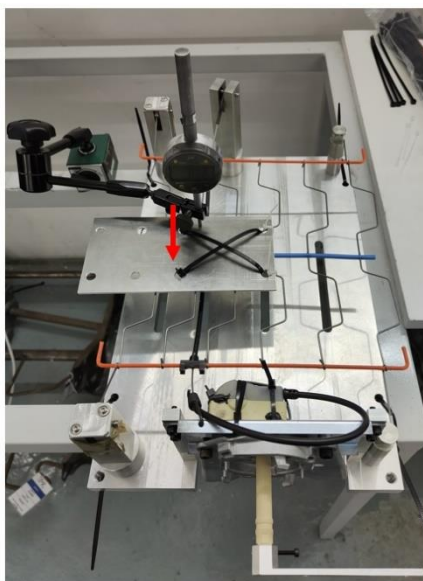


Figura 75 - Representação do ensaio B/C

### 6.4.2. Resultados obtidos

Como forma de análise dos resultados obtidos, existem alguns resultados teóricos que podem ser considerados como valores de deslocamento esperados para cada zona do *suspension mat*. É importante destacar que os resultados esperados foram obtidos com um procedimento desconhecido, utilizando a mesma “mini form”, e estes têm uma tolerância de  $\pm 10\%$ , como apresentado na Figura 76, Figura 77 e Figura 78.

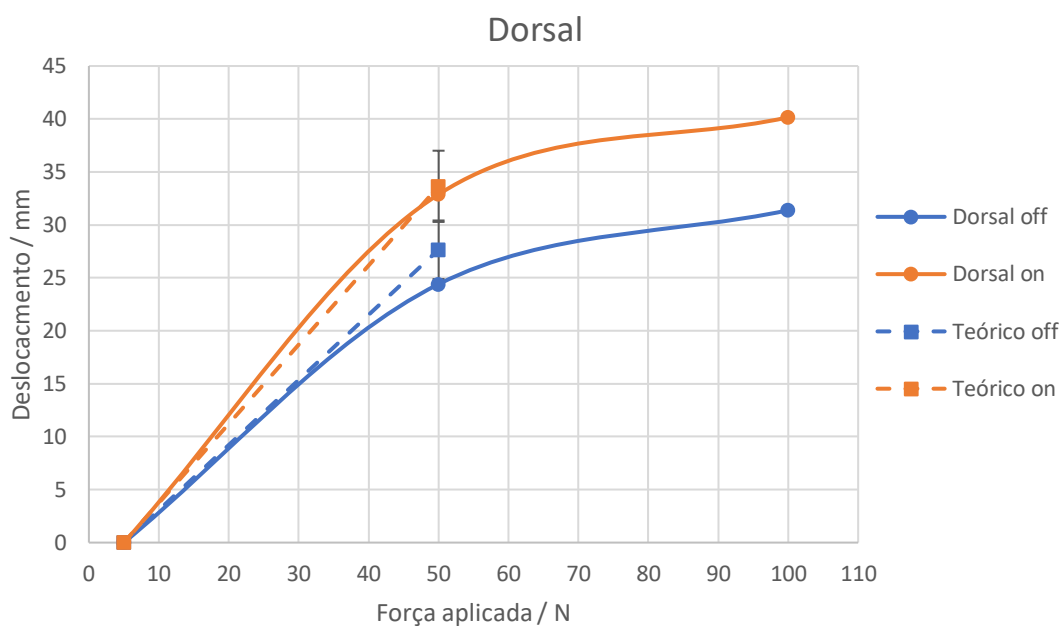


Figura 76 - Gráfico do deslocamento em função da força aplicada para a zona dorsal

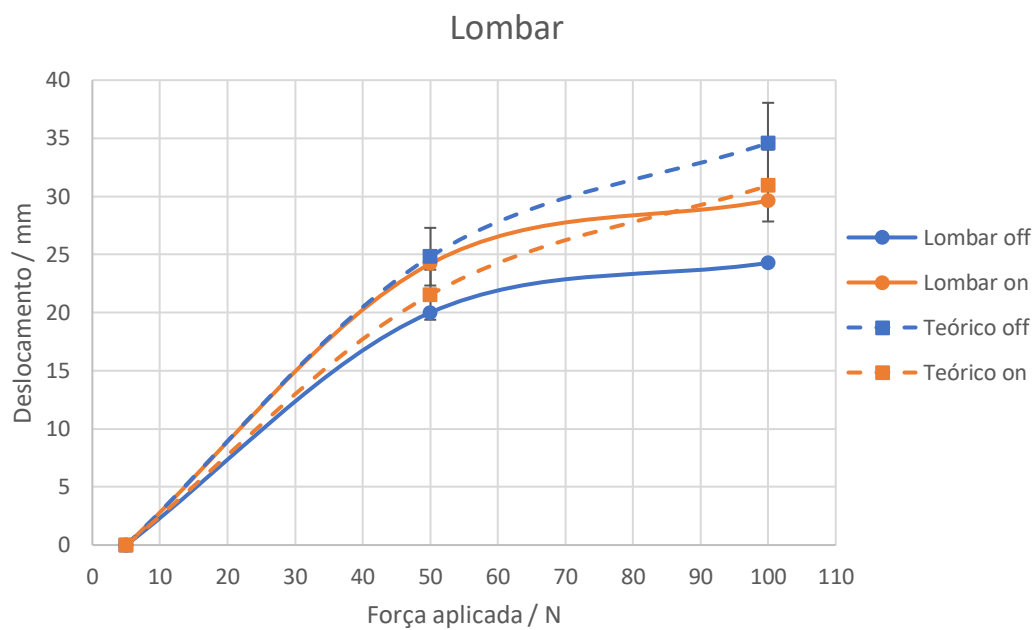


Figura 77 - Gráfico do deslocamento em função da força aplicada para a zona lombar

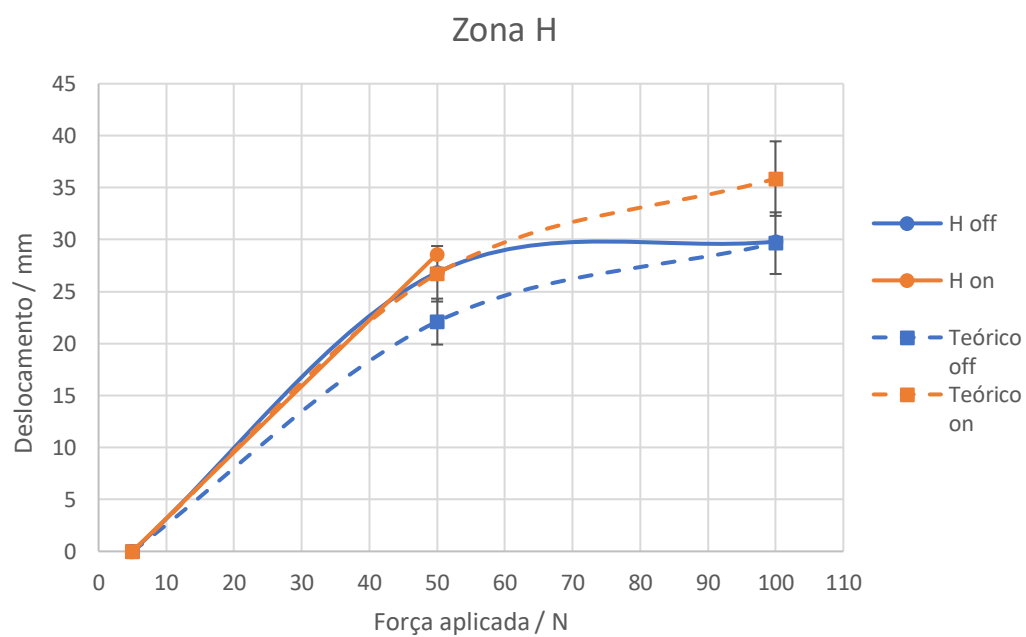


Figura 78 - Gráfico do deslocamento em função da força aplicada para a zona representativa do ponto H

### 6.4.3. Discussão de resultados do ensaio B/C

A partir dos resultados dos deslocamentos obtidos podem-se retirar várias ilações, tais como:

- Quando o regulador lombar se encontra acionado, os resultados obtidos encontram-se dentro do intervalo de valores esperados;
- O procedimento de ensaios realizado pode ser diferente do que foi efetuado para a obtenção dos resultados pretendidos;
- Os resultados obtidos dependem significativamente das propriedades do *suspension mat*, que não foi objeto de estudo desta dissertação, sendo que não foi produzida pelo Grupo PR.

Assim sendo, é necessário que o procedimento de ensaio seja validado pelo cliente para que este possa ser realizado de forma semelhante e que seja aplicada força na “mini form” do mesmo modo, para a obtenção de resultados comparáveis.

## 6.5. Ensaio D: Teste de binário

### 6.5.1. Procedimento de ensaio

Tal como no teste anterior, o procedimento de ensaio para este teste é desconhecido e, tendo isso em conta, foram utilizados 2 métodos distintos para a obtenção de resultados. O primeiro ensaio (D.1) consistiu na colocação de vários pesos diferentes sobre o *suspension mat* e medição do binário necessário para provocar o funcionamento do sistema, com o auxílio de um braço e de um dinamómetro, estando o sistema de regulação lombar em repouso (no ponto inicial) e em funcionamento (acionado com 1 e 2 voltas). A força necessária para provocar a rotação do sistema foi medida com um dinamómetro (Figura 79) e, considerando que a distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo do veio do parafuso sem-fim é de 0,1 m, o binário foi calculado a partir da Equação (65).

$$Bin = Força \times 0,1 \quad (65)$$

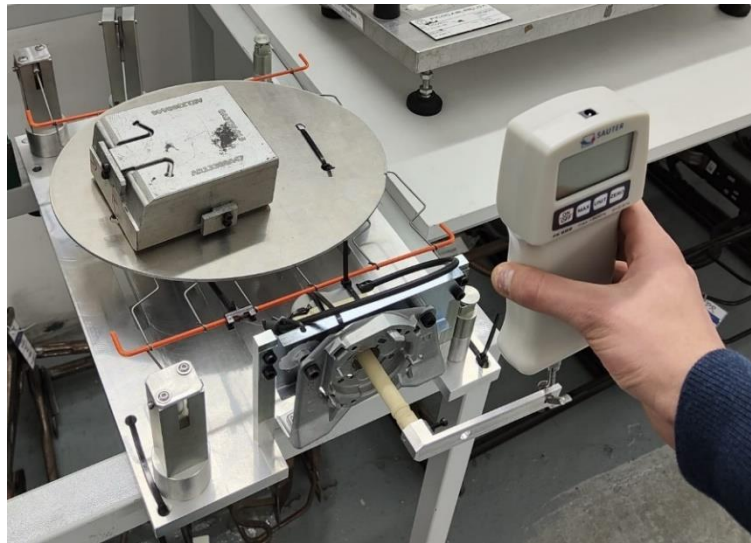


Figura 79 - Representação do ensaio D.1

Ao aplicar uma força nesta direção é esperado que, ao longo da rotação da engrenagem, a curvatura da espiral se altere, provocando a deformação do *suspension mat*. Esta alteração provoca um aumento das tensões no cabo de aço, influenciando assim o binário necessário para acionar a engrenagem. Assim, foi decidido realizar um método distinto (D.2), em que o gancho do cabo de aço foi desprendido da torre de apoio e foi aplicada uma força na direção horizontal, como representado na Figura 80. Deste modo, a deformação do *suspension mat* não tem influência no binário resultante do movimento da engrenagem.

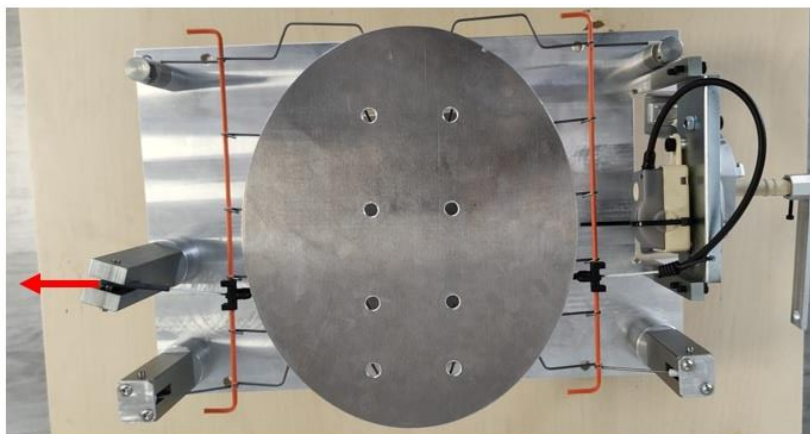


Figura 80 - Representação do ensaio D.2

### 6.5.2. Resultados obtidos

Os dados retirados do ensaio D.1 estão expressos na Tabela 27 e Figura 81.

Tabela 27 - Dados obtidos a partir do ensaio D.1

| Força aplicada,<br>$F_A$ / N                                             | Binário ao fim de 0<br>voltas / N·m | Binário ao fim de 1<br>volta / N·m | Binário ao fim de 2<br>voltas / N·m |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 5,00                                                                     | 0,09                                | 0,12                               | 0,15                                |
| 21,00                                                                    | 0,13                                | 0,17                               | 0,23                                |
| 44,10                                                                    | 0,20                                | 0,26                               | 0,32                                |
| 77,70                                                                    | 0,22                                | 0,30                               | 0,46                                |
| 103,20                                                                   | 0,27                                | 0,40                               | 0,48                                |
| 135,00                                                                   | 0,30                                | 0,50                               | 0,56                                |
| 300,00*                                                                  | 0,58                                | 0,95                               | 1,09                                |
| * Resultado extrapolado pelas equações retiradas do gráfico da Figura 81 |                                     |                                    |                                     |

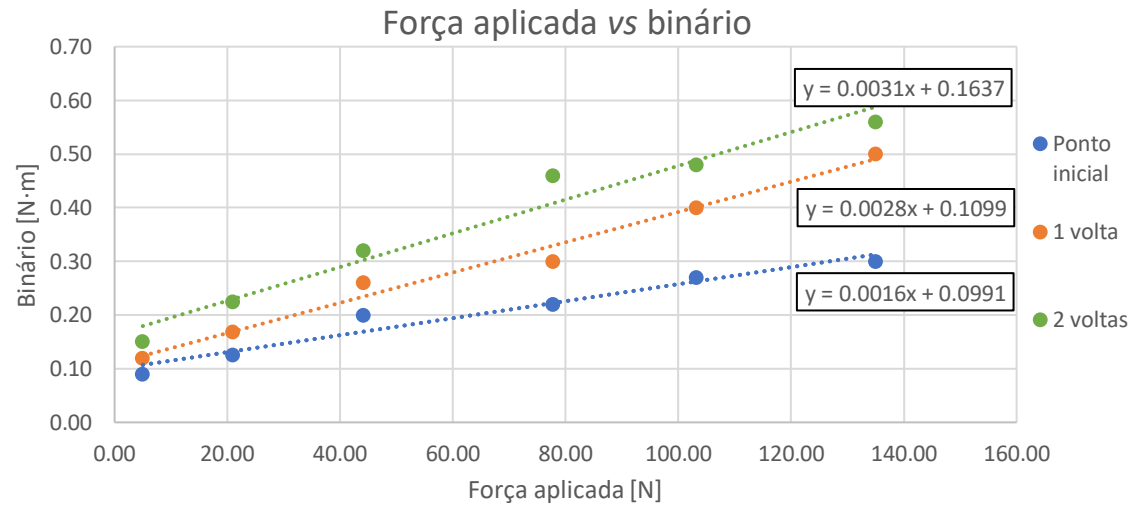


Figura 81 - Gráfico do binário em função da força aplicada no ensaio D.1

Os dados retirados do ensaio D.2 estão representados na Tabela 28 e Figura 82.

Tabela 28 – Dados obtidos a partir do ensaio D.2

| Força aplicada no cabo, $F_c$ / N                            | Binário ao fim de 0 voltas / N·m | Binário ao fim de 1 volta / N·m | Binário ao fim de 2 voltas / N·m | Média / N·m |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------|
| 10                                                           | 0,12                             | 0,11                            | 0,11                             | 0,11        |
| 20                                                           | 0,17                             | 0,16                            | 0,16                             | 0,17        |
| 30                                                           | 0,15                             | 0,20                            | 0,20                             | 0,18        |
| 40                                                           | 0,27                             | 0,28                            | 0,28                             | 0,28        |
| 50                                                           | 0,28                             | 0,32                            | 0,30                             | 0,30        |
| 60                                                           | 0,31                             | 0,34                            | 0,38                             | 0,34        |
| 100                                                          | 0,38                             | 0,39                            | 0,41                             | 0,39        |
| 300*                                                         | 1,02                             | 1,04                            | 1,13                             | 1,06        |
| * Resultado extrapolado pela equação do gráfico da Figura 82 |                                  |                                 |                                  |             |

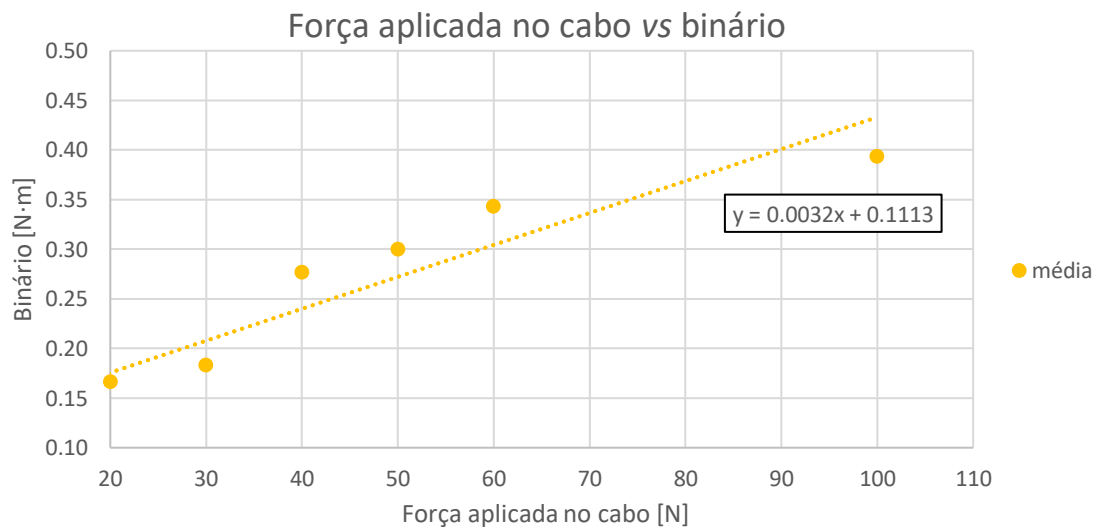


Figura 82 - Gráfico do binário em função da força aplicada no cabo, no ensaio D.2

### 6.5.3. Discussão de resultados do ensaio D

No ensaio D.1, a relação entre a força aplicada e o binário foi aproximadamente linear. No entanto, à medida que o número de voltas aumentou, o binário despendido também aumentou. Isto acontece porque, à medida que o cabo é enrolado, o *suspension mat* é deslocado da sua posição original e a curvatura da espiral é alterada, provocando a deformação do *suspension mat*. Como o cabo provoca estes efeitos, este fica sob maior tensão, razão pela qual os valores de binário medidos aumentam com o número de voltas dadas na engrenagem.

Além disso, a caixa da engrenagem produzida por impressão tridimensional possui tolerâncias dimensionais elevadas, logo, a ligação entre as 2 partes não é totalmente garantida, como foi idealizada na modelação 3D. É ainda de realçar que o material que a constitui possui uma elevada flexibilidade, quando comparada com PA 66 + 35 GF. Por estas razões, a rotação da engrenagem provocou uma deformação inesperada na caixa do protótipo, aumentando o *backlash* no engrenamento (folga entre dentes). Como consequência, o binário despendido aumentou com o número de voltas realizadas pela engrenagem.

Quanto ao ensaio D.2, a medição dos resultados apresentou alguma variação devido à dificuldade em aplicar uma força horizontal constante, influenciando o binário calculado. Assim, chegou-se à conclusão de que seria mais correto utilizar um valor médio do binário calculado para cada valor de força aplicado, para a obtenção de uma equação que representa a regressão linear esperada. Neste ensaio era esperado obter uma relação linear entre a força aplicada no cabo e o binário calculado, pois a influência dos apoios do *suspension mat* é inexistente. Além disso, era esperado que o número de voltas dadas na engrenagem não influenciasse o valor de binário obtido, isto porque a fixação da extremidade do cabo à torre de apoio foi removida, minimizando assim os efeitos da deformação do *suspension mat* com o número de voltas dadas. Neste caso, para valores de força aplicada até 100 N, o binário necessário para acionar a engrenagem praticamente não variou com o número de voltas realizadas neste, o que vai de acordo com o expectável.

Utilizando as equações obtidas, foi possível extrapolar os valores de binário esperados para uma força aplicada de 300 N em ambos os casos, estando estes apresentados na Tabela 27 e Tabela 28. A partir destes dados é possível concluir que o valor máximo de binário calculado se encontra dentro do intervalo de valores inicialmente requerido (entre 0,3 e 1,5 N·m). No entanto, o mesmo não acontece para o valor mínimo de binário, que se encontra abaixo de 0,3 N·m. Deste modo, é possível concluir que as tolerâncias dimensionais da caixa da engrenagem

necessitam de ser mais apertadas (produzindo uma caixa por maquinagem, por exemplo), de modo a confirmar se a relação entre a força aplicada no cabo e o binário é linear, e se os binários mínimos e máximos cumprem com o requisito do cliente.

Por fim, há que ter em conta que o ensaio D.1 deveria ter sido realizado com um assento completo (estrutura metálica, espuma e revestimento), podendo este fator influenciar os resultados obtidos.

## 6.6. Ensaio E e F

Em ambos os ensaios não foram realizados testes para valores de força aplicada acima de 135 N, pois a deformação da caixa da engrenagem foi excessiva para este valor, pondo em risco a integridade do protótipo. Consequentemente, os testes E e F não foram realizados, pois o risco de destruição do protótipo seria bastante elevado. Assim sendo, o critério de irreversibilidade não foi testado experimentalmente.

## 6.7. Requisitos do cliente

- **40 mm do curso de cabo a enrolar:** Após várias medições deste parâmetro, o comprimento total de cabo enrolado medido foi de 40,06 mm, cumprindo assim com o requisito do cliente. No entanto, quando o regulador lombar está no seu fim de curso e sem força aplicada no *suspension mat*, a deformação resultante na zona dorsal do mesmo é bastante acentuada, por isso, é aconselhado que este requisito seja revisto com o cliente.
- **Número máximo de rotações do utilizador igual a 3:** Este requisito foi comprovado através de medição manual, sendo que o parafuso sem-fim realiza 3 voltas desde o ponto inicial até ao fim de curso, como pretendido.
- **Força máxima exercida pelo cabo de 300 N:** Tal como referido anteriormente, não foram aplicadas forças acima de 135 N no *suspension mat*, pois a deformação da caixa da engrenagem do sistema de regulação lombar era excessiva, havendo a possibilidade de esta se danificar permanentemente. Assim, este requisito não foi comprovado com este protótipo.



## 7. Conclusões e trabalhos futuros

### 7.1. Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta dissertação, realizada no Grupo PR, teve como intuito explorar um modo de acrescentar valor a produtos que já são produzidos por esta empresa, sendo estes os *suspension mats*. Como tal, este estudo foi realizado de modo a cumprir com todos os objetivos apresentados no capítulo 1.1.

Inicialmente, foi estudada a evolução histórica dos sistemas de conforto nos assentos automóveis e analisados os diferentes sistemas de regulação lombar praticados no mercado automóvel atual. Tendo em conta este estudo, foi realizada uma análise das patentes relacionadas com sistemas de regulação lombar, podendo-se concluir que este a caixa redutora não está patenteada.

Utilizando como referência um modelo de engrenagens de um sistema de regulação lombar para um assento automóvel atualmente aplicado na indústria, foi realizado o seu dimensionamento, seguindo a diretiva VDI 2736 – Parte 3, relativa a engrenagens poliméricas de eixos cruzados. Através deste processo de *benchmarking* foi possível retirar várias ilações:

- A capacidade de carga característica da engrenagem é apenas dependente da sua geometria, sendo independente do material que a constitui;
- O coeficiente de segurança para a capacidade de carga característica do sistema existente, teoricamente, não garante a segurança do sistema;
- A eficiência do sistema existente não garante, em teoria, o autobloqueio;
- O sistema existente não cumpre os requisitos de força exercida no cabo exigidos pelo cliente.

Assim, houve necessidade de desenvolver uma nova solução, capaz de garantir a segurança do sistema e os requisitos exigidos. Comparando o sistema pré-existente com a nova solução, esta última foi melhorada em 10% no valor do coeficiente de segurança para a capacidade de carga característica,  $S_c$ , 14% no coeficiente de segurança do pé do dente,  $S_F$ , e 5% no coeficiente de segurança no flanco do dente,  $S_H$ . A eficiência da engrenagem foi ainda reduzida em 1,86% para garantir o autobloqueio.

Tendo em conta os modelos desenvolvidos para a engrenagem redutora e respetiva caixa, foi produzido um protótipo desta solução e, por forma a realizar testes de validação sobre

este, foi desenvolvido e produzido um banco de ensaios. Através da realização destes testes, foi possível retirar várias conclusões:

- O banco de ensaios mostrou ser bastante adequado para os testes de validação exigidos;
- É necessário obter validação dos procedimentos a cumprir nos testes de validação;
- Até certo ponto, a relação entre o binário calculado e a força aplicada no cabo é aproximadamente linear, como era de esperar;
- As tolerâncias dimensionais de baixa exatidão de um protótipo produzido por impressão 3D não permitem realizar testes de validação em que se apliquem forças acima de 135 N;
- A irreversibilidade não foi testada experimentalmente porque a carga necessária é superior à suportada pelo protótipo;
- A utilização do material PA 66 + 35 GF e de um processo de fabrico que garanta tolerâncias mais apertadas, deverá mitigar os problemas encontrados no protótipo.

## **7.2. Trabalhos futuros**

Para que o sistema possa ser aplicado na indústria, é necessário finalizar os restantes testes de validação indicados, mais especificamente os ensaios relativos ao uso indevido, autobloqueio, fadiga e resistência à temperatura. Para tal, é essencial produzir um novo protótipo em PA 66 + 35 GF e conhecer os procedimentos corretos a realizar em cada ensaio.

No protótipo constituído pelo material final pretendido, deve ainda ser utilizado algum tipo de lubrificação externa na engrenagem para analisar se a sua influência é significativa. Esta lubrificação deve ser feita com um óleo não-polar, como por exemplo PAO, ou uma massa lubrificante. Visto que as velocidades de rotação são baixas, não há risco de a massa lubrificante ser projetada para fora da caixa.

Após realização dos testes de validação no sistema com e sem lubrificação externa, pode ser avaliado em detalhe o atrito existente entre a engrenagem e a caixa da engrenagem. Isto permite perceber se, projetando uma nova engrenagem com maior eficiência, o autobloqueio do sistema continua garantido devido ao atrito existente na ligação entre a engrenagem e a caixa.

Por fim, pode ainda ser estudada uma nova versão deste modelo para que seja aplicada do lado direito do assento automóvel, e perceber se é economicamente viável ter a capacidade de produzir modelos para ambos os lados do assento.



## Bibliografia

1. Pinheiro, L.E.S., *Análise de confortabilidade de carros populares*, in *Departamento de Ciência e Tecnologia*. 2019, Universidade Federal Rural do Semiárido- Ufersa.
2. Aaron, M.F., *Automobile Seat-Cushion Cover*. 1927: United States.
3. D. M. Severy, D.M.B., J. F. Kerkhoff, *Automotive Seat Design and Collision Performance*. Vol. 85. 1977: SAE.
4. T. D. Owler, J.V.C., *Car Seat Mechanism*. 1935.
5. Preble, C.E., *Ratchet Recliner Seat Back Mechanism*. 1937: United States.
6. Oliveira, R.F.d.S., *Desenvolvimento de projeto e fabrico de engrenagens de precisão em polímeros*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2019, FEUP: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
7. Parts, L.s.T.M. *T 14547C Seat Motor Dial-O-Matic 12V For 1955-1956-1957 Ford Thunderbird (T14547C)*. Available from: <https://www.larrystbird.com/product/seat-motor-dial-o-matic-12v/>.
8. Transportation, U.S.D.O., *Laboratory Test Procedure For FMVSS 202 Head Restraints*. 1989, United States Of America: National Highway Traffic Safety Administration.
9. Thibaut, D.B., *The automation of bent wires from wire bending machine to injection machine*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2021, ISEP: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
10. Swertvaegher, G.J., *Using fully automated solutions in the inspection and packaging of complex automotive components*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2019, ISEP: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
11. Stuart Macey, G.W., *H Point: The Fundamentals of Car Design & Packaging*. 2009.
12. Romain Barbeau, E.A., *Assessment of the impact of sub-components on the dynamic response of a coupled human body/automotive seat system*. *Journal of Sound and Vibration*, 2019. **459**.
13. S. Rakheja, R.G.D., S. Patra, P. -É. Boileau, P. Marcotte, C. Warren, *Biodynamics of the human body under whole-body vibration: Synthesis of the reported data*. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2010. **40**.
14. X. Zhang, Y.Q., M. J. Griffin, *Developing a simplified finite element model of a car seat with occupant for predicting vibration transmissibility in the vertical direction*. *Ergonomics*, 2015. **58**.
15. H. K. Choi, E.A., *Study on Vibration and Fatigue Analysis for Plastic Suspension Mat of Automotive Seat*. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 2012. **13**.
16. W. F. S. Araújo, F.J.G.S., R. D. S. G. Campilho, J. A. Matos, *Manufacturing cushions and suspension mats for vehicle seats: a novel cell concept*. Springer-Verlag London, 2016.
17. Ebe K., G.M.J., *Factors affecting static seat cushion comfort*. *Ergonomics*, 2001. **44**.
18. K. Ebe, K.Y., *Effect of foam characteristics at backrest and underneath thighs on vibration transmission and seating comfort* 2004, Chemical Automotive Components Development Department: Bridgestone Corporation
19. C. Corbridge, M.J.G., P. R. Harbrough, *Seat dynamics and passenger comfort*. 1989, Institution of Mechanical Engineers: Journal of Rail and Rapid Transit.
20. Paulo Flores, J.G., *Cinemática e Dinâmica de Engrenagens 1. Aspetos Gerais sobre Engrenagens*. 2014, Universidade do Minho.
21. Fernandes, C., *Engrenagens*. 2020, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
22. Almacinha, J.A., *Redutor de Engrenagens Cilíndricas de Dentado Exterior*. 5ª ed. 2016, Departamento de Engenharia Mecânica.

23. Castro, P.S.M.T.d., *Engrenagens*, ed. S.M.O.T.e.a. Ramiro C. Martins. 2017, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
24. Almacinha, J.A., *Redutor de parafuso sem-fim / roda de coroa*. 2002, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
25. Hamilton H. Mabie, C.F.R., *Mechanisms and Dynamics of Machinery*. 4ª ed. 1987, New York. 656.
26. Paulo Flores, J.G., *Cinemática e Dinâmica de Engrenagens 3. Engrenagens Cilíndricas de Dentes Inclínados*. 2014, Universidade do Minho.
27. C. Moura Branco, J.M.F., J. Domingos da Costa, A. Silva Ribeiro, *Projeto de Órgãos de Máquinas*. 2ª ed. 2009, Lisboa. 896.
28. R. M. Paquet, C.M., *Systematic Approach to Designing Plastic Spur and Helical Gear*. 1989.
29. W. M. Ghazali, e.a., *A Review on Failure Characteristics Of Polymer Gear*. 2017, MATEC Web of Conferences: Universiti Malaysia Pahang.
30. Lopes, R.M.C., *Desenvolvimento de Moto Redutor para E-bike*, in *Engenharia Mecânica*. 2020, FEUP.
31. Campo, E.A., *The Complete Part Design Handbook: For Injection Molding of Thermoplastics*. 2006, Munich: Carl Hanser Verlag.
32. 1, V.P., *Thermoplastic gear wheels. Materials, material selection, production methods, production tolerances, form design*. 2016.
33. L. da Silva, F.J.L.A., A. T. Marques, *Materiais de Construção*. 2013, Porto.
34. Starzhinsky, V.E., *Enciclopedia of Tribology*. 2013: Springer, Boston, MA.
35. Brydson, J.A., *Brydson's Plastics Materials*. 8ª edição ed. 2017: Elsevier.
36. Doll, N.P., *Modeling Thermomechanical Behavior of Polymer Gears*. 2015, University of Wisconsin-Madison.
37. Tsukamoto, N., *Argument on Plastic Gears for Power Transmission*. Vol. 38. 1995.
38. Damijan Zorko, e.a., *A multicriteria function for polymer gear design optimization*. 2021, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia: Oxford.
39. Asia, P. *Thermoplastic Injection*. 2021; Available from: <https://prototechasia.com/en/injection-molding/questions-injection-molding>.
40. Rodrigues, J.D., *Apontamentos de Vibrações de Sistemas Mecânicos*. 2020, Departamento de Engenharia Mecânica: Faculdade de Engenharia da U. Porto.
41. W. Li, A.W., R. Weidig, K. Mao, *An Investigation on the wear behaviour of dissimilar polymer gear engagements*. Vol. 271. 2011.
42. Vullo, V., *Gears*. Vol. 1: Geometric and Kinematic Design. 2020.
43. tec-science. *Worms and Worm Gears*. 2018; Available from: <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/gear-types/worms-and-worm-gears/>.
44. 3, V.P., *Thermoplastic gear wheels; Crossed helical gears; Mating cylindrical worm with helical gear; Calculation of the load-carrying capacity*. 2014.
45. Collins, D. *When are worm gears self-locking, and where is this useful?* 2017; Available from: <https://www.motioncontroltips.com/when-are-worm-gears-self-locking-and-where-is-this-useful/>.
46. Hong, C.M., *Lumbar Support For Car Seat*. 2005: United States.
47. Kim, e.a., *Lumbar Support Device Of Seat For Vehicles*. 2011: United States.
48. Kun Xiang, e.a., *Add-On Adjustable Back Support For Car Seat*. 1996.
49. 1, D.P., *Series of Modules for Gears*. 1977.
50. S. M. O. Tavares, P.M.S.T.d.C., *O cálculo da capacidade de carga de engrenagens cilíndricas*. 2017, Porto.
51. 2, V.P., *Thermoplastic gear wheels; Cylindrical gears; Calculation of the load carrying capacity*. 2014.
52. Larsen, K.; Available from: <http://www.graphreader.com/>.
53. DuPont, *DuPont Performance Polymers Zytel 70G35EF NC010 PA66-GF35*.

54. Chebbi E., e.a., *Fatigue Behavior of Short Glass Fiber Reinforced Polyamide 66: Experimental Study and Fatigue Damage Modelling*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 2016.
55. igus®, *Product Data Sheet iglidur® I3*. 2017.



## **Anexo A: Propriedades dos materiais**

### **A.1: PA 66**

-----  
-- File = Z014-PA66\_VDI2736.DAT

--

-- (c) by KISSsoft AG, CH-8608 Bubikon

--

-- Data for PA66 from VDI2736 and VDI2545

-- Data for tensile strength for material BASF Ultramid A3K (Campus database)

-- Data for sigFb and sigFs are for conditioned material, much lower (about 60% lower!) than values for dry material

-- 25.2.2019: Data for water absorption added, dry material properties added

-- 25.2.2019: Assumed fatigue data was measured for dry material (not conditioned)

-----

-- Coefficient of friction (for calculation of temperature)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION ReibKoef

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

0.04 0.09 0.40

END

-- Water absorption [vol%]

:TABLE FUNCTION WaterAbsorb

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

2.2 2.2 2.2

END

-- Kappa factor (for calculation of temperature)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION PotenzFac

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

0.75 0.75 0.75

END

-- E-modulus [N/mm2] for PA66, conditioned (for dry or wet conditions, E-modulus can be different)

-- From Ehrenstein, for PA66

:TABLE FUNCTION ElastizitatsModul

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

DATA

-50 0 25 40 50 75 100 150

2700 2400 2000 1000 800 500 400 300

END

-- E-modulus [N/mm2] for PA66 (data for BASF Ultramid A3K, dry)

:TABLE FUNCTION ElastizitatsModul\_dry

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

DATA

-40 -20 0 23 40 60 80 100 120 150

4480 4170 3970 3350 3160 2820 1210 800 700 640

END

-- Ultimate tensile strength sigFb [N/mm2] (data for BASF Ultramid A3K, conditioned)

:TABLE FUNCTION SigFb

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

DATA

-40 -20 0 23 40 60 150

110 93 75 40 25 20 13

END

-- Ultimate tensile strength sigFb [N/mm2] (data for BASF Ultramid A3K, dry)

:TABLE FUNCTION SigFb\_dry

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

DATA

|     |     |     |    |    |    |    |     |     |     |
|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| -40 | -20 | 0   | 23 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 150 |
| 110 | 107 | 103 | 85 | 73 | 50 | 23 | 21  | 18  | 15  |

END

-- Tensile strength sigFs [N/mm2] at 0.5% strain (data for BASF Ultramid A3K, conditioned)

:TABLE FUNCTION SigFs

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

DATA

|     |     |    |    |    |    |     |
|-----|-----|----|----|----|----|-----|
| -40 | -20 | 0  | 23 | 40 | 60 | 150 |
| 99  | 81  | 69 | 37 | 24 | 18 | 12  |

END

-- Tensile strength sigFs [N/mm2] at 0.5% strain (data for BASF Ultramid A3K, dry)

:TABLE FUNCTION SigFs\_dry

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

DATA

|     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |
|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| -40 | -20 | 0  | 23 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 150 |
| 92  | 90  | 85 | 80 | 68 | 46 | 17 | 15  | 13  | 10  |

END

-- Tooth flank strength sigHlim [N/mm2] for Oil lubrication

-- From VDI2736-2, Fig. 6a, for PA66

:TABLE FUNCTION FlankenSigHNOel\_VDI2736

INPUT X ZahnTempFlanke TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|      | 20  | 40  | 60  | 80  | 100 | 120 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0    | 123 | 119 | 112 | 103 | 90  | 75  |
| 1E5  | 123 | 119 | 112 | 103 | 90  | 75  |
| 1E6  | 90  | 87  | 81  | 75  | 65  | 54  |
| 1E7  | 69  | 67  | 63  | 57  | 49  | 40  |
| 1E8  | 56  | 55  | 51  | 46  | 40  | 32  |
| 1E9  | 48  | 47  | 44  | 39  | 34  | 27  |
| 1E10 | 44  | 42  | 39  | 34  | 30  | 24  |
| 1E11 | 40  | 39  | 36  | 32  | 28  | 22  |
| 1E99 | 37  | 36  | 34  | 30  | 26  | 21  |

END

-- Tooth flank strength sigHlim [N/mm2] for Oil lubrication

-- From Niemann, Fig. 22.4/4, for PA66

:TABLE FUNCTION FlankenSigHNOel

INPUT X ZahnTempFlanke TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|      | 20  | 40  | 60  | 80 | 100 | 120 |
|------|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| 0    | 120 | 115 | 108 | 99 | 91  | 76  |
| 1E5  | 120 | 115 | 108 | 99 | 91  | 76  |
| 1E6  | 95  | 90  | 85  | 78 | 68  | 57  |
| 1E7  | 70  | 67  | 63  | 58 | 50  | 40  |
| 1E8  | 52  | 50  | 47  | 44 | 37  | 28  |
| 1E9  | 45  | 42  | 40  | 38 | 32  | 25  |
| 1E10 | 43  | 41  | 38  | 36 | 30  | 24  |
| 1E11 | 43  | 41  | 38  | 36 | 30  | 23  |
| 1E99 | 43  | 41  | 38  | 36 | 30  | 23  |

END

-- Tooth flank strength sigHlim [N/mm2] for Grease lubrication

-- From VDI2736-2, Fig. 6b, for PA66

:TABLE FUNCTION FlankenSigHNFett\_VDI2736

INPUT X ZahnTempFlanke TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|      | 20  | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
|------|-----|----|----|-----|-----|-----|
| 0    | 104 | 98 | 92 | 86  | 78  | 69  |
| 1E5  | 104 | 98 | 92 | 86  | 78  | 69  |
| 1E6  | 72  | 68 | 65 | 60  | 55  | 48  |
| 1E7  | 59  | 49 | 47 | 44  | 40  | 35  |
| 1E8  | 40  | 37 | 35 | 33  | 30  | 27  |
| 1E9  | 33  | 30 | 29 | 27  | 25  | 22  |
| 1E10 | 27  | 26 | 25 | 23  | 21  | 19  |
| 1E11 | 24  | 23 | 22 | 20  | 19  | 17  |
| 1E99 | 22  | 21 | 21 | 19  | 18  | 16  |

END

-- Tooth flank strength sigHlim [N/mm2] for Grease lubrication

-- From Niemann, Fig. 22.4/4, for PA66

:TABLE FUNCTION FlankenSigHNFett

INPUT X ZahnTempFlanke TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|      | 20  | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
|------|-----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 0    | 100 | 99 | 95 | 89 | 84  | 77  | 69  |
| 1E5  | 100 | 99 | 95 | 89 | 84  | 77  | 69  |
| 1E6  | 77  | 74 | 71 | 68 | 65  | 58  | 52  |
| 1E7  | 53  | 51 | 50 | 47 | 45  | 41  | 36  |
| 1E8  | 36  | 35 | 34 | 32 | 31  | 28  | 25  |
| 1E9  | 29  | 28 | 27 | 26 | 24  | 22  | 20  |
| 1E10 | 27  | 26 | 25 | 24 | 23  | 21  | 19  |
| 1E11 | 26  | 25 | 24 | 23 | 22  | 20  | 18  |
| 1E99 | 26  | 25 | 24 | 23 | 22  | 20  | 18  |

END

-- Tooth flank strength sigHlim [N/mm<sup>2</sup>] for Dry running

-- From Niemann, Fig. 22.4/4, for PA66

:TABLE FUNCTION FlankenSigHNTrocken

INPUT X ZahnTempFlanke TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|      | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
|------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 0    | 70 | 67 | 65 | 61 | 57  | 52  | 47  |
| 1E5  | 70 | 67 | 65 | 61 | 57  | 52  | 47  |
| 1E6  | 53 | 51 | 49 | 45 | 42  | 38  | 33  |
| 1E7  | 37 | 35 | 34 | 31 | 29  | 25  | 21  |
| 1E8  | 25 | 24 | 23 | 21 | 19  | 16  | 13  |
| 1E9  | 20 | 19 | 18 | 17 | 15  | 13  | 10  |
| 1E10 | 19 | 18 | 17 | 16 | 14  | 12  | 9   |
| 1E11 | 18 | 17 | 16 | 15 | 13  | 11  | 8   |
| 1E99 | 18 | 17 | 16 | 15 | 13  | 11  | 8   |

END

-- Tooth root strength sigFlim [N/mm<sup>2</sup>] - pulsating, all lubricants

-- From VDI2736-2, Table 5, for PA66

:TABLE FUNCTION FootSigFlim\_VDI2736

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|     | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
|-----|----|----|----|----|-----|-----|
| 0   | 77 | 62 | 50 | 39 | 30  | 21  |
| 1E5 | 77 | 62 | 50 | 39 | 30  | 21  |
| 1E6 | 49 | 40 | 32 | 25 | 18  | 12  |
| 1E7 | 37 | 30 | 24 | 18 | 13  | 7   |

## Desenvolvimento de Sistema de Regulação Lombar para Assentos de Automóveis

```
1E8    31    25    20    15    10    5
1E9    27    21    17    12     7     3
1E99   27    21    17    12     7     3
END
```

-- Tooth root strength sigFlim [N/mm2] - pulsating, all lubricants

-- From VDI2545, Fig. 23, for PA66

:TABLE FUNCTION FootSigFlim

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

```
      20    40    60    80   100   120
0      84    62    49    37    29    21
1E5    84    62    49    37    29    21
1E6    50    40    33    26    20    14
1E7    37    29    24    18    13     8
1E8    32    25    20    16    10     5
1E9    30    24    19    15     9    4.5
1E99   30    24    19    15     9    4.5
```

END

-- Tensile fatigue strength sigZsch [N/mm2] - pulsating, all lubricants

-- From VDI2736-3, Fig. 7, for PA66

:TABLE FUNCTION TensionSigZsch

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

```
      23   40   60   80  100  120  140  160  180
0  85.70 68.10 48.80 42.00 35.00 31.00 27.00 23.00 20.00
1  85.70 68.10 48.80 42.00 35.00 31.00 27.00 23.00 20.00
10 78.56 62.43 44.73 38.50 32.08 28.42 24.75 21.08 18.33
```

120

```

1E3  64.28 51.08 36.60 31.50 26.25 23.25 20.25 17.25 15.00
1E4  57.13 45.40 32.53 28.00 23.33 20.67 18.00 15.33 13.33
1E5  49.99 39.73 28.47 24.50 20.42 18.08 15.75 13.42 11.67
1E6  42.85 34.05 24.40 21.00 17.50 15.50 13.50 11.50 10.00
1E7  35.71 28.38 20.33 17.50 14.58 12.92 11.25  9.58  8.33
1E8  28.57 22.70 16.27 14.00 11.67 10.33  9.00  7.67  6.67
1E99 28.57 22.70 16.27 14.00 11.67 10.33  9.00  7.67  6.67
END

```

-- Wear coefficient [ $10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/N·m] for PA66/steel combination, dry running (Steel roughness Rz=3.2µm)

-- UNVERIFIED DATA! From pHd dissertation R.Feulner (2008), measured on pin-on-disc, dependency from temperature not known

:TABLE FUNCTION KwearDry

INPUT X ZahnTempFlanke TREAT LINEAR

DATA

```

-20  23  40  80 120
 9.8  9.8  9.8  9.8  9.8

```

END

-----

-- Additional info about limiting values for material data

-- Minimum temperature [°C] of the measured data (E-modulus, sigFs, sigFb) (0-No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MinTemp

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

```

 0   1   2
-40.0 -40.0 -40.0

```

END

-- Maximum temperature [°C] of the measured data (E-modulus, sigFs, sigFb) (0-No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MaxTemp

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

150.0 150.0 150.0

END

-- Minimum temperature [°C] of the measured data (sigFlim, sigHlim) (0-No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MinTempSigLim

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

20.0 20.0 20.0

END

-- Maximum temperature [°C] of the measured data (sigFlim, sigHlim) (0-No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MaxTempSigLim

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

120.0 120.0 120.0

END

-- Minimum temperature [°C] of the measured data (sigZsch) (0-No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MinTempSigZsch

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

23.0 23.0 23.0

END

-- Maximum temperature [°C] of the measured data (sigZsch) (0-No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MaxTempSigZsch

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

180.0 180.0 180.0

END

-- Minimum temperature [°C] of the measured data (Wear coefficient) (0: No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MinTempWear

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

0 0 -20.0

END

-- Maximum temperature [°C] of the measured data (Wear coefficient) (0: No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MaxTempWear

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

0 0 120.0

END

-- Type of plastic material

-- Values: 0-not on the list, 1-POM, 2-PEEK, 3-PEEK+30%CF, 4-PA46, 5-PA66, 6-PA6, 7-PA66+GF, 8-PPS, 9-PPS+GF

-- 10-PA12, 11-PBT, 12-PET

:TABLE FUNCTION MaterialType

INPUT X None TREAT LINEAR

DATA

0

5

END

-- Material data for E-modulus, sigFb and SigFs available also for dry material

-- Should be set only for PA6 and PA66 materials

-- Values: 0-not required, 1-available

:TABLE FUNCTION DryDataGeneralProperties

INPUT X None TREAT LINEAR

DATA

0

1

END

-- Material data for tooth flank/root strength available for dry material (not conditioned)

-- Should be set only for PA6 and PA66 materials

-- Values: 0-not required, 1-required and available for dry material, 2-required and available for conditioned material

:TABLE FUNCTION DryDataGearFatigue

INPUT X None TREAT LINEAR

DATA

0

1

END

## **Anexo A: Propriedades dos materiais**

### **A.2: PA 66 + 35 GF**

**Ultramid® A3WG7****Product Information**

| Typical values for uncoloured product at 23 °C <sup>1)</sup>    | Test method         | Unit                   | Values <sup>2)</sup> |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| <b>Properties</b>                                               |                     |                        |                      |
| Polymer abbreviation                                            | -                   | -                      | <b>PA66-GF35</b>     |
| Density                                                         | ISO 1183            | kg/m <sup>3</sup>      | <b>1410</b>          |
| Viscosity number (0.5% in 96 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | ISO 307, 1157, 1628 | cm <sup>3</sup> /g     | <b>145</b>           |
| Moisture absorption, equilibrium 23°C/50% r.h.                  | similar to ISO 62   | %                      | <b>1.4 - 1.8</b>     |
| Water absorption, saturation in water at 23°C                   | similar to ISO 62   | %                      | <b>4.7 - 5.3</b>     |
| <b>Processing</b>                                               |                     |                        |                      |
| Melting temperature, DSC                                        | ISO 11357-1/-3      | °C                     | <b>260</b>           |
| MVR 275 °C/5 kg                                                 | ISO 1133            | cm <sup>3</sup> /10min | <b>20</b>            |
| Melt temperature, injection moulding/extrusion                  | -                   | °C                     | <b>280 - 300</b>     |
| Mould temperature, injection moulding                           | -                   | °C                     | <b>80 - 90</b>       |
| Moulding shrinkage, constrained <sup>3)</sup>                   | -                   | %                      | <b>0.5</b>           |
| Moulding shrinkage (parallel)                                   | ISO 294-4           | %                      | <b>0.37</b>          |
| Moulding shrinkage (normal)                                     | ISO 294-4           | %                      | <b>1.04</b>          |
| injection molding, Melt temperature, recommended                | -                   | °C                     | <b>290</b>           |
| injection molding, Mold temperature, recommended                | -                   | °C                     | <b>80</b>            |
| <b>Flammability</b>                                             |                     |                        |                      |
| UL 94 rating at 1,6 mm thickness                                | IEC 60695-11-10     | class                  | <b>HB</b>            |
| Automotive materials (Thickness >= 1mm) <sup>4)</sup>           | ISO 3795, FMVSS 302 | -                      | <b>+</b>             |
| Oxygen index                                                    | ISO 4589-1/-2       | %                      | <b>24</b>            |
| UL 94 rating at 3.05 mm thickness                               | UL-94, IEC 60695    | class                  | <b>HB</b>            |
| UL 94 (2)                                                       | UL-94, IEC 60695    | -                      | <b>UL</b>            |
| <b>Mechanical properties</b>                                    |                     |                        |                      |
|                                                                 |                     |                        | <b>dry / cond.</b>   |
| Tensile modulus                                                 | ISO 527-1/-2        | MPa                    | <b>11500 / 8500</b>  |
| Stress at break                                                 | ISO 527-1/-2        | MPa                    | <b>210 / 150</b>     |
| Strain at break                                                 | ISO 527-1/-2        | %                      | <b>3 / 5</b>         |
| Tensile creep modulus, 1000 h, strain <= 0.5%, 23°C             | ISO 899-1           | MPa                    | <b>* / 6600</b>      |
| Flexural modulus                                                | ISO 178             | MPa                    | <b>10000 / 8000</b>  |
| Flexural strength                                               | ISO 178             | MPa                    | <b>300 / 240</b>     |
| Charpy unnotched impact strength (23°C)                         | ISO 179/1eU         | kJ/m <sup>2</sup>      | <b>95 / 105</b>      |
| Charpy unnotched impact strength (-30°C)                        | ISO 179/1eU         | kJ/m <sup>2</sup>      | <b>75 / -</b>        |
| Charpy notched impact strength (23°C)                           | ISO 179/1eA         | kJ/m <sup>2</sup>      | <b>14 / 22</b>       |
| Charpy notched impact strength (-30°C)                          | ISO 179/1eA         | kJ/m <sup>2</sup>      | <b>12 / -</b>        |
| Izod notched impact strength (23°C)                             | ISO 180/A           | kJ/m <sup>2</sup>      | <b>14 / 18</b>       |
| <b>Thermal properties</b>                                       |                     |                        |                      |
| HDT A (1.80 MPa)                                                | ISO 75-1/-2         | °C                     | <b>250</b>           |
| Max. service temperature (short cycle operation) <sup>5)</sup>  | -                   | °C                     | <b>240</b>           |
| Temperature index at 50% loss of tensile strength after 5000 h  | IEC 60216           | °C                     | <b>175</b>           |
| Temperature index at 50% loss of tensile strength after 20000 h | IEC 60216           | °C                     | <b>145</b>           |
| Coefficient of linear thermal expansion, longitudinal (23-55)°C | ISO 11359-1/-2      | E-6/K                  | <b>23</b>            |
| Coefficient of linear thermal expansion, transverse (23-55)°C   | ISO 11359-1/-2      | E-6/K                  | <b>93</b>            |
| Thermal conductivity                                            | DIN 52612-1         | W/(m K)                | <b>0.35</b>          |
| Specific heat capacity                                          | -                   | J/(kg*K)               | <b>1500</b>          |
| <b>Electrical properties</b>                                    |                     |                        |                      |
|                                                                 |                     |                        | <b>dry / cond.</b>   |
| Relative permittivity (1 MHz)                                   | IEC 62631-2-1       | -                      | <b>3.5 / 5.7</b>     |
| Dissipation factor (1 MHz)                                      | IEC 62631-2-1       | E-4                    | <b>200 / 3000</b>    |
| Volume resistivity                                              | IEC 62631-3-1       | Ohm*m                  | <b>1E13 / 1E10</b>   |
| Surface resistivity                                             | IEC 62631-3-2       | Ohm                    | <b>1E12 / 1E10</b>   |
| Comparative tracking index, CTI, test liquid A                  | IEC 60112           | -                      | <b>- / 450</b>       |
| Electric strength K20/P50, d = 0.6 - 0.8 mm                     | IEC 60243-1         | kV/mm                  | <b>90 / 75</b>       |
| Electric strength K20/K20, ( 60°60°1 mm <sup>3</sup> )          | IEC 60243-1         | kV/mm                  | <b>40 / 34</b>       |

## Footnotes

1) If product name or properties don't state otherwise.

2) The asterisk symbol "\*" signifies inapplicable properties.

3) Test box with central gating, dimensions of base (107\*47\*1,5) mm, processing conditions: TM = 290°C, TW = 80°C

4) + = passed

5) Empirical values determined on articles repeatedly subjected to the temperature concerned for several hours at a time over a period of several years. Provisio Proper design and processing according to our recommendations.

BASF SE

67056 Ludwigshafen, Germany

## **Anexo A: Propriedades dos materiais**

### **A.3: PA 66 + 30 GF + 15 PTFE**

-----  
-- Filename: Z014-SABIC\_RFL36.DAT

--

-- (c) by KISSsoft AG, CH-8608 Bubikon and by SABIC Innovative Plastic IP BV, Raamsdonksveer

--

-- Data for SABIC RFL36

-- Legacy name: RFL-4036

-- New name: LNP LUBRICOMP RFL36

-- Supplier: SABIC Innovative Plastic

-- Composition: Nylon 66 (PA66), 30% glass fiber, 15% PTFE

-- 2018.02.12: material properties (E, sigFb, sigFs) changed to 2D isotropic data

--

-- [S B Wd]

-----

-- Coefficient of friction

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION ReibKoef

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

| 0    | 1    | 2    |
|------|------|------|
| 0.04 | 0.09 | 0.59 |

END

-- Young's (elasticity) modulus [N/mm2]

:TABLE FUNCTION ElastizitatsModul

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

DATA

| 20   | 80   | 120  | 150  |
|------|------|------|------|
| 4886 | 2404 | 1978 | 1392 |

END

-- Ultimate strength sigFb [N/mm2]

:TABLE FUNCTION SigFb

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

DATA

20 80 120 150

76 53 46 36

END

-- Yield strength sigFs [N/mm2]

:TABLE FUNCTION SigFs

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

DATA

20 80 120 150

64 43 37 27

END

-----  
-- Permissible tooth root stress  
-----

-- Calculated with 50% damage probability

-- Form factors YF and YS calculated acc. to the standard

-- Calculated with root safety factor SF=1

-- To get permissible tooth root stresses, multiply values with a factor YST=2

-- Values with \* measured, other interpolated/extrapolated

-- Permissible tooth root stress sigFlim [N/mm2], all lubrication regimes

-- Calculation method: VDI 2736:2013 (YF Method C)

:TABLE FUNCTION FootSigFlim\_VDI2736

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|            | 20    | 100   | 150   |  |
|------------|-------|-------|-------|--|
| 0.000e+000 | 40.6  | 40.6  | 30.4  |  |
| 1.445e+006 | 40.6  | 40.6  | 30.4* |  |
| 2.588e+006 | 40.6  | 40.6* | 26.6  |  |
| 3.347e+006 | 40.6  | 39.1  | 25.0* |  |
| 4.698e+006 | 40.6  | 37.2* | 21.5  |  |
| 5.347e+006 | 40.6* | 25.0* | 20.3* |  |
| 1.000e+010 | 2.0   | 2.0   | 2.0   |  |
| 1.000e+030 | 0.1   | 0.1   | 0.1   |  |
| 1.000e+030 | 0.0   | 0.0   | 0.0   |  |
| 1.000e+099 | 0.0   | 0.0   | 0.0   |  |

END

-- Permissible tooth root stress sigFlim [N/mm2], all lubrication regimes

-- Calculation method: VDI 2545:1981-modified (YF Method B)

:TABLE FUNCTION FootSigFlim\_VDI2545\_B

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|            | 20    | 100   | 150   |  |
|------------|-------|-------|-------|--|
| 0.000e+000 | 39.2  | 39.2  | 29.3  |  |
| 1.445e+006 | 39.2  | 39.2  | 29.3* |  |
| 2.588e+006 | 39.2  | 39.2* | 25.6  |  |
| 3.347e+006 | 39.2  | 37.7  | 24.1* |  |
| 4.698e+006 | 39.2  | 35.9* | 20.7  |  |
| 5.347e+006 | 39.2* | 24.1* | 19.6* |  |
| 1.000e+010 | 1.9   | 1.9   | 1.9   |  |
| 1.000e+030 | 0.1   | 0.1   | 0.1   |  |
| 1.000e+030 | 0.0   | 0.0   | 0.0   |  |
| 1.000e+099 | 0.0   | 0.0   | 0.0   |  |

END

-- Permissible tooth root stress sigFlim [N/mm<sup>2</sup>], all lubrication regimes

-- Calculation method: VDI 2545:1981-modified (YF Method C)

:TABLE FUNCTION FootSigFlim\_VDI2545\_C

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|            | 20    | 100   | 150   |  |
|------------|-------|-------|-------|--|
| 0.000e+000 | 33.3  | 33.3  | 25.0  |  |
| 1.445e+006 | 33.3  | 33.3  | 25.0* |  |
| 2.588e+006 | 33.3  | 33.3* | 21.8  |  |
| 3.347e+006 | 33.3  | 32.1  | 20.5* |  |
| 4.698e+006 | 33.3  | 30.5* | 17.6  |  |
| 5.347e+006 | 33.3* | 20.5* | 16.7* |  |
| 1.000e+010 | 1.6   | 1.6   | 1.6   |  |
| 1.000e+030 | 0.1   | 0.1   | 0.1   |  |
| 1.000e+030 | 0.0   | 0.0   | 0.0   |  |
| 1.000e+099 | 0.0   | 0.0   | 0.0   |  |

END

-- Permissible tooth root stress sigFlim [N/mm<sup>2</sup>], all lubrication regimes

-- Calculation method: VDI 2736:2013-modified (YF Method B)

:TABLE FUNCTION FootSigFlim\_VDI2736\_B

INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR

INPUT Y Lastwechsel TREAT LOG

DATA

|            | 20   | 100   | 150   |  |
|------------|------|-------|-------|--|
| 0.000e+000 | 39.9 | 39.9  | 29.9  |  |
| 1.445e+006 | 39.9 | 39.9  | 29.9* |  |
| 2.588e+006 | 39.9 | 39.9* | 26.1  |  |

```

3.347e+006  39.9  38.4  24.6*
4.698e+006  39.9  36.6*  21.1
5.347e+006  39.9*  24.6*  20.0*
1.000e+010  2.0  2.0  2.0
1.000e+030  0.1  0.1  0.1
1.000e+030  0.0  0.0  0.0
1.000e+099  0.0  0.0  0.0
END

```

```

-----

-- Wear factors
-----

```

```

-- Wear coefficient for dry running [10^-6 mm3/N·m]

```

```

:TABLE FUNCTION KwearDry

```

```

    INPUT X ZahnTempFlanke TREAT LINEAR

```

```

DATA

```

```

    20   93   148   204
    0.71  3.54 17.32 41.6

```

```

END

```

```

-----

-- Additional info about limiting values for material data
-----

```

```

-- Minimum temperature [°C] of the measured data (E-modulus, sigFs, sigFb) (0-No Data)

```

```

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

```

```

:TABLE FUNCTION MinTemp

```

```

    INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

```

DATA

|    |    |    |
|----|----|----|
| 0  | 1  | 2  |
| 20 | 20 | 20 |

END

-- Maximum temperature [°C] of the measured data (E-modulus, sigFs, sigFb) (0-No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MaxTemp

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 0   | 1   | 2   |
| 150 | 150 | 150 |

END

-- Minimum temperature [°C] of the measured data (sigFlim, sigHlim) (0-No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MinTempSigLim

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

|    |    |    |
|----|----|----|
| 0  | 1  | 2  |
| 20 | 20 | 20 |

END

-- Maximum temperature [°C] of the measured data (sigFlim, sigHlim) (0-No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MaxTempSigLim

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 0   | 1   | 2   |
| 150 | 150 | 150 |

END

-- Minimum temperature [°C] of the measured data (Wear coefficient) (0: No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MinTempWear

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

0 0 20

END

-- Maximum temperature [°C] of the measured data (Wear coefficient) (0: No Data)

-- Lubricant type: 0-Oil 1-Grease 2-Dry running

:TABLE FUNCTION MaxTempWear

INPUT X SchmierTyp TREAT LINEAR

DATA

0 1 2

0 0 204

END

-- Max. number of cycles at 20°C for sigFlim

:TABLE FUNCTION MaxCyclesigFlim

INPUT X None TREAT LINEAR

DATA

0

5.347e+006

END

-- Damage probability for statistical evaluation of cycles to failure, %

:TABLE FUNCTION DamageProbability

INPUT X None TREAT LINEAR

DATA

```
0
50
END

-- Type of plastic material
-- Values: 0-not on the list, 1-POM, 2-PEEK, 3-PEEK+30%CF, 4-PA46, 5-PA66, 6-PA6,
-- 7-PA66+GF, 8-PPS, 9-PPS+GF, 10-PA12, 11-PBT, 12-PET
:TABLE FUNCTION MaterialType
    INPUT X None TREAT LINEAR
DATA
    0
    0
END
```



## **Anexo A: Propriedades dos materiais**

### **A.4: iglidur® I3**

## Product: iglidur® I3

21.02.2017

### General properties: <sup>(3)</sup>

|                                                          |                        |
|----------------------------------------------------------|------------------------|
| Density:                                                 | 1.05 g/cm <sup>3</sup> |
| Colour:                                                  | yellow                 |
| Saturation with moisture absorption at 23°C / 50% r. h.: | 0.8 weight %           |
| Saturation with water:                                   | 1.9 weight %           |

### Mechanical properties: <sup>(3)</sup>

|                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| Flexural modulus of elasticity: | 1400 MPa                   |
| Flexural strength:              | 68 / 61 MPa <sup>(4)</sup> |
| Tensile modulus of elasticity:  | 1800 MPa                   |
| Tensile strength:               | 41 / 36 MPa <sup>(4)</sup> |
| Maximum surface pressure:       | 46 MPa                     |
| Shore D hardness:               | 70                         |

### Thermal properties:

|                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------|------------|
| Upper long-term application temperature <sup>(1)</sup> :      | 80 deg. C  |
| Upper short-term application temperature <sup>(1), 2)</sup> : | 140 deg. C |
| Upper short-term application temperature <sup>(1), 2)</sup> : | 150 deg. C |
| Lower application temperature:                                | -40 deg. C |

### Electric properties: <sup>(3)</sup>

|                             |                       |
|-----------------------------|-----------------------|
| Specific volume resistance: | >10 <sup>12</sup> Ωcm |
| Surface resistivity:        | >10 <sup>11</sup> Ω   |

<sup>(1)</sup> Relaxation cannot be precluded

<sup>(2)</sup> Without additional load; no sliding movement

<sup>(3)</sup> Depending on the pressure parameters and construction line

<sup>(4)</sup> Flat / upright sintered

The information on this Product Data Sheet is based on our current knowledge of the specified product. None of the information comprises one or more guarantees on certain properties.

Erstellt: 23.11.2015 / Dr. Ralf Selzer / Entwicklung  
Geändert: 21.02.2017 / Dr. Ralf Selzer / Entwicklung  
Verteiler: Technisches Marketing Energieketten und Gleitlager,  
Entwicklung Energieketten und Gleitlager

I:\QS\Qmdok\Formular\Allgemein\Entwicklung\F-2-0105 Vorlage Werkstoffdatenblatt.dot  
QS-Nr.: F-2-0105-C  
Seite 1 von 1

## **Anexo B: Ficheiros Excel segundo diretiva VDI 2736**

### **B.1: *Benchmarking* do sistema existente**

# Desenvolvimento de Sistema de Regulação Lombar para Assentos de Automóveis

| Dados de entrada                                 |            | Valor da carga característico |                |                   |             |                |
|--------------------------------------------------|------------|-------------------------------|----------------|-------------------|-------------|----------------|
| Designação                                       |            | PA66                          |                | Unidades          | PA66 + 35GF |                |
|                                                  |            | Worm (1)                      | Worm wheel (2) |                   | Worm (1)    | Worm wheel (2) |
| Módulo normal                                    | $m_n$      | 1.3750                        |                | mm                | 1.3750      |                |
| Nº dentes                                        | $z$        | 2.0000                        | 14.0000        |                   | 2.0000      | 14.0000        |
| Ângulo entre os veios                            | $\Sigma$   | 90.0000                       |                | °                 | 90.0000     |                |
| Ângulo de pressão normal                         | $\alpha_n$ | 1.5708                        |                | rad               | 1.5708      |                |
|                                                  |            | 20.0000                       |                | °                 | 20.0000     |                |
| Ângulo da hélice                                 | $\beta$    | 0.3491                        |                | rad               | 0.3491      |                |
|                                                  |            | 82.0000                       | 8.0000         | °                 | 82.0000     | 8.0000         |
| Diâmetro enrolamento de cabo                     | $d_{cabo}$ | 1.4312                        | 0.1396         | rad               | 1.4312      | 0.1396         |
|                                                  |            |                               | 25.6000        | mm                |             | 25.6000        |
| Força no cabo                                    | $F_c$      | 300.00                        |                | N                 | 300.00      |                |
| Coeficiente de atrito                            | $\mu$      | 0.1000                        |                |                   | 0.1200      |                |
| Velocidade angular                               | $n$        | 40.0000                       | 5.7143         | rpm               | 40.0000     | 5.7143         |
| Largura do dente                                 | $b$        | 11.8700                       | 17.0433        | mm                | 11.8700     | 17.0433        |
| Coef. de Poisson                                 | $\nu$      | 0.4                           | 0.4            |                   | 0.34        | 0.34           |
| Módulo de Young                                  | $E$        | 2000                          | 2000           | N/mm <sup>2</sup> | 3341        | 3341           |
| Fator de segurança mínimo no flanco do dente     | $S_{Hmin}$ | 1.2500                        |                |                   | 1.2500      |                |
| Fator de aplicação de carga                      | $K_A$      | 1.2500                        |                |                   | 1.2500      |                |
| Razão de transmissão                             | $u$        | 7.0000                        |                |                   | 7.0000      |                |
| Ângulo de pressão aparente                       | $\alpha_t$ | 69.0744                       | 20.1808        | °                 | 69.0744     | 20.1808        |
|                                                  |            | 1.2056                        | 0.3522         | rad               | 1.2056      | 0.3522         |
| Ângulo do passo                                  | $\gamma$   | 8.0000                        | 82.0000        | °                 | 8.0000      | 82.0000        |
|                                                  |            | 0.1396                        | 1.4312         | rad               | 0.1396      | 1.4312         |
| Entre-eixo                                       | $a$        | 19.5994                       |                | mm                | 19.5994     |                |
| Ângulo do passo de base                          | $\gamma_b$ | 21.4797                       | 68.5203        | °                 | 21.4797     | 68.5203        |
|                                                  |            | 0.3749                        | 1.1959         | rad               | 0.3749      | 1.1959         |
| Módulo aparente                                  | $m_t$      | 9.8798                        | 1.3885         | mm                | 9.8798      | 1.3885         |
| Módulo axial                                     | $m_x$      | 1.3885                        | 9.8798         | mm                | 1.3885      | 9.8798         |
| Fator de diâmetros                               | $q$        | 14.2307                       |                |                   | 14.2307     |                |
| Diâmetro primitivo                               | $d_{m1}$   | 19.7596                       |                | mm                | 19.7596     |                |
| Diâmetro primitivo                               | $d_2$      | 19.7596                       | 19.4392        | mm                |             | 19.4392        |
| Diâmetro de cabeça                               | $d_a$      | 22.5096                       | 22.1892        | mm                | 22.5096     | 22.1892        |
| Diâmetro de base                                 | $d_b$      | 7.0572                        | 18.2458        | mm                | 7.0572      | 18.2458        |
|                                                  |            | 0.1060                        |                | rad               | 0.1270      |                |
| Ângulo de atrito                                 | $\rho_z$   | 6.0744                        |                | °                 | 7.2774      |                |
| Rendimento                                       | $\eta_z$   | 56.058%                       |                | %                 | 51.453%     |                |
| Força tangencial                                 | $F_t$      | 99.0494                       | 395.0784       | N                 | 107.9134    | 395.0784       |
| Binário                                          | $T$        | 0.9786                        | 3.8400         | N.m               | 1.0662      | 3.8400         |
|                                                  |            |                               |                | mm                |             |                |
| Largura de contacto sob o diâmetro de referência | $b_m$      | 10.7815                       |                |                   | 10.7815     |                |
| Coeficiente do nº de dentes                      | $K_z$      | 0.4564                        |                |                   | 0.4564      |                |
| Capacidade de carga                              | $C$        | 23.0066                       |                | N/mm <sup>2</sup> | 23.0066     |                |
| Velocidade angular                               | $\omega$   | 4.1888                        | 0.5984         | rad/s             | 4.1888      | 0.5984         |
| Velocidade de escorregamento                     | $v_{gs}$   | 0.0418                        | 0.0411         | m/s               | 0.0418      | 0.0411         |
| Capacidade de carga limite                       | $C_{lim}$  | 22.8772                       |                | N/mm <sup>2</sup> | 22.8772     |                |
| Fator de segurança para a capacidade de carga    | $S_c$      | 0.9944                        |                |                   | 0.9944      |                |

| Capacidade de carga do pé do dente                                                       |                  |          |                |                                      |             |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|----------------|--------------------------------------|-------------|----------------|
| Designação                                                                               |                  | PA66     |                | Unidades                             | PA66 + 35GF |                |
|                                                                                          |                  | Worm (1) | Worm wheel (2) |                                      | Worm (1)    | Worm wheel (2) |
| Tensão de corte à fadiga admissível                                                      | $\tau_{Flim}$    | 13.9130  | 42.9453        | N                                    | 13.9130     | 58.5000        |
| Resistência à fadiga por tração                                                          | $\sigma_{ZSch}$  |          | 57.2604        | N/mm <sup>2</sup>                    |             | 78.0000        |
| Tensão de corte nominal                                                                  | $\tau_F$         |          | 17.3912        | N                                    |             | 17.3912        |
| Fator de segurança no pé do dente                                                        | $S_F$            |          | 2.4694         |                                      |             | 3.3638         |
| Secção resistente ao corte                                                               | $A_t$            |          | 28.40          | mm <sup>2</sup>                      |             | 28.40          |
| Fator da razão de condução                                                               | $Y_e$            |          | 1.0000         |                                      |             | 1.0000         |
| Razão de condução em n° inteiro                                                          | $\epsilon_{nz}$  |          | 1              |                                      |             | 1              |
| Razão de condução                                                                        | $\epsilon_n$     |          | 1.7174         |                                      |             | 1.7174         |
| Percurso de contacto no <i>addendum</i>                                                  | $g_{an}$         | 3.985    | 2.986          |                                      |             |                |
|                                                                                          |                  |          | 6.9712         | mm                                   |             | 6.9712         |
| Ângulo de hélice sobre círculo de base                                                   | $\beta_b$        | 1.1959   | 0.1312         | rad                                  | 1.1959      | 0.1312         |
|                                                                                          |                  | 68.5203  | 7.5147         | °                                    | 68.5203     | 7.5147         |
| Largura máxima do dente                                                                  | $b_{max}$        |          | 14.7430        | mm                                   |             | 14.7430        |
| Espessura do dente no diâmetro do <i>addendum</i> do parafuso sem-fim                    | $s_{da1}$        | 2.1811   |                | mm                                   | 2.1811      |                |
| Diâmetro exterior mínimo                                                                 | $d_{x0}$         |          | 19.4392        | mm                                   |             | 19.4392        |
| Ângulo de pressão na secção transversal                                                  | $\alpha_{x0t}$   |          | 0.3522         | rad                                  |             | 0.3522         |
|                                                                                          |                  |          | 20.1808        | °                                    |             | 20.1808        |
| Espessura do dente no círculo primitivo                                                  | $s_{t2}$         |          | 2.1811         | mm                                   |             | 2.1811         |
| Correção de dentado                                                                      | $x$              |          | 0.0000         | mm                                   |             | 0.0000         |
| Espessura de cabeça do dente                                                             | $s_{at2}$        |          | 0.9062         | mm                                   |             | 0.9062         |
| Ângulo de pressão no círculo do <i>addendum</i> da roda helicoidal na secção transversal | $\alpha_{at2}$   |          | 0.6054         | rad                                  |             | 0.6054         |
|                                                                                          |                  |          | 34.6860        | °                                    |             | 34.6860        |
| Capacidade de carga do flanco do dente                                                   |                  |          |                |                                      |             |                |
| Designação                                                                               |                  | PA66     |                | Unidades                             | PA66 + 35GF |                |
|                                                                                          |                  | Worm (1) | Worm wheel (2) |                                      | Worm (1)    | Worm wheel (2) |
| Pressão de contacto média                                                                | $\sigma_{Hm}$    |          | 94.5841        | N/mm <sup>2</sup>                    |             | 128.7982       |
| Pressão de contacto permitida                                                            | $\sigma_{HP}$    | 84.0000  | 84.0000        | N/mm <sup>2</sup>                    | 152.3760    | 152.3760       |
| Fator de segurança no flanco do dente                                                    | $S_H$            | 0.8881   |                |                                      | 1.1831      |                |
| Força normal ao dente                                                                    | $F_n$            | 431.0117 |                | N                                    | 432.3245    |                |
| Fator de contacto - Capacidade de carga do flanco do dente                               | $Z_{eS}$         | 0.7631   |                |                                      | 0.7631      |                |
| Maior semi-eixo da elipse de contacto                                                    | $a_h$            | 2.8771   |                |                                      | 2.4693      |                |
| Menor semi-eixo da elipse de contacto                                                    | $b_h$            | 0.7213   |                |                                      | 0.6191      |                |
| Fator do material                                                                        | $Z_F$            | 0.1080   |                | (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>-1/3</sup> | 0.0926      |                |
| Raio de curvatura equivalente no ponto da hélice                                         | $\rho_n$         | 2.9820   |                | mm                                   | 2.9820      |                |
| Raio de curvatura no círculo da hélice                                                   | $\rho_{n1,2}$    | 25.2018  | 3.3821         | mm                                   | 25.2018     | 3.3821         |
| Coeficiente do semi-eixo                                                                 | $\xi$            | 2.2744   |                |                                      | 2.2744      |                |
| Coeficiente do semi-eixo                                                                 | $\eta$           | 0.5702   |                |                                      | 0.5702      |                |
| Ângulo auxiliar                                                                          | $\vartheta$      | 0.6543   |                | rad                                  | 0.6543      |                |
|                                                                                          |                  | 37.4885  |                | °                                    | 37.4885     |                |
| Ângulo do veio                                                                           | $\varphi$        | 1.2289   |                | rad                                  | 1.2289      |                |
|                                                                                          |                  | 70.4135  |                | °                                    | 70.4135     |                |
|                                                                                          | $\sigma_{HG}$    | 105.0000 |                |                                      | 190.4700    |                |
| Resistência à fadiga sob contacto rolante                                                | $\sigma_{HlimN}$ | 105.0000 |                | N/mm <sup>2</sup>                    | 190.4700    |                |
| Fator de rugosidade superficial                                                          | $Z_R$            | 1.0000   |                |                                      | 1.0000      |                |
| Eficiência                                                                               |                  |          |                |                                      |             |                |
| Eficiência total                                                                         | $\eta_{ges}$     | 56.06%   |                |                                      | 51.45%      |                |
| Eficiência do rolamento do sem fim                                                       | $\eta_{L1}$      | 100%     |                |                                      | 100%        |                |
| Eficiência do rolamento da roda helicoidal                                               | $\eta_{L2}$      | 100%     |                |                                      | 100%        |                |



## **Anexo B: Ficheiros Excel segundo diretiva VDI 2736**

### **B.2: Nova solução**

| Dados de entrada                              |            | Valor da carga característico |                |                     |             |                |                     |
|-----------------------------------------------|------------|-------------------------------|----------------|---------------------|-------------|----------------|---------------------|
| Designação                                    |            | PA66 + 30GF + 15PTFE          |                |                     | iglidur® I3 |                |                     |
|                                               |            | Worm (1)                      | Worm wheel (2) | Unidades            | Worm (1)    | Worm wheel (2) | Unidades            |
| Módulo normal                                 | $m_n$      | 1.5000                        |                | mm                  | 1.5000      |                | mm                  |
| Nº dentes                                     | $z$        | 2                             | 14             |                     | 2           | 14             |                     |
| Ângulo entre os veios                         | $\Sigma$   | 90.0000                       |                | °                   | 90.0000     |                | °                   |
| Ângulo de pressão normal                      | $\alpha_n$ | 1.5708                        |                | rad                 | 1.5708      |                | rad                 |
|                                               |            | 20.0000                       |                | °                   | 20.0000     |                | °                   |
|                                               |            | 0.3491                        |                | rad                 | 0.3491      |                | rad                 |
| Ângulo da hélice                              | $\beta$    | 82.6000                       | 7.4000         | °                   | 82.6000     | 7.4000         | °                   |
|                                               |            | 1.4416                        | 0.1292         | rad                 | 1.4416      | 0.1292         | rad                 |
| Diâmetro de enrolamento de cabo               | $d_{cabo}$ | 29.8000                       |                | mm                  | 29.8000     |                | mm                  |
| Força no cabo                                 | $F_c$      | 300.00                        |                | N                   | 300.00      |                | N                   |
| Coeficiente de atrito                         | $\mu$      | 0.1000                        |                |                     | 0.1100      |                |                     |
| Velocidade angular                            | $n$        | 180.0000                      | 25.7143        | rpm                 | 180.0000    | 25.7143        | rpm                 |
| Largura do dente                              | $b$        | 13.0500                       | 17.0000        | mm                  | 13.0500     | 17.0000        | mm                  |
| Coef. de Poisson                              | $\nu$      | 0.43                          | 0.43           |                     | 0.40        | 0.40           |                     |
| Módulo de Young                               | $E$        | 4886                          | 4886           | N·mm <sup>-2</sup>  | 1800        | 1800           | N·mm <sup>-2</sup>  |
| Fator de segurança mínimo no flanco do dente  | $S_{Hmin}$ | 1.2500                        |                |                     | 1.2500      |                |                     |
| Fator de aplicação de carga                   | $K_A$      | 1.2500                        |                |                     | 1.2500      |                |                     |
| Nº ciclos                                     |            | 10000                         |                |                     | 10000       |                |                     |
| Tempo de vida requerido                       |            | 0.9259                        |                | h                   | 0.9259      |                | h                   |
| Razão de transmissão                          | $u$        | 7.00                          |                |                     | 7.00        |                |                     |
| Ângulo de pressão aparente                    | $\alpha_t$ | 70.5130                       | 20.1545        | °                   | 70.5130     | 20.1545        | °                   |
|                                               |            | 1.2307                        | 0.3518         | rad                 | 1.2307      | 0.3518         | rad                 |
| Ângulo do passo                               | $\gamma$   | 7.4000                        | 82.6000        | °                   | 7.4000      | 82.6000        | °                   |
|                                               |            | 0.1292                        | 1.4416         | rad                 | 0.1292      | 1.4416         | rad                 |
| Entre-eixo                                    | $a$        | 22.2345                       |                | mm                  | 22.2345     |                | mm                  |
| Ângulo do passo de base                       | $\gamma_b$ | 21.2724                       | 68.7276        | °                   | 21.2724     | 68.7276        | °                   |
|                                               |            | 0.3713                        | 1.1995         | rad                 | 0.3713      | 1.1995         | rad                 |
| Módulo aparente                               | $m_t$      | 11.6464                       | 1.5126         | mm                  | 11.6464     | 1.5126         | mm                  |
| Módulo axial                                  | $m_x$      | 1.5126                        | 11.6464        | mm                  | 1.5126      | 11.6464        | mm                  |
| Fator de diâmetros                            | $q$        | 15.3991                       |                |                     | 15.3991     |                |                     |
| Diâmetro primitivo                            | $d_{m1}$   | 23.2927                       |                | mm                  | 23.2927     |                | mm                  |
| Diâmetro primitivo                            | $d_2$      |                               | 21.1764        | mm                  |             | 21.1764        | mm                  |
| Diâmetro de cabeça                            | $d_a$      | 26.2927                       | 24.1764        | mm                  | 26.2927     | 24.1764        | mm                  |
| Diâmetro de base                              | $d_b$      | 7.7703                        | 19.8797        | mm                  | 7.7703      | 19.8797        | mm                  |
| Ângulo de atrito                              | $\rho_z$   | 0.1060                        |                | rad                 | 0.1165      |                | rad                 |
|                                               |            | 6.0744                        |                | °                   | 6.6766      |                | °                   |
| Rendimento                                    | $\eta_z$   | 54.204%                       |                | %                   | 51.796%     |                | %                   |
| Força tangencial                              | $F_t$      | 101.1544                      | 422.1686       | N                   | 105.8584    | 422.1686       | N                   |
| Binário                                       | $T$        | 1.1781                        | 4.4700         | N.m                 | 1.2329      | 4.4700         | N.m                 |
| Largura do dente primitivo                    | $b_m$      | 12.1966                       |                | mm                  | 12.1966     |                | mm                  |
| Coeficiente do nº de dentes                   | $K_z$      | 0.4564                        |                |                     | 0.4564      |                |                     |
| Capacidade de carga                           | $C$        | 19.9490                       |                | N·mm <sup>-2</sup>  | 19.9490     |                | N·mm <sup>-2</sup>  |
| Velocidade angular                            | $\omega$   | 18.8496                       | 2.6928         | rad·s <sup>-1</sup> | 18.8496     | 2.6928         | rad·s <sup>-1</sup> |
| Velocidade de escorregamento                  | $v_{gs}$   | 0.2214                        | 0.2013         | m·s <sup>-1</sup>   | 0.2214      | 0.2013         | m·s <sup>-1</sup>   |
| Capacidade de carga limite                    | $C_{lim}$  | 22.0076                       |                | N·mm <sup>-2</sup>  | 22.0076     |                | N·mm <sup>-2</sup>  |
| Fator de segurança para a capacidade de carga | $S_c$      | 1.1032                        |                |                     | 1.1032      |                |                     |

| Capacidade de carga do pé do dente                                                |                  |                      |                |                                       |             |                |                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|----------------|---------------------------------------|-------------|----------------|---------------------------------------|
| Designação                                                                        |                  | PA66 + 30GF + 15PTFE |                |                                       | iglidur® I3 |                |                                       |
|                                                                                   |                  | Worm (1)             | Worm wheel (2) | Unidades                              | Worm (1)    | Worm wheel (2) | Unidades                              |
| Tensão de corte à fadiga admissível                                               | $\tau_{Flim}$    |                      | 41.7808        | N                                     |             | 27.0000        | N                                     |
| Resistência à fadiga por tração                                                   | $\sigma_{ZSch}$  |                      | 55.7078        | N·mm <sup>-2</sup>                    |             | 36.0000        | N·mm <sup>-2</sup>                    |
| Tensão de corte nominal                                                           | $\tau_F$         |                      | 15.0454        | N                                     |             | 15.0454        | N                                     |
| Fator de segurança no pé do dente                                                 | $S_F$            |                      | 2.7770         |                                       |             | 1.7946         |                                       |
| Secção resistente ao corte                                                        | $A_t$            |                      | 35.07          | mm <sup>2</sup>                       |             | 35.07          | mm <sup>2</sup>                       |
| Fator da razão de condução                                                        | $Y_\epsilon$     |                      | 1.0000         |                                       |             | 1.0000         |                                       |
| Razão de condução em n° inteiro                                                   | $\epsilon_{nz}$  |                      | 1              |                                       |             | 1              |                                       |
| Razão de condução                                                                 | $\epsilon_n$     |                      | 1.7185         |                                       |             | 1.7185         |                                       |
| Percurso de contacto no addendum                                                  | $g_{an}$         |                      | 7.6098         | mm                                    |             | 7.6098         | mm                                    |
| Ângulo de hélice sobre círculo de base                                            | $\theta_b$       | 1.1995               | 0.1213         | rad                                   | 1.1995      | 0.1213         | rad                                   |
|                                                                                   |                  | 68.7276              | 6.9515         | °                                     | 68.7276     | 6.9515         | °                                     |
| Largura máxima do dente                                                           | $b_{máx}$        |                      | 16.7186        | mm                                    |             | 16.7186        | mm                                    |
| Espessura do dente no diâmetro do addendum do parafuso sem-fim                    | $s_{da1}$        | 2.3760               |                | mm                                    | 2.3760      |                | mm                                    |
| Diâmetro exterior mínimo                                                          | $d_{x0}$         |                      | 21.1764        | mm                                    |             | 21.1764        | mm                                    |
| Ângulo de pressão na secção transversal                                           | $\alpha_{x0t}$   |                      | 0.3518         | rad                                   |             | 0.3518         | rad                                   |
|                                                                                   |                  |                      | 20.1545        | °                                     |             | 20.1545        | °                                     |
| Espessura do dente no círculo primitivo                                           | $s_{t2}$         |                      | 2.3760         | mm                                    |             | 2.3760         | mm                                    |
| Correção de dentado                                                               | $x$              | 0.0000               | 0.0000         | mm                                    | 0.0000      | 0.0000         | mm                                    |
| Espessura de cabeça do dente                                                      | $s_{at2}$        |                      | 0.9857         | mm                                    |             | 0.9857         | mm                                    |
| Ângulo de pressão no círculo do addendum da roda helicoidal na secção transversal | $\alpha_{at2}$   |                      | 0.6054         | rad                                   |             | 0.6054         | rad                                   |
|                                                                                   |                  |                      | 34.6866        | °                                     |             | 34.6866        | °                                     |
| Capacidade de carga do flanco do dente                                            |                  |                      |                |                                       |             |                |                                       |
| Designação                                                                        |                  | PA66 + 30GF + 15PTFE |                |                                       | iglidur® I3 |                |                                       |
|                                                                                   |                  | Worm (1)             | Worm wheel (2) | Unidades                              | Worm (1)    | Worm wheel (2) | Unidades                              |
| Pressão de contacto média                                                         | $\sigma_{Hm}$    |                      | 166.0667       | N·mm <sup>-2</sup>                    |             | 83.6860        | N·mm <sup>-2</sup>                    |
| Pressão de contacto permitida                                                     | $\sigma_{HP}$    |                      | 0.0000         | N·mm <sup>-2</sup>                    |             | 46.0000        | N·mm <sup>-2</sup>                    |
| Fator de segurança no flanco do dente                                             | $S_H$            |                      | 0.0000         |                                       |             | 0.5497         |                                       |
| Força normal ao dente                                                             | $F_n$            |                      | 459.3850       | N                                     |             | 460.0297       | N                                     |
| Fator de contacto - Capacidade de carga do flanco do dente                        | $Z_{\epsilon S}$ |                      | 0.7628         |                                       |             | 0.7628         |                                       |
| Maior semi-eixo da elipse de contacto                                             | $a_h$            |                      | 2.2928         |                                       |             | 3.2322         |                                       |
| Menor semi-eixo da elipse de contacto                                             | $b_h$            |                      | 0.5493         |                                       |             | 0.7743         |                                       |
| Fator do material                                                                 | $Z_F$            |                      | 0.0794         | (N·mm <sup>-2</sup> ) <sup>-1/3</sup> |             | 0.1119         | (N·mm <sup>-2</sup> ) <sup>-1/3</sup> |
| Raio de curvatura equivalente no ponto da hélice                                  | $\rho_n$         |                      | 3.2772         | mm                                    |             | 3.2772         | mm                                    |
| Raio de curvatura no círculo da hélice                                            | $\rho_{n1,2}$    | 30.2623              | 3.6752         | mm                                    | 30.2623     | 3.6752         | mm                                    |
| Coefficiente do semi-eixo                                                         | $\xi$            |                      | 2.3391         |                                       |             | 2.3391         |                                       |
| Coefficiente do semi-eixo                                                         | $\eta$           |                      | 0.5604         |                                       |             | 0.5604         |                                       |
| Ângulo auxiliar                                                                   | $\vartheta$      |                      | 0.6314         | rad                                   |             | 0.6314         | rad                                   |
|                                                                                   |                  |                      | 36.1740        | °                                     |             | 36.1740        | °                                     |
| Ângulo do veio                                                                    | $\varphi$        |                      | 1.2523         | rad                                   |             | 1.2523         | rad                                   |
|                                                                                   |                  |                      | 71.7499        | °                                     |             | 71.7499        | °                                     |
|                                                                                   | $\sigma_{HG}$    |                      | 0.0000         |                                       |             |                |                                       |
| Resistência à fadiga sob contacto rolante                                         | $\sigma_{HlimN}$ |                      |                | N·mm <sup>-2</sup>                    |             |                | N·mm <sup>-2</sup>                    |
| Fator de rugosidade superficial                                                   | $Z_R$            |                      | 1.0000         |                                       |             | 1.0000         |                                       |
| Eficiência                                                                        |                  |                      |                |                                       |             |                |                                       |
| Eficiência total                                                                  | $\eta_{ges}$     |                      | 54.20%         |                                       |             | 51.80%         |                                       |
| Eficiência do rolamento do sem fim                                                | $\eta_{L1}$      |                      | 100%           |                                       |             | 100%           |                                       |
| Eficiência do rolamento da roda helicoidal                                        | $\eta_{L2}$      |                      | 100%           |                                       |             | 100%           |                                       |

| Dados de entrada                              |            |             |                |                     |
|-----------------------------------------------|------------|-------------|----------------|---------------------|
| Valor da carga característico                 |            |             |                |                     |
| Designação                                    |            | PA66 + 35GF |                |                     |
|                                               |            | Worm (1)    | Worm wheel (2) | Unidades            |
| Módulo normal                                 | $m_n$      | 1.5000      |                | mm                  |
| Nº dentes                                     | $z$        | 2           | 14             |                     |
| Ângulo entre os veios                         | $\Sigma$   | 90.0000     |                | °                   |
|                                               |            | 1.5708      |                | rad                 |
| Ângulo de pressão normal                      | $\alpha_n$ | 20.0000     |                | °                   |
|                                               |            | 0.3491      |                | rad                 |
| Ângulo da hélice                              | $\beta$    | 82.6000     | 7.4000         | °                   |
|                                               |            | 1.4416      | 0.1292         | rad                 |
| Diâmetro de enrolamento de cabo               | $d_{cabo}$ |             | 29.8000        | mm                  |
| Força no cabo                                 | $F_c$      | 300.00      |                | N                   |
| Coeficiente de atrito                         | $\mu$      | 0.1200      |                |                     |
| Velocidade angular                            | $n$        | 180.0000    | 25.7143        | rpm                 |
| Largura do dente                              | $b$        | 13.0500     | 17.0000        | mm                  |
| Coef. de Poisson                              | $\nu$      | 0.34        | 0.34           |                     |
| Módulo de Young                               | $E$        | 3341        | 3341           | N·mm <sup>-2</sup>  |
| Fator de segurança mínimo no flanco do dente  | $S_{Hmin}$ | 1.2500      |                |                     |
| Fator de aplicação de carga                   | $K_A$      | 1.2500      |                |                     |
| Nº ciclos                                     |            | 10000       |                |                     |
| Tempo de vida requerido                       |            | 0.9259      |                | h                   |
| Razão de transmissão                          | $u$        | 7.00        |                |                     |
| Ângulo de pressão aparente                    | $\alpha_t$ | 70.5130     | 20.1545        | °                   |
|                                               |            | 1.2307      | 0.3518         | rad                 |
|                                               |            | 7.4000      | 82.6000        | °                   |
| Ângulo do passo                               | $\gamma$   | 0.1292      | 1.4416         | rad                 |
| Entre-eixo                                    | $a$        | 22.2345     |                | mm                  |
| Ângulo do passo de base                       | $\gamma_b$ | 21.2724     | 68.7276        | °                   |
|                                               |            | 0.3713      | 1.1995         | rad                 |
| Módulo aparente                               | $m_t$      | 11.6464     | 1.5126         | mm                  |
| Módulo axial                                  | $m_x$      | 1.5126      | 11.6464        | mm                  |
| Fator de diâmetros                            | $q$        | 15.3991     |                |                     |
| Diâmetro primitivo                            | $d_{m1}$   | 23.2927     |                | mm                  |
| Diâmetro primitivo                            | $d_2$      |             | 21.1764        | mm                  |
| Diâmetro de cabeça                            | $d_a$      | 26.2927     | 24.1764        | mm                  |
| Diâmetro de base                              | $d_b$      | 7.7703      | 19.8797        | mm                  |
| Ângulo de atrito                              | $\rho_z$   | 0.1270      |                | rad                 |
|                                               |            | 7.2774      |                | °                   |
| Rendimento                                    | $\eta_z$   | 49.586%     |                | %                   |
| Força tangencial                              | $F_t$      | 110.5756    | 422.1686       | N                   |
| Binário                                       | $T$        | 1.2878      | 4.4700         | N.m                 |
| Largura do dente primitivo                    | $b_m$      | 12.1966     |                | mm                  |
| Coeficiente do nº de dentes                   | $K_z$      | 0.4564      |                |                     |
| Capacidade de carga                           | $C$        | 19.9490     |                | N·mm <sup>-2</sup>  |
| Velocidade angular                            | $\omega$   | 18.8496     | 2.6928         | rad·s <sup>-1</sup> |
| Velocidade de escorregamento                  | $v_{gs}$   | 0.2214      | 0.2013         | m·s <sup>-1</sup>   |
| Capacidade de carga limite                    | $C_{lim}$  | 22.0076     |                | N·mm <sup>-2</sup>  |
| Fator de segurança para a capacidade de carga | $S_C$      | 1.1032      |                |                     |

| Capacidade de carga do pé do dente                                                |                   |             |                |                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|----------------|---------------------------------------|
| Designação                                                                        |                   | PA66 + 35GF |                | Unidades                              |
|                                                                                   |                   | Worm (1)    | Worm wheel (2) |                                       |
| Tensão de corte à fadiga admissível                                               | $\tau_{Flim}$     |             | 58.5000        | N                                     |
| Resistência à fadiga por tração                                                   | $\sigma_{ZSch}$   |             | 78.0000        | N·mm <sup>-2</sup>                    |
| Tensão de corte nominal                                                           | $\tau_F$          |             | 15.0454        | N                                     |
| Fator de segurança no pé do dente                                                 | $S_F$             |             | 3.8882         |                                       |
| Secção resistente ao corte                                                        | $A_t$             |             | 35.07          | mm <sup>2</sup>                       |
| Fator da razão de condução                                                        | $\gamma_\epsilon$ |             | 1.0000         |                                       |
| Razão de condução em nº inteiro                                                   | $\epsilon_{nz}$   |             | 1              |                                       |
| Razão de condução                                                                 | $\epsilon_n$      |             | 1.7185         |                                       |
| Percurso de contacto no addendum                                                  | $g_{an}$          |             | 7.6098         | mm                                    |
| Ângulo de hélice sobre círculo de base                                            | $\beta_b$         | 1.1995      | 0.1213         | rad                                   |
|                                                                                   |                   | 68.7276     | 6.9515         | °                                     |
| Largura máxima do dente                                                           | $b_{max}$         |             | 16.7186        | mm                                    |
| Espessura do dente no diâmetro do addendum do parafuso sem-fim                    | $s_{da1}$         | 2.3760      |                | mm                                    |
| Diâmetro exterior mínimo                                                          | $d_{x0}$          |             | 21.1764        | mm                                    |
| Ângulo de pressão na secção transversal                                           | $\alpha_{x0t}$    |             | 0.3518         | rad                                   |
|                                                                                   |                   |             | 20.1545        | °                                     |
| Espessura do dente no círculo primitivo                                           | $s_{t2}$          |             | 2.3760         | mm                                    |
| Correção de dentado                                                               | $x$               | 0.0000      | 0.0000         | mm                                    |
| Espessura de cabeça do dente                                                      | $s_{at2}$         |             | 0.9857         | mm                                    |
| Ângulo de pressão no círculo do addendum da roda helicoidal na secção transversal | $\alpha_{at2}$    |             | 0.6054         | rad                                   |
|                                                                                   |                   |             | 34.6866        | °                                     |
| Capacidade de carga do flanco do dente                                            |                   |             |                |                                       |
| Designação                                                                        |                   | PA66 + 35GF |                | Unidades                              |
|                                                                                   |                   | Worm (1)    | Worm wheel (2) |                                       |
| Pressão de contacto média                                                         | $\sigma_{Hm}$     |             | 122.1834       | N·mm <sup>-2</sup>                    |
| Pressão de contacto permitida                                                     | $\sigma_{HP}$     |             | 152.3760       | N·mm <sup>-2</sup>                    |
| Fator de segurança no flanco do dente                                             | $S_H$             |             | 1.2471         |                                       |
| Força normal ao dente                                                             | $F_n$             |             | 460.6762       | N                                     |
| Fator de contacto - Capacidade de carga do flanco do dente                        | $Z_{\epsilon S}$  |             | 0.7628         |                                       |
| Maior semi-eixo da elipse de contacto                                             | $a_h$             |             | 2.6768         |                                       |
| Menor semi-eixo da elipse de contacto                                             | $b_h$             |             | 0.6413         |                                       |
| Fator do material                                                                 | $Z_F$             |             | 0.0926         | (N·mm <sup>-2</sup> ) <sup>-1/3</sup> |
| Raio de curvatura equivalente no ponto da hélice                                  | $\rho_n$          |             | 3.2772         | mm                                    |
| Raio de curvatura no círculo da hélice                                            | $\rho_{n1,2}$     | 30.2623     | 3.6752         | mm                                    |
| Coefficiente do semi-eixo                                                         | $\xi$             |             | 2.3391         |                                       |
| Coefficiente do semi-eixo                                                         | $\eta$            |             | 0.5604         |                                       |
| Ângulo auxiliar                                                                   | $\vartheta$       |             | 0.6314         | rad                                   |
|                                                                                   |                   |             | 36.1740        | °                                     |
| Ângulo do veio                                                                    | $\varphi$         |             | 1.2523         | rad                                   |
|                                                                                   |                   |             | 71.7499        | °                                     |
|                                                                                   | $\sigma_{HG}$     |             | 190.4700       |                                       |
| Resistência à fadiga sob contacto rolante                                         | $\sigma_{HlimN}$  |             | 190.4700       | N·mm <sup>-2</sup>                    |
| Fator de rugosidade superficial                                                   | $Z_R$             |             | 1.0000         |                                       |
| Eficiência                                                                        |                   |             |                |                                       |
| Eficiência total                                                                  | $\eta_{ges}$      |             | 49.59%         |                                       |
| Eficiência do rolamento do sem fim                                                | $\eta_{L1}$       |             | 100%           |                                       |
| Eficiência do rolamento da roda helicoidal                                        | $\eta_{L2}$       |             | 100%           |                                       |



## **Anexo C: Relatórios obtidos com o *software* KISSsoft**

### **C.1: *Benchmarking* do sistema existente**

|                                                     |       |                |              |
|-----------------------------------------------------|-------|----------------|--------------|
| KISSsoft Release 2020 A.1                           |       |                |              |
| KISSsoft University license - Universidade do Porto |       |                |              |
| File                                                |       |                |              |
| Name :                                              | Worm  |                |              |
| Changed by:                                         | danie | on: 05.01.2022 | at: 00:45:21 |

**Important hint: At least one warning has occurred during the calculation:**

1-> The active tip diameter  $d_{Na}$  is deduced from the root form diameter  $d_{Ff}$  of the mating gear.  
The calculation is only approximative.

2-> The specified gear pair data does not comply with the limitations of the calculation method!

The use of VDI 2736 is subject to the following restrictions:

- Steel/plastic combination
- Number of teeth  $z_1 < 6$
- Normal module  $\geq 0.30$  mm
- Shaft angle =  $90^\circ$

3-> Gear 1: Flank fatigue data is only available for dry material.

4-> Gear 2: Flank fatigue data is only available for dry material.

5-> Gear 1: Root fatigue data is only available for dry material.

6-> Gear 2: Root fatigue data is only available for dry material.

7-> Gear 1:

Values for tooth flank strength  $\sigma_{Hlim}$  (Dry) are not available in VDI2736. Values were taken from the VDI2545.

8-> Gear 2:

Values for tooth flank strength  $\sigma_{Hlim}$  (Dry) are not available in VDI2736. Values were taken from the VDI2545.

9-> The calculated safety factors for the tooth root and/or flank are considerably lower than the required safeties!

(Required safeties are defined in the 'Required safeties' tab in the 'Module specific settings'.)

### Worm Analysis (Precision mechanics)

Calculation method: Plastic according to VDI 2736:2013 (YF Method C)

Drawing or article number:

Gear 1: 0.000.0

Gear 2: 0.000.0

|                               | ----- Worm ----- | Worm wheel ----  |
|-------------------------------|------------------|------------------|
| Power (W)                     | [P]              | 2.298            |
| Power (W)                     | [P]              | 4.099 2.298      |
| Speed (1/min)                 | [n]              | 40.0 5.7         |
| Torque (Nmm)                  | [T]              | 978.588 3840.000 |
| Application factor            | [KA]             | 1.25             |
| Required service life         | [H]              | 0.09             |
| Gear driving (+) / driven (-) |                  | + -              |

### **Tooth geometry and material**

|                                              | ----- Worm -----         | Worm wheel ---- |
|----------------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Center distance (mm)                         | [a]                      | 19.599          |
| Center distance tolerance                    | ISO 286:2010 Measure js7 |                 |
| Axial crossing angle ( $^\circ$ )            | [Σ]                      | 90.0000         |
| Normal module (mm)                           | [mn]                     | 1.3750          |
| Normal module at operating pitch circle (mm) | [msn]                    | 1.3750          |
| Helix angle at reference circle ( $^\circ$ ) | [β]                      | 82.0000 8.0000  |
| Hand of gear                                 | [L/Rβ1]                  | right           |



|                                           |                   |         |         |
|-------------------------------------------|-------------------|---------|---------|
| Hand of gear                              | [L/Rβ2]           |         | right   |
| Normal pressure angle (°)                 | [αn]              | 20.0000 |         |
| Lead angle at reference diameter (°)      | [γ]               | 8.0000  | 82.0000 |
| Helix angle at operating pitch circle (°) | [βs]              | 82.0000 | 8.0000  |
| Number of teeth                           | [z]               | 2       | 14      |
| Shape of flank:                           | ZI                |         |         |
| Facewidth (mm)                            | [b]               | 11.87   | 17.04   |
| Facewidth for calculation (mm)            | [beH]             | 6.88    | 6.88    |
| Accuracy grade                            | [Q-ISO 1328:2013] | A6      | A6      |
| Inner diameter (mm)                       | [di]              | 0.00    | 0.00    |
| Inner diameter of gear rim (mm)           | [dbi]             | 0.00    | 0.00    |

## Material

## Worm

PA66 (VDI2736), Thermoplastic PA, untreated  
VDI2736/VDI2545 [S B F Wd C]

Woehler line tooth root stress from file

Z014-PA66\_VDI2736.DAT

S-N curve (Woehler line) Hertzian pressure from file Z014-PA66\_VDI2736.DAT

## Gear2

PA66 (VDI2736), Thermoplastic PA, untreated  
VDI2736/VDI2545 [S B F Wd C]

Woehler line tooth root stress from file

Z014-PA66\_VDI2736.DAT

S-N curve (Woehler line) Hertzian pressure from file Z014-PA66\_VDI2736.DAT

|                                        |                       |                 |
|----------------------------------------|-----------------------|-----------------|
|                                        | ----- Worm -----      | Worm wheel ---- |
| Tooth root temperature (°C)            | [TR]                  | 25.0 25.0       |
| Flank temperature (°C)                 | [TF]                  | 25.0 25.0       |
| Pulsating shear strength at NL (N/mm²) | [rFadm]               | 47.00 54.70     |
| Strength against Hertzian pressure     | at NL (N/mm²)[σHlimN] | 69.30 69.30     |
| Tensile strength (N/mm²)               | [σB]                  | 38.24 38.24     |
| Yield point (N/mm²)                    | [σS]                  | 35.47 35.47     |
| Young's modulus (N/mm²)                | [E]                   | 2000 2000       |
| Poisson's ratio                        | [ν]                   | 0.400 0.400     |
| Roughness average value DS, flank (μm) | [RAH]                 | 0.00 0.00       |
| Roughness average value DS, root (μm)  | [RAF]                 | 0.00 0.00       |
| Mean roughness height, Rz, flank (μm)  | [RZH]                 | 0.00 0.00       |
| Mean roughness height, Rz, root (μm)   | [RZF]                 | 0.00 0.00       |

## Gear reference profile

1:

|                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| Reference profile               | 1.25 / 0.30 / 1.0 DIN 867:1986 |
| Dedendum coefficient            | [hfP*] 1.250                   |
| Root radius factor              | [pfP*] 0.300 (pfPmax*=0.472)   |
| Addendum coefficient            | [haP*] 1.000                   |
| Tip radius factor               | [paP*] 0.000                   |
| Protuberance height coefficient | [hprP*] 0.000                  |
| Protuberance angle              | [αprP] 0.000                   |
| Tip form height coefficient     | [hFaP*] 0.000                  |
| Ramp angle                      | [αKP] 0.000                    |
|                                 | not topping                    |

## Gear reference profile

2:

|                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| Reference profile               | 1.25 / 0.30 / 1.0 DIN 867:1986 |
| Dedendum coefficient            | [hfP*] 1.250                   |
| Root radius factor              | [pfP*] 0.300 (pfPmax*=0.472)   |
| Addendum coefficient            | [haP*] 1.000                   |
| Tip radius factor               | [paP*] 0.000                   |
| Protuberance height coefficient | [hprP*] 0.000                  |
| Protuberance angle              | [αprP] 0.000                   |
| Tip form height coefficient     | [hFaP*] 0.000                  |
| Ramp angle                      | [αKP] 0.000                    |
|                                 | not topping                    |



## Information on final machining

|                                  |         |       |       |
|----------------------------------|---------|-------|-------|
| Dedendum reference profile       | [hfP*]  | 1.250 | 1.250 |
| Tooth root radius Refer. profile | [pfp*]  | 0.300 | 0.300 |
| Addendum Reference profile       | [haP*]  | 1.000 | 1.000 |
| Protuberance height coefficient  | [hprP*] | 0.000 | 0.000 |
| Protuberance angle (°)           | [aprp]  | 0.000 | 0.000 |
| Tip form height coefficient      | [hFaP*] | 0.000 | 0.000 |
| Ramp angle (°)                   | [αKP]   | 0.000 | 0.000 |

|                               |                        |      |                  |
|-------------------------------|------------------------|------|------------------|
| Type of profile modification: | none (only running-in) |      |                  |
| Tip relief by running in (μm) | [Ca L/R]               | 19.4 | /19.4 19.4 /19.4 |

|                          |             |
|--------------------------|-------------|
| Lubrication type         | Dry-running |
| Ambient temperature (°C) | [TU] 23.000 |

|                                                             |                  |                                  |         |          |         |
|-------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------|---------|----------|---------|
|                                                             |                  | ----- Worm ----- Worm wheel ---- |         |          |         |
| Overall transmission ratio                                  | [itot]           | -7.000                           |         |          |         |
| Gear ratio                                                  | [u]              | 7.000                            |         |          |         |
| Transverse module (mm)                                      | [mt]             | 9.8798                           | 1.3885  |          |         |
| Axial module (mm)                                           | [mx]             | 1.3885                           | 9.8798  |          |         |
| Normal pressure angle at the operating pitch circle (°)     | [αsn]            | 20.000                           | 20.000  |          |         |
| Transverse pressure angle at the operating pitch circle (°) | [αst]            | 69.074                           | 20.181  |          |         |
| Axial pressure angle at the operating pitch circle (°)      | [αsx]            | 20.181                           | 69.075  |          |         |
| Transverse pressure angle (°)                               | [αt]             | 69.074                           | 20.181  |          |         |
| Axial pressure angle (°)                                    | [αx]             | 20.181                           | 69.074  |          |         |
| Base helix angle (°)                                        | [βb]             | 68.520                           | 7.515   |          |         |
| Diametral factor q                                          | [q]              | 14.231                           |         |          |         |
| Reference center distance (mm)                              | [ad]             | 19.599                           |         |          |         |
| Sum of profile shift coefficients                           | [Σxi]            | 0.0000                           |         |          |         |
| Profile shift coefficient                                   | [x]              | 0.0000                           | 0.0000  |          |         |
| Tip alteration (mm)                                         | [k*mn]           | 0.000                            | 0.000   |          |         |
| Reference diameter (mm)                                     | [d]              | 19.760                           | 19.439  |          |         |
| Base diameter (mm)                                          | [db]             | 7.057                            | 18.246  |          |         |
| Tip diameter (mm)                                           | [da]             | 22.510                           | 22.189  |          |         |
| (mm)                                                        | [da.e/i]         | 22.510 /                         | 22.489  | 22.189 / | 22.168  |
| Tip diameter allowances (mm)                                | [Ada.e/i]        | 0.000 /                          | -0.021  | 0.000 /  | -0.021  |
| Tip form diameter (mm)                                      | [dFa.e/i]        | 22.510 /                         | 22.489  | 22.189 / | 22.168  |
| Active tip diameter (mm)                                    | [dNa]            | 22.073                           | 22.189  |          |         |
| Active tip diameter (mm)                                    | [dNa.e/i]        | 22.073 /                         | 22.073  | 22.189 / | 22.168  |
| Operating pitch circle diameter (mm)                        | [ds]             | 19.760                           | 19.439  |          |         |
| Root diameter (mm)                                          | [df]             | 16.322                           | 16.002  |          |         |
| Generating Profile shift coefficient                        | [x.e/i]          | -0.0539/                         | -0.0839 | -0.0539/ | -0.0839 |
| Generated root diameter with xE (mm)                        | [df.e/i]         | 16.174 /                         | 16.091  | 15.853 / | 15.771  |
| Theoretical tip clearance (mm)                              | [c]              | 0.344                            | 0.344   |          |         |
| Effective tip clearance (mm)                                | [c.e/i]          | 0.480 /                          | 0.407   | 0.480 /  | 0.407   |
| Active root diameter (mm)                                   | [dNf]            | 17.734                           | 18.285  |          |         |
| Root form diameter (mm)                                     | [dFf]            | 16.901                           | 18.246  |          |         |
| (mm)                                                        | [dFf.e/i]        | 16.757 /                         | 16.677  | 18.246 / | 18.246  |
| Involute length (mm)                                        | [l_dFa-l_dFf]    | 7.830                            | 2.185   |          |         |
| Addendum, mn*(haP*+x+k) (mm)                                | [ha]             | 1.375                            | 1.375   |          |         |
| (mm)                                                        | [ha.e/i]         | 1.375 /                          | 1.365   | 1.375 /  | 1.365   |
| Dedendum (mm)                                               | [hf=mn*(hfP*-x)] | 1.719                            | 1.719   |          |         |
| (mm)                                                        | [hf.e/i]         | 1.793 /                          | 1.834   | 1.793 /  | 1.834   |
| Roll angle at dFa (°)                                       | [xsi_dFa.e/i]    | 173.535 /                        | 173.356 | 39.653 / | 39.537  |
| Roll angle to dNa (°)                                       | [xsi_dNa.e/i]    | 169.800 /                        | 169.800 | 39.653 / | 39.537  |
| Roll angle at dFf (°)                                       | [xsi_dFf.e/i]    | 123.392 /                        | 122.676 | 0.060 /  | 0.060   |
| Tooth height (mm)                                           | [h]              | 3.094                            | 3.094   |          |         |
| Normal tooth thickness at tip circle (mm)                   | [san]            | 1.153                            | 0.895   |          |         |
| (mm)                                                        | [san.e/i]        | 1.106 /                          | 1.068   | 0.847 /  | 0.799   |
| Normal space width at root circle (mm)                      | [efn]            | 0.924                            | 0.000   |          |         |
| (mm)                                                        | [efn.e/i]        | 0.926 /                          | 0.927   | 0.000 /  | 0.000   |
| Lead height (mm)                                            | [pz]             | 8.724                            | 434.537 |          |         |
| Axial pitch (mm)                                            | [px]             | 4.362                            | 31.038  |          |         |
| Normal pitch, base circle (mm)                              | [pbn, pen]       | 4.059                            |         |          |         |
| Normal pitch, reference circle (mm)                         | [pn]             | 4.320                            |         |          |         |
| Normal pitch, operating pitch circle (mm)                   | [psn]            | 4.320                            |         |          |         |
| Length of path of contact (mm)                              | [gan]            | 6.343                            |         |          |         |



|                                     |          |         |       |
|-------------------------------------|----------|---------|-------|
| Length A-S (mm)                     | [AS]     | 3.357   |       |
| Length S-E (mm)                     | [SE]     | 2.986   |       |
| Transverse contact ratio            | [εα]     | 0.210   | 1.536 |
| Overlap ratio                       | [εβ]     | 1.353   | 0.027 |
| Total contact ratio                 | [εγ]     | 1.563   |       |
| Total contact ratio with allowances | [εγ.e/i] | 1.570 / | 1.543 |

#### General influence factors

|                                                               |         | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |
|---------------------------------------------------------------|---------|------------------|-----------------|
| Nominal circumferential force at operating pitch circle (N)   | [Ft]    | 99.05            | 395.08          |
| Axial force (N)                                               | [Fa]    | -395.08          | -99.05          |
| Radial force (N)                                              | [Fr]    | 147.41           | -147.41         |
| Normal force (N)                                              | [Fnorm] | 431.0            |                 |
| (calculation with normal force, taking friction into account) |         |                  |                 |
| Pressure ellipse width (mm)                                   | [2*a]   | 5.760            |                 |
| Pressure ellipse height (mm)                                  | [2*b]   | 1.442            |                 |
| Surface of the pressure ellipse (mm²)                         | [π*a*b] | 9.070            |                 |
| Mean tooth friction number                                    | [muzm]  | 0.100            |                 |
| Tooth friction angle (°)                                      | [roz]   | 6.074            |                 |
| Meshing efficiency (%)                                        | [ηz]    | 56.057           |                 |
| Circumferential speed reference circle (m/s)                  | [v]     | 0.04             | 0.01            |
| Sliding velocity at operating pitch circle (m/s)              | [vgs]   | 0.04             |                 |
| Max. sliding velocity at tip (m/s)                            | [vgg]   | 0.05             | 0.05            |
| Mean sliding velocity (m/s)                                   | [vgm]   | 0.04             |                 |
| Bearing loss-power (W)                                        | [PVLP]  | 0.000            |                 |
| Sealing power loss (W)                                        | [PVD]   | 0.000            |                 |
| Idle power loss (W)                                           | [PV0]   | 0.000            |                 |
| Meshing power loss (W)                                        | [PVZ]   | 1.801            |                 |
| Total power loss (W)                                          | [PV]    | 1.801            |                 |
| Total efficiency (%)                                          | [ηGes]  | 56.057           |                 |
| Number of load cycles (in mio.)                               | [NL]    | 0.001            | 0.000           |

#### Draft calculation

|                                      |        | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |
|--------------------------------------|--------|------------------|-----------------|
| Coefficient for number of teeth      | [Kz]   | 0.46             |                 |
| Load-bearing face width worm (mm)    | [bm]   | 10.78            |                 |
| Load coefficient (N/mm²)             | [C]    | 23.007           |                 |
| Permissible load coefficient (N/mm²) | [Clim] | 11.532           |                 |
| Safety for load coefficient          | [Sc]   | 0.501            |                 |

#### Tooth flank load capacity

Interim results in accordance with VDI2736:

pn1 = 25.202 mm pn2 = 3.382 mm pn = 2.982 mm φ = 70.414 ° θ = 37.488 °  
η = 0.570 ξ = 2.277

|                                         |           |        |
|-----------------------------------------|-----------|--------|
| Normal force (N)                        | [Fn]      | 431.0  |
| Pressure ellipse width (mm)             | [2*ah]    | 5.760  |
| Pressure ellipse height (mm)            | [2*bh]    | 1.442  |
| Contact ratio factor                    | [ZεS]     | 0.800  |
| Elasticity factor (√N/mm²)              | [ZE]      | 0.108  |
| Young's modulus for tooth flank (N/mm²) | [E]       | 2000   |
| Nominal contact stress (N/mm²)          | [σHm0]    | 79.26  |
| Contact stress (N/mm²)                  | [σHm]     | 99.07  |
| Permissible contact stress (N/mm²)      | [σHP]     | 86.711 |
| Required safety                         | [SHmin]   | 1.094  |
| Safety factor for contact stress        | [SH]      | 0.875  |
| Transmittable power (W)                 | [WRating] | 1.839  |

#### Tooth root load capacity

----- Worm ----- Worm wheel ----



## Shearing in tooth root

Calculation formula:  $\tau_F = F_{t2} \cdot K_A / A_{\tau} \cdot Y_{\epsilon}$ 

Interim results in accordance with VDI2736-3:

|                                                             |                      |             |
|-------------------------------------------------------------|----------------------|-------------|
| Minimum gear diameter at the worm tip circle (mm)           | [dx0=d2]             | 19.44       |
| Tooth thickness in the middle of the gear (mm)              | [sda1]               | 2.18        |
| Maximum usable gear width (mm)                              | [bmax]               | 14.74       |
| Shear cross-section (mm <sup>2</sup> )                      | [A <sub>τ</sub> ]    | 28.40       |
| Contact ratio factor                                        | [Y <sub>ε</sub> ]    | 1.00        |
| Nominal circumferential force at operating pitch circle (N) | [F <sub>t</sub> ]    | 395.08      |
| Shear stress (N/mm <sup>2</sup> )                           | [τ <sub>F</sub> ]    | 17.39       |
| Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )                | [τ <sub>Fadm</sub> ] | 54.70       |
| (τ <sub>Fadm</sub> = 0.75 · σ <sub>ZSch</sub> )             |                      |             |
| Safety shearing                                             | [SF <sub>τ</sub> ]   | 3.15 >= 1.3 |

## Measurements for tooth thickness

|                                                             |                  | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |        |
|-------------------------------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------|
|                                                             |                  | DIN 3967 cd25    | DIN 3967 cd25   |        |
| Tooth thickness tolerance                                   |                  |                  |                 |        |
| Tooth thickness allowance (normal section) (mm)             | [As.e/i]         | -0.054 /         | -0.084-0.054 /  | -0.084 |
| Number of teeth spanned                                     | [k]              | 0.000            | 2.000           |        |
| Base tangent length (no backlash) (mm)                      | [Wk]             | 0.000            | 6.366           |        |
| Base tangent length with allowance (mm)                     | [Wk.e/i]         | 0.000 /          | 0.000 6.315 /   | 6.287  |
| (mm)                                                        | [ΔWk.e/i]        | 0.000 /          | 0.000 -0.051 /  | -0.079 |
| Diameter of measuring circle (mm)                           | [dMWk.m]         | 0.000            | 19.286          |        |
| Theoretical diameter of ball/pin (mm)                       | [DM]             | 2.369            | 2.403           |        |
| Effective diameter of ball/pin (mm)                         | [DMeff]          | 2.500            | 2.500           |        |
| Radial single-ball measurement backlash free (mm)           | [MrK]            | 11.814           | 11.549          |        |
| Radial single-ball measurement (mm)                         | [MrK.e/i]        | 11.741 /         | 11.700 11.494 / | 11.462 |
| Diameter of measuring circle (mm)                           | [dMMr.m]         | 0.000            | 19.461          |        |
| Diametral measurement over two balls without clearance (mm) | [MdK]            | 0.000            | 23.099          |        |
| Diametral two ball measure (mm)                             | [MdK.e/i]        | 0.000 /          | 0.000 22.987 /  | 22.924 |
| Diametral measurement over pins without clearance (mm)      | [MdR]            | 23.629           | 23.099          |        |
| Measurement over pins according to DIN 3960 (mm)            | [MdR.e/i]        | 23.481 /         | 23.400 22.987 / | 22.924 |
| Measurement over 3 pins, axial, according to AGMA 2002 (mm) |                  |                  |                 |        |
|                                                             | [dk3A.e/i]       | 23.481 /         | 23.400 22.987 / | 22.924 |
| Dimensions over 3 pins without clearance (mm)               | [Md3R]           | 23.629           | 0.000           |        |
| Measurement over 3 pins with allowance (mm)                 | [Md3R.e/i]       | 23.481 /         | 23.400 0.000 /  | 0.000  |
| Measurement over 3 pins: For ZI worms                       |                  |                  |                 |        |
| Chordal tooth thickness (no backlash) (mm)                  | [sc]             | 2.160            | 2.156           |        |
| Normal chordal tooth thickness with allowance (mm)          | [sc.e/i]         | 2.106 /          | 2.076 2.103 /   | 2.074  |
| Reference chordal height from da.m (mm)                     | [ha]             | 1.371            | 1.429           |        |
| Tooth thickness, arc (mm)                                   | [sn]             | 2.160            | 2.160           |        |
| (mm)                                                        | [sn.e/i]         | 2.106 /          | 2.076 2.106 /   | 2.076  |
| Backlash free center distance (mm)                          | [aControl.e/i]   | 19.450 /         | 19.366          |        |
| Backlash free center distance, allowances (mm)              | [jta]            | -0.150 /         | -0.233          |        |
| Tip clearance (mm)                                          | [c0.i(aControl)] | 0.185            | 0.185           |        |
| Center distance allowances (mm)                             | [Aa.e/i]         | 0.011 /          | -0.011          |        |
| Radial backlash (mm)                                        | [jrw.e/i]        | 0.244 /          | 0.139           |        |
| Circumferential backlash (transverse section) (mm)          | [jtw.e/i]        | 0.177 /          | 0.101           |        |
| Torsional angle on input with output fixed:                 |                  |                  |                 |        |
| Total torsional angle (°)                                   | [j.tSys]         | 7.7977/          | 4.4553          |        |

## Toothling tolerances

----- Worm ----- Worm wheel ----

According to ISO 1328-1:2013, ISO 1328-2:1997

The standard does not specify tolerances for gears with helix angles &gt; 45°..

The calculation can be activated under 'Module specific settings &gt; Extrapolating tolerance values'.

One or several gear data (mn, b, z or d) lay beyond the limits covered by the standard.

Tolerances are calculated following the formulae of the standard.

The values are outside of the range of validity!

|                                  |        |      |      |
|----------------------------------|--------|------|------|
| Accuracy grade                   | [Q]    | A6   | A6   |
| Single pitch deviation (μm)      | [fptT] | 0.00 | 8.00 |
| Base circle pitch deviation (μm) | [fpbT] | 0.00 | 7.40 |



|                                              |          |       |       |
|----------------------------------------------|----------|-------|-------|
| Sector pitch deviation over k/8 pitches (µm) | [Fpk/8T] | 0.00  | 16.00 |
| Profile form deviation (µm)                  | [ffaT]   | 0.00  | 8.00  |
| Profile slope deviation (µm)                 | [fHαT]   | 0.00  | 6.50  |
| Total profile deviation (µm)                 | [FaT]    | 0.00  | 10.00 |
| Helix form deviation (µm)                    | [ffβT]   | 0.00  | 8.50  |
| Helix slope deviation (µm)                   | [fHβT]   | 0.00  | 8.00  |
| Total helix deviation (µm)                   | [FβT]    | 0.00  | 12.00 |
| Total cumulative pitch deviation (µm)        | [FpT]    | 0.00  | 22.00 |
| Adjacent pitch difference (µm)               | [fuT]    | 0.00  | 11.00 |
| Runout (µm)                                  | [FrT]    | 0.00  | 20.00 |
| Single flank composite, total (µm)           | [FisT]   | 0.00  | 30.00 |
| Single flank composite, tooth-to-tooth (µm)  | [fisT]   | 0.00  | 8.00  |
| Radial composite, total (µm)                 | [FidT]   | 19.00 | 19.00 |
| Radial composite, tooth-to-tooth (µm)        | [fidT]   | 6.50  | 6.50  |

FidT (Fi"), fidT (fi") according to ISO 1328:1997 calculated with the geometric mean values for mn and d

#### Supplementary data

|                                                 |        |           |           |
|-------------------------------------------------|--------|-----------|-----------|
| Weight - calculated with da (kg)                | [Mass] | 0.004     | 0.005     |
| Moment of inertia, system referenced to Gear 1: |        |           |           |
| Single gears((da+df)/2...di) (kg*m²)            | [J]    | 1.833e-07 | 2.462e-07 |
| System, (da+df)/2...di (kg*m²)                  | [J]    |           | 1.883e-07 |

Indications for the manufacturing by wire cutting:

|                                             |           |      |
|---------------------------------------------|-----------|------|
| Deviation from theoretical tooth trace (µm) | [WireErr] | 73.7 |
| Permissible deviation (µm)                  | [Fb/2]    | 6.0  |

#### Calculating the tooth form

Data for the tooth form calculation :

Data not available.

Please run the calculation in the "Tooth form" tab and open the main report again.

#### Service life, damage

|                                 |         |      |
|---------------------------------|---------|------|
| Required safety for tooth root  | [SFmin] | 1.35 |
| Required safety for tooth flank | [SHmin] | 1.09 |
| Required safety for wear        | [SWmin] | 1.10 |

Service life (calculated with required safeties):

|                              |         |       |
|------------------------------|---------|-------|
| System service life (h)      | [Hatt]  | 0.000 |
| Tooth root service life (h)  | [HFatt] | 0     |
| Tooth flank service life (h) | [HHatt] | 0     |
| Wear service life (h)        | [HWatt] | 1e+06 |

Damage calculated on the basis of the required service life[H] ( 0.1 h)

|         |           |           |           |        |        |
|---------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|
| F1%     | F2%       | H1%       | H2%       | W1%    | W2%    |
| 9999.99 | 9999.9900 | 9999.9900 | 9999.9900 | 0.0000 | 0.0000 |

Damage calculated on basis of system service life [Hatt] (0.0 h)

|        |          |          |          |        |        |
|--------|----------|----------|----------|--------|--------|
| F1%    | F2%      | H1%      | H2%      | W1%    | W2%    |
| 100.00 | 100.0000 | 100.0000 | 100.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

#### Remarks:

- Specifications with [e/i] imply: Maximum [e] and minimum value [i] for taking all tolerances into account

The value entered for the circumferential backlash, and the center distance without backlash, used to verify the tooth thickness has not yet been investigated exactly.

It is only to be used as an indication.

>

- The tooth form factor YF is calculated according to ISO 6336:1996 using Method C (Application of force at tip)

- The active root diameter is calculated as specified by Pech.



---

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| End of Report | lines: | 392 |
|---------------|--------|-----|

---

## **Anexo C: Relatórios obtidos com o *software* KISSsoft**

### **C.2: Nova solução considerando o material PA 66**



|                                                     |       |                |              |
|-----------------------------------------------------|-------|----------------|--------------|
| KISSsoft Release 2020 A.1                           |       |                |              |
| KISSsoft University license - Universidade do Porto |       |                |              |
| File                                                |       |                |              |
| Name :                                              | Worm  |                |              |
| Changed by:                                         | danie | on: 04.01.2022 | at: 16:26:47 |

**Important hint: At least one warning has occurred during the calculation:**

1-> The active tip diameter  $d_{Na}$  is deduced from the root form diameter  $d_{Ff}$  of the mating gear.  
The calculation is only approximative.

2-> The specified gear pair data does not comply with the limitations of the calculation method!

The use of VDI 2736 is subject to the following restrictions:

- Steel/plastic combination
- Number of teeth  $z_1 < 6$
- Normal module  $\geq 0.30$  mm
- Shaft angle =  $90^\circ$

3-> Gear 1: Flank fatigue data is only available for dry material.

4-> Gear 2: Flank fatigue data is only available for dry material.

5-> Gear 1: Root fatigue data is only available for dry material.

6-> Gear 2: Root fatigue data is only available for dry material.

7-> Gear 1:

Values for tooth flank strength  $\sigma_{Hlim}$  (Dry) are not available in VDI2736. Values were taken from the VDI2545.

8-> Gear 2:

Values for tooth flank strength  $\sigma_{Hlim}$  (Dry) are not available in VDI2736. Values were taken from the VDI2545.

9-> The calculated safety factors for the tooth root and/or flank are considerably lower than the required safeties!

(Required safeties are defined in the 'Required safeties' tab in the 'Module specific settings'.)

### Worm Analysis (Precision mechanics)

Calculation method: Plastic according to VDI 2736:2013 (YF Method C)

Drawing or article number:

Gear 1: 0.000.0

Gear 2: 0.000.0

|                               | ----- Worm ----- | Worm wheel ----   |
|-------------------------------|------------------|-------------------|
| Power (W)                     | [P]              | 12.037            |
| Power (W)                     | [P]              | 22.206 12.037     |
| Speed (1/min)                 | [n]              | 180.0 25.7        |
| Torque (Nmm)                  | [T]              | 1178.079 4470.000 |
| Application factor            | [KA]             | 1.25              |
| Required service life         | [H]              | 0.09              |
| Gear driving (+) / driven (-) |                  | + -               |

### **Tooth geometry and material**

|                                              | ----- Worm -----         | Worm wheel ---- |
|----------------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Center distance (mm)                         | [a]                      | 22.235          |
| Center distance tolerance                    | ISO 286:2010 Measure js7 |                 |
| Axial crossing angle ( $^\circ$ )            | [Σ]                      | 90.0000         |
| Normal module (mm)                           | [mn]                     | 1.5000          |
| Normal module at operating pitch circle (mm) | [msn]                    | 1.5000          |
| Helix angle at reference circle ( $^\circ$ ) | [β]                      | 82.6000 7.4000  |
| Hand of gear                                 | [L/Rβ1]                  | right           |



|                                           |                   |         |         |
|-------------------------------------------|-------------------|---------|---------|
| Hand of gear                              | [L/Rβ2]           |         | right   |
| Normal pressure angle (°)                 | [αn]              | 20.0000 |         |
| Lead angle at reference diameter (°)      | [γ]               | 7.4000  | 82.6000 |
| Helix angle at operating pitch circle (°) | [βs]              | 82.6000 | 7.4000  |
| Number of teeth                           | [z]               | 2       | 14      |
| Shape of flank:                           | ZI                |         |         |
| Facewidth (mm)                            | [b]               | 13.05   | 17.00   |
| Facewidth for calculation (mm)            | [beH]             | 7.57    | 7.57    |
| Accuracy grade                            | [Q-ISO 1328:2013] | A6      | A6      |
| Inner diameter (mm)                       | [di]              | 0.00    | 0.00    |
| Inner diameter of gear rim (mm)           | [dbi]             | 0.00    | 0.00    |

## Material

## Worm

PA66 (VDI2736), Thermoplastic PA, untreated  
VDI2736/VDI2545 [S B F Wd C]

Woehler line tooth root stress from file

Z014-PA66\_VDI2736.DAT

S-N curve (Woehler line) Hertzian pressure from file Z014-PA66\_VDI2736.DAT

## Gear2

PA66 (VDI2736), Thermoplastic PA, untreated  
VDI2736/VDI2545 [S B F Wd C]

Woehler line tooth root stress from file

Z014-PA66\_VDI2736.DAT

S-N curve (Woehler line) Hertzian pressure from file Z014-PA66\_VDI2736.DAT

|                                        |                       |                 |
|----------------------------------------|-----------------------|-----------------|
|                                        | ----- Worm -----      | Worm wheel ---- |
| Tooth root temperature (°C)            | [TR]                  | 25.0 25.0       |
| Flank temperature (°C)                 | [TF]                  | 25.0 25.0       |
| Pulsating shear strength at NL (N/mm²) | [rFadm]               | 47.00 51.20     |
| Strength against Hertzian pressure     | at NL (N/mm²)[σHlimN] | 69.30 69.30     |
| Tensile strength (N/mm²)               | [σB]                  | 38.24 38.24     |
| Yield point (N/mm²)                    | [σS]                  | 35.47 35.47     |
| Young's modulus (N/mm²)                | [E]                   | 2000 2000       |
| Poisson's ratio                        | [ν]                   | 0.400 0.400     |
| Roughness average value DS, flank (μm) | [RAH]                 | 0.00 0.00       |
| Roughness average value DS, root (μm)  | [RAF]                 | 0.00 0.00       |
| Mean roughness height, Rz, flank (μm)  | [RZH]                 | 0.00 0.00       |
| Mean roughness height, Rz, root (μm)   | [RZF]                 | 0.00 0.00       |

## Gear reference profile

1:

|                                 |                                |                       |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Reference profile               | 1.25 / 0.30 / 1.0 DIN 867:1986 |                       |
| Dedendum coefficient            | [hfP*]                         | 1.250                 |
| Root radius factor              | [pfP*]                         | 0.300 (pfPmax*=0.472) |
| Addendum coefficient            | [haP*]                         | 1.000                 |
| Tip radius factor               | [paP*]                         | 0.000                 |
| Protuberance height coefficient | [hprP*]                        | 0.000                 |
| Protuberance angle              | [αprP]                         | 0.000                 |
| Tip form height coefficient     | [hFaP*]                        | 0.000                 |
| Ramp angle                      | [αkP]                          | 0.000                 |
|                                 | not topping                    |                       |

## Gear reference profile

2:

|                                 |                                |                       |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Reference profile               | 1.25 / 0.30 / 1.0 DIN 867:1986 |                       |
| Dedendum coefficient            | [hfP*]                         | 1.250                 |
| Root radius factor              | [pfP*]                         | 0.300 (pfPmax*=0.472) |
| Addendum coefficient            | [haP*]                         | 1.000                 |
| Tip radius factor               | [paP*]                         | 0.000                 |
| Protuberance height coefficient | [hprP*]                        | 0.000                 |
| Protuberance angle              | [αprP]                         | 0.000                 |
| Tip form height coefficient     | [hFaP*]                        | 0.000                 |
| Ramp angle                      | [αkP]                          | 0.000                 |
|                                 | not topping                    |                       |



## Information on final machining

|                                  |                        |       |                  |
|----------------------------------|------------------------|-------|------------------|
| Dedendum reference profile       | [hfP*]                 | 1.250 | 1.250            |
| Tooth root radius Refer. profile | [pfP*]                 | 0.300 | 0.300            |
| Addendum Reference profile       | [haP*]                 | 1.000 | 1.000            |
| Protuberance height coefficient  | [hprP*]                | 0.000 | 0.000            |
| Protuberance angle (°)           | [aprp]                 | 0.000 | 0.000            |
| Tip form height coefficient      | [hFaP*]                | 0.000 | 0.000            |
| Ramp angle (°)                   | [αKP]                  | 0.000 | 0.000            |
| Type of profile modification:    | none (only running-in) |       |                  |
| Tip relief by running in (μm)    | [Ca L/R]               | 19.4  | /19.4 19.4 /19.4 |

|                                                             |                  |                  |                  |
|-------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Lubrication type                                            | Dry-running      |                  |                  |
| Ambient temperature (°C)                                    | [TU]             | 23.000           |                  |
|                                                             |                  | ----- Worm ----- | Worm wheel ----- |
| Overall transmission ratio                                  | [itot]           | -7.000           |                  |
| Gear ratio                                                  | [u]              | 7.000            |                  |
| Transverse module (mm)                                      | [mt]             | 11.6464          | 1.5126           |
| Axial module (mm)                                           | [mx]             | 1.5126           | 11.6463          |
| Normal pressure angle at the operating pitch circle (°)     | [asn]            | 20.000           | 20.000           |
| Transverse pressure angle at the operating pitch circle (°) |                  |                  |                  |
|                                                             | [ast]            | 70.513           | 20.154           |
| Axial pressure angle at the operating pitch circle (°)      | [asx]            | 20.155           | 70.513           |
| Transverse pressure angle (°)                               | [at]             | 70.513           | 20.155           |
| Axial pressure angle (°)                                    | [ax]             | 20.155           | 70.513           |
| Base helix angle (°)                                        | [βb]             | 68.728           | 6.951            |
| Diametral factor q                                          | [q]              | 15.399           |                  |
| Reference center distance (mm)                              | [ad]             | 22.235           |                  |
| Sum of profile shift coefficients                           | [Σxi]            | -0.0000          |                  |
| Profile shift coefficient                                   | [x]              | -0.0000          | -0.0000          |
| Tip alteration (mm)                                         | [k*mn]           | 0.000            | 0.000            |
| Reference diameter (mm)                                     | [d]              | 23.293           | 21.176           |
| Base diameter (mm)                                          | [db]             | 7.770            | 19.880           |
| Tip diameter (mm)                                           | [da]             | 26.293           | 24.176           |
| (mm)                                                        | [da.e/i]         | 26.293 /         | 26.272 24.176 /  |
| Tip diameter allowances (mm)                                | [Ada.e/i]        | 0.000 /          | -0.021 0.000 /   |
| Tip form diameter (mm)                                      | [dFa.e/i]        | 26.293 /         | 26.272 24.176 /  |
| Active tip diameter (mm)                                    | [dNa]            | 25.807           | 24.176           |
| Active tip diameter (mm)                                    | [dNa.e/i]        | 25.807 /         | 25.807 24.176 /  |
| Operating pitch circle diameter (mm)                        | [ds]             | 23.293           | 21.176           |
| Root diameter (mm)                                          | [df]             | 19.543           | 17.426           |
| Generating Profile shift coefficient                        | [x.e/i]          | -0.0495/         | -0.0769 -0.0495/ |
| Generated root diameter with xE (mm)                        | [df.e/i]         | 19.394 /         | 19.312 17.278 /  |
| Theoretical tip clearance (mm)                              | [c]              | 0.375            | 0.375            |
| Effective tip clearance (mm)                                | [c.e/i]          | 0.511 /          | 0.439 0.511 /    |
| Active root diameter (mm)                                   | [dNf]            | 21.081           | 19.925           |
| Root form diameter (mm)                                     | [dFf]            | 20.166           | 19.880           |
| (mm)                                                        | [dFf.e/i]        | 20.021 /         | 19.940 19.880 /  |
| Involute length (mm)                                        | [l_dFa-l_dFf]    | 9.158            | 2.380            |
| Addendum, mn*(haP*+x+k) (mm)                                | [ha]             | 1.500            | 1.500            |
| (mm)                                                        | [ha.e/i]         | 1.500 /          | 1.489 1.500 /    |
| Dedendum (mm)                                               | [hf=mn*(hfP*-x)] | 1.875            | 1.875            |
| (mm)                                                        | [hf.e/i]         | 1.949 /          | 1.990 1.949 /    |
| Roll angle at dFa (°)                                       | [xsi_dFa.e/i]    | 185.215 /        | 185.053 39.653 / |
| Roll angle to dNa (°)                                       | [xsi_dNa.e/i]    | 181.460 /        | 181.460 39.653 / |
| Roll angle at dFf (°)                                       | [xsi_dFf.e/i]    | 136.055 /        | 135.410 0.057 /  |
| Tooth height (mm)                                           | [h]              | 3.375            | 3.375            |
| Normal tooth thickness at tip circle (mm)                   | [san]            | 1.259            | 0.975            |
| (mm)                                                        | [san.e/i]        | 1.212 /          | 1.175 0.927 /    |
| Normal space width at root circle (mm)                      | [efn]            | 1.004            | 0.000            |
| (mm)                                                        | [efn.e/i]        | 1.006 /          | 1.006 0.000 /    |
| Lead height (mm)                                            | [pz]             | 9.504            | 512.232          |
| Axial pitch (mm)                                            | [px]             | 4.752            | 36.588           |
| Normal pitch, base circle (mm)                              | [pbn, pen]       |                  | 4.428            |
| Normal pitch, reference circle (mm)                         | [pn]             |                  | 4.712            |
| Normal pitch, operating pitch circle (mm)                   | [psn]            |                  | 4.712            |
| Length of path of contact (mm)                              | [gan]            |                  | 6.908            |



|                                     |          |         |       |
|-------------------------------------|----------|---------|-------|
| Length A-S (mm)                     | [AS]     | 3.653   |       |
| Length S-E (mm)                     | [SE]     | 3.255   |       |
| Transverse contact ratio            | [εα]     | 0.205   | 1.537 |
| Overlap ratio                       | [εβ]     | 1.355   | 0.023 |
| Total contact ratio                 | [εγ]     | 1.560   |       |
| Total contact ratio with allowances | [εγ.e/i] | 1.567 / | 1.542 |

#### General influence factors

|                                                               |         | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |
|---------------------------------------------------------------|---------|------------------|-----------------|
| Nominal circumferential force at operating pitch circle (N)   | [Ft]    | 101.15           | 422.17          |
| Axial force (N)                                               | [Fa]    | -422.17          | -101.15         |
| Radial force (N)                                              | [Fr]    | 157.12           | -157.12         |
| Normal force (N)                                              | [Fnorm] | 459.4            |                 |
| (calculation with normal force, taking friction into account) |         |                  |                 |
| Pressure ellipse width (mm)                                   | [2*a]   | 6.245            |                 |
| Pressure ellipse height (mm)                                  | [2*b]   | 1.494            |                 |
| Surface of the pressure ellipse (mm²)                         | [π*a*b] | 10.445           |                 |
| Mean tooth friction number                                    | [muzm]  | 0.100            |                 |
| Tooth friction angle (°)                                      | [roz]   | 6.074            |                 |
| Meshing efficiency (%)                                        | [ηz]    | 54.204           |                 |
| Circumferential speed reference circle (m/s)                  | [v]     | 0.22             | 0.03            |
| Sliding velocity at operating pitch circle (m/s)              | [vgs]   | 0.22             |                 |
| Max. sliding velocity at tip (m/s)                            | [vgg]   | 0.25             | 0.24            |
| Mean sliding velocity (m/s)                                   | [vgm]   | 0.23             |                 |
| Bearing loss-power (W)                                        | [PVLP]  | 0.000            |                 |
| Sealing power loss (W)                                        | [PVD]   | 0.000            |                 |
| Idle power loss (W)                                           | [PV0]   | 0.000            |                 |
| Meshing power loss (W)                                        | [PVZ]   | 10.169           |                 |
| Total power loss (W)                                          | [PV]    | 10.169           |                 |
| Total efficiency (%)                                          | [ηGes]  | 54.204           |                 |
| Number of load cycles (in mio.)                               | [NL]    | 0.001            | 0.000           |

#### Draft calculation

|                                      |        | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |
|--------------------------------------|--------|------------------|-----------------|
| Coefficient for number of teeth      | [Kz]   | 0.46             |                 |
| Load-bearing face width worm (mm)    | [bm]   | 12.20            |                 |
| Load coefficient (N/mm²)             | [C]    | 19.950           |                 |
| Permissible load coefficient (N/mm²) | [Clim] | 11.037           |                 |
| Safety for load coefficient          | [Sc]   | 0.553            |                 |

#### Tooth flank load capacity

Interim results in accordance with VDI2736:

pn1 = 30.262 mm    pn2 = 3.675 mm    pn = 3.277 mm    φ = 71.750 °    θ = 36.174 °  
 η = 0.560    ξ = 2.342

|                                         |           |        |      |
|-----------------------------------------|-----------|--------|------|
| Normal force (N)                        | [Fn]      | 459.4  |      |
| Pressure ellipse width (mm)             | [2*ah]    | 6.245  |      |
| Pressure ellipse height (mm)            | [2*bh]    | 1.494  |      |
| Contact ratio factor                    | [ZεS]     | 0.801  |      |
| Elasticity factor (√N/mm²)              | [ZE]      | 0.108  |      |
| Young's modulus for tooth flank (N/mm²) | [E]       | 2000   | 2000 |
| Nominal contact stress (N/mm²)          | [σHm0]    | 75.28  |      |
| Contact stress (N/mm²)                  | [σHm]     | 94.10  |      |
| Permissible contact stress (N/mm²)      | [σHP]     | 84.308 |      |
| Required safety                         | [SHmin]   | 1.125  |      |
| Safety factor for contact stress        | [SH]      | 0.896  |      |
| Transmittable power (W)                 | [WRating] | 9.586  |      |

#### Tooth root load capacity

----- Worm ----- Worm wheel ----



## Shearing in tooth root

Calculation formula:  $\tau_F = F_{t2} \cdot K_A / A_{\tau} \cdot Y_{\epsilon}$ 

Interim results in accordance with VDI2736-3:

|                                                   |                   |       |
|---------------------------------------------------|-------------------|-------|
| Minimum gear diameter at the worm tip circle (mm) | [dx0=d2]          | 21.18 |
| Tooth thickness in the middle of the gear (mm)    | [sda1]            | 2.38  |
| Maximum usable gear width (mm)                    | [bmax]            | 16.72 |
| Shear cross-section (mm <sup>2</sup> )            | [A <sub>τ</sub> ] | 35.07 |
| Contact ratio factor                              | [Y <sub>ε</sub> ] | 1.00  |

|                                                             |                      |             |
|-------------------------------------------------------------|----------------------|-------------|
| Nominal circumferential force at operating pitch circle (N) | [F <sub>t</sub> ]    | 422.17      |
| Shear stress (N/mm <sup>2</sup> )                           | [τ <sub>F</sub> ]    | 15.05       |
| Admissible shear stress (N/mm <sup>2</sup> )                | [τ <sub>Fadm</sub> ] | 51.20       |
| (τ <sub>Fadm</sub> = 0.75 · σ <sub>ZSch</sub> )             |                      |             |
| Safety shearing                                             | [SF <sub>τ</sub> ]   | 3.40 >= 1.3 |

## Measurements for tooth thickness

|                                                             |                  | ----- Worm ----- |                 | Worm wheel ---- |        |
|-------------------------------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------|
|                                                             |                  | DIN 3967 cd25    |                 | DIN 3967 cd25   |        |
| Tooth thickness tolerance                                   |                  |                  |                 |                 |        |
| Tooth thickness allowance (normal section) (mm)             | [As.e/i]         | -0.054 /         |                 | -0.084-0.054 /  | -0.084 |
| Number of teeth spanned                                     | [k]              | 0.000            | 2.000           |                 |        |
| Base tangent length (no backlash) (mm)                      | [Wk]             | 0.000            | 6.944           |                 |        |
| Base tangent length with allowance (mm)                     | [Wk.e/i]         | 0.000 /          | 0.000 6.893 /   |                 | 6.865  |
| (mm)                                                        | [ΔWk.e/i]        | 0.000 /          | 0.000 -0.051 /  |                 | -0.079 |
| Diameter of measuring circle (mm)                           | [dMWk.m]         | 0.000            | 21.020          |                 |        |
| Theoretical diameter of ball/pin (mm)                       | [DM]             | 2.578            | 2.622           |                 |        |
| Effective diameter of ball/pin (mm)                         | [DMeff]          | 2.750            | 2.750           |                 |        |
| Radial single-ball measurement backlash free (mm)           | [MrK]            | 13.802           | 12.620          |                 |        |
| Radial single-ball measurement (mm)                         | [MrK.e/i]        | 13.728 /         | 13.687 12.565 / |                 | 12.534 |
| Diameter of measuring circle (mm)                           | [dMMr.m]         | 0.000            | 21.241          |                 |        |
| Diametral measurement over two balls without clearance (mm) | [MdK]            | 0.000            | 25.240          |                 |        |
| Diametral two ball measure (mm)                             | [MdK.e/i]        | 0.000 /          | 0.000 25.130 /  |                 | 25.067 |
| Diametral measurement over pins without clearance (mm)      | [MdR]            | 27.603           | 25.240          |                 |        |
| Measurement over pins according to DIN 3960 (mm)            | [MdR.e/i]        | 27.456 /         | 27.374 25.130 / |                 | 25.067 |
| Measurement over 3 pins, axial, according to AGMA 2002 (mm) |                  |                  |                 |                 |        |
|                                                             | [dk3A.e/i]       | 27.456 /         | 27.374 25.130 / |                 | 25.067 |
| Dimensions over 3 pins without clearance (mm)               | [Md3R]           | 27.603           | 0.000           |                 |        |
| Measurement over 3 pins with allowance (mm)                 | [Md3R.e/i]       | 27.456 /         | 27.374 0.000 /  |                 | 0.000  |
| Measurement over 3 pins: For ZI worms                       |                  |                  |                 |                 |        |
| Chordal tooth thickness (no backlash) (mm)                  | [sc]             | 2.356            | 2.351           |                 |        |
| Normal chordal tooth thickness with allowance (mm)          | [sc.e/i]         | 2.302 /          | 2.272 2.299 /   |                 | 2.270  |
| Reference chordal height from da.m (mm)                     | [ha]             | 1.496            | 1.559           |                 |        |
| Tooth thickness, arc (mm)                                   | [sn]             | 2.356            | 2.356           |                 |        |
| (mm)                                                        | [sn.e/i]         | 2.302 /          | 2.272 2.302 /   |                 | 2.272  |
| Backlash free center distance (mm)                          | [aControl.e/i]   | 22.085 /         | 22.002          |                 |        |
| Backlash free center distance, allowances (mm)              | [jta]            | -0.150 /         | -0.233          |                 |        |
| Tip clearance (mm)                                          | [c0.i(aControl)] | 0.216            | 0.216           |                 |        |
| Center distance allowances (mm)                             | [Aa.e/i]         | 0.011 /          | -0.011          |                 |        |
| Radial backlash (mm)                                        | [jrw.e/i]        | 0.243 /          | 0.139           |                 |        |
| Circumferential backlash (transverse section) (mm)          | [jtw.e/i]        | 0.177 /          | 0.101           |                 |        |
| Torsional angle on input with output fixed:                 |                  |                  |                 |                 |        |
| Total torsional angle (°)                                   | [j.tSys]         | 7.1467/          | 4.0834          |                 |        |

## Tooth tolerances

----- Worm ----- Worm wheel -----

According to ISO 1328-1:2013, ISO 1328-2:1997

The standard does not specify tolerances for gears with helix angles > 45°..

The calculation can be activated under 'Module specific settings > Extrapolating tolerance values'.

One or several gear data (mn, b, z or d) lay beyond the limits covered by the standard.

Tolerances are calculated following the formulae of the standard.

The values are outside of the range of validity!

|                                  |        |      |      |
|----------------------------------|--------|------|------|
| Accuracy grade                   | [Q]    | A6   | A6   |
| Single pitch deviation (µm)      | [fptT] | 0.00 | 8.00 |
| Base circle pitch deviation (µm) | [fpbT] | 0.00 | 7.50 |



|                                              |          |       |       |
|----------------------------------------------|----------|-------|-------|
| Sector pitch deviation over k/8 pitches (µm) | [Fpk/8T] | 0.00  | 16.00 |
| Profile form deviation (µm)                  | [ffaT]   | 0.00  | 8.00  |
| Profile slope deviation (µm)                 | [fHaT]   | 0.00  | 6.50  |
| Total profile deviation (µm)                 | [FaT]    | 0.00  | 11.00 |
| Helix form deviation (µm)                    | [ffβT]   | 0.00  | 8.50  |
| Helix slope deviation (µm)                   | [fHβT]   | 0.00  | 8.00  |
| Total helix deviation (µm)                   | [FβT]    | 0.00  | 12.00 |
| Total cumulative pitch deviation (µm)        | [FpT]    | 0.00  | 22.00 |
| Adjacent pitch difference (µm)               | [fuT]    | 0.00  | 11.00 |
| Runout (µm)                                  | [FrT]    | 0.00  | 20.00 |
| Single flank composite, total (µm)           | [FisT]   | 0.00  | 30.00 |
| Single flank composite, tooth-to-tooth (µm)  | [fisT]   | 0.00  | 8.00  |
| Radial composite, total (µm)                 | [FidT]   | 23.00 | 23.00 |
| Radial composite, tooth-to-tooth (µm)        | [fidT]   | 6.50  | 6.50  |

FidT (Fi"), fidT (fi") according to ISO 1328:1997 calculated with the geometric mean values for mn and d

#### Supplementary data

|                                                                                          |        |           |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|-----------|
| Weight - calculated with da (kg)                                                         | [Mass] | 0.006     | 0.006     |
| Moment of inertia, system referenced to Gear 1:<br>Single gears ((da+df)/2...di) (kg*m²) | [J]    | 3.924e-07 | 3.464e-07 |
| System, (da+df)/2...di (kg*m²)                                                           | [J]    | 3.995e-07 |           |

Indications for the manufacturing by wire cutting:

|                                             |           |      |
|---------------------------------------------|-----------|------|
| Deviation from theoretical tooth trace (µm) | [WireErr] | 57.5 |
| Permissible deviation (µm)                  | [Fb/2]    | 6.0  |

#### Calculating the tooth form

Data for the tooth form calculation :

Data not available.

Please run the calculation in the "Tooth form" tab and open the main report again.

#### Service life, damage

|                                 |         |      |
|---------------------------------|---------|------|
| Required safety for tooth root  | [SFmin] | 1.40 |
| Required safety for tooth flank | [SHmin] | 1.13 |
| Required safety for wear        | [SWmin] | 1.10 |

Service life (calculated with required safeties):

|                              |         |       |
|------------------------------|---------|-------|
| System service life (h)      | [Hatt]  | 0.000 |
| Tooth root service life (h)  | [HFatt] | 0     |
| Tooth flank service life (h) | [HHatt] | 0     |
| Wear service life (h)        | [HWatt] | 1e+06 |

Damage calculated on the basis of the required service life[H] ( 0.1 h)

|         |           |           |           |        |        |
|---------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|
| F1%     | F2%       | H1%       | H2%       | W1%    | W2%    |
| 9999.99 | 9999.9900 | 9999.9900 | 9999.9900 | 0.0000 | 0.0000 |

Damage calculated on basis of system service life [Hatt] (0.0 h)

|        |          |          |          |        |        |
|--------|----------|----------|----------|--------|--------|
| F1%    | F2%      | H1%      | H2%      | W1%    | W2%    |
| 100.00 | 100.0000 | 100.0000 | 100.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

Remarks:

- Specifications with [e/i] imply: Maximum [e] and minimum value [i] for taking all tolerances into account

The value entered for the circumferential backlash, and the center distance without backlash, used to verify the tooth thickness has not yet been investigated exactly.

It is only to be used as an indication.

>

- The tooth form factor YF is calculated according to ISO 6336:1996 using Method C (Application of force at tip)

- The active root diameter is calculated as specified by Pech.



---

End of Report

lines: 392

---

## **Anexo C: Relatórios obtidos com o *software* KISSsoft**

### **C.3: Nova solução considerando o material PA 66 + 30 GF + 15 PTFE**

|                                                     |                                   |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| KISSsoft Release 2020 A.1                           |                                   |
| KISSsoft University license - Universidade do Porto |                                   |
| File                                                |                                   |
| Name :                                              | Worm                              |
| Changed by:                                         | danie on: 07.01.2022 at: 19:02:59 |

**Important hint: At least one warning has occurred during the calculation:**

1-> The active tip diameter  $d_{Na}$  is deduced from the root form diameter  $d_{Ff}$  of the mating gear.  
The calculation is only approximative.

2-> The specified gear pair data does not comply with the limitations of the calculation method!

The use of VDI 2736 is subject to the following restrictions:

- Steel/plastic combination
- Number of teeth  $z_1 < 6$
- Normal module  $\geq 0.30$  mm
- Shaft angle =  $90^\circ$

3-> Gear 1:

Data for the definition of the material value Tooth root [ $\tau_{Fadm}$ ]:  
No data available at temperature 25 °C  
(or data does not exist).

4-> Material: LUBRICOMP RFL-4036/RFL36

Data for the tooth root endurance limit calculation are  
not available for this material (in file: Z014-SABIC\_RFL36.DAT).

Note:

Data for a static calculation are available.  
You can therefore carry out the 'Static Calculation'.

5-> Gear 2:

Data for the definition of the material value Tooth root [ $\tau_{Fadm}$ ]:  
No data available at temperature 25 °C  
(or data does not exist).

**Worm Analysis (Precision mechanics)**

Calculation method: Plastic according to VDI 2736:2013 (YF Method C)

Drawing or article number:

Gear 1: 0.000.0  
Gear 2: 0.000.0

|                               | ----- Worm ----- | Worm wheel ----   |
|-------------------------------|------------------|-------------------|
| Power (W)                     | [P]              | 12.037            |
| Power (W)                     | [P]              | 22.206 12.037     |
| Speed (1/min)                 | [n]              | 180.0 25.7        |
| Torque (Nmm)                  | [T]              | 1178.079 4470.000 |
| Application factor            | [KA]             | 1.25              |
| Required service life         | [H]              | 0.09              |
| Gear driving (+) / driven (-) |                  | + -               |

**Tooth geometry and material**

|                                              | ----- Worm -----         | Worm wheel ---- |
|----------------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Center distance (mm)                         | [a]                      | 22.235          |
| Center distance tolerance                    | ISO 286:2010 Measure js7 |                 |
| Axial crossing angle (°)                     | [Σ]                      | 90.0000         |
| Normal module (mm)                           | [mn]                     | 1.5000          |
| Normal module at operating pitch circle (mm) | [msn]                    | 1.5000          |
| Helix angle at reference circle (°)          | [β]                      | 82.6000 7.4000  |
| Hand of gear                                 | [L/Rβ1]                  | right           |



|                                           |                   |         |         |
|-------------------------------------------|-------------------|---------|---------|
| Hand of gear                              | [L/Rβ2]           |         | right   |
| Normal pressure angle (°)                 | [αn]              | 20.0000 |         |
| Lead angle at reference diameter (°)      | [γ]               | 7.4000  | 82.6000 |
| Helix angle at operating pitch circle (°) | [βs]              | 82.6000 | 7.4000  |
| Number of teeth                           | [z]               | 2       | 14      |
| Shape of flank:                           | [Z]               |         |         |
| Facewidth (mm)                            | [b]               | 13.05   | 17.00   |
| Facewidth for calculation (mm)            | [beH]             | 5.60    | 5.60    |
| Accuracy grade                            | [Q-ISO 1328:2013] | A6      | A6      |
| Inner diameter (mm)                       | [di]              | 0.00    | 0.00    |
| Inner diameter of gear rim (mm)           | [dbi]             | 0.00    | 0.00    |

## Material

## Worm

LUBRICOMP RFL-4036/RFL36, Thermoplastic PA, fiber reinforced  
[S B Wd] PA66, GF, PTFE, by SABIC Innovative Plastic

## Gear2

LUBRICOMP RFL-4036/RFL36, Thermoplastic PA, fiber reinforced  
[S B Wd] PA66, GF, PTFE, by SABIC Innovative Plastic

|                                        |       | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |
|----------------------------------------|-------|------------------|-----------------|
| Tooth root temperature (°C)            | [TR]  | 25.0             | 25.0            |
| Flank temperature (°C)                 | [TF]  | 25.0             | 25.0            |
| Tensile strength (N/mm²)               | [σB]  | 74.08            | 74.08           |
| Yield point (N/mm²)                    | [σS]  | 62.25            | 62.25           |
| Young's modulus (N/mm²)                | [E]   | 4679             | 4679            |
| Poisson's ratio                        | [ν]   | 0.450            | 0.450           |
| Roughness average value DS, flank (μm) | [RAH] | 0.00             | 0.00            |
| Roughness average value DS, root (μm)  | [RAF] | 0.00             | 0.00            |
| Mean roughness height, Rz, flank (μm)  | [RZH] | 0.00             | 0.00            |
| Mean roughness height, Rz, root (μm)   | [RZF] | 0.00             | 0.00            |

## Gear reference profile

1:

|                                 |                                |                       |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Reference profile               | 1.25 / 0.30 / 1.0 DIN 867:1986 |                       |
| Dedendum coefficient            | [hfP*]                         | 1.250                 |
| Root radius factor              | [pfP*]                         | 0.300 (pfPmax*=0.472) |
| Addendum coefficient            | [haP*]                         | 1.000                 |
| Tip radius factor               | [paP*]                         | 0.000                 |
| Protuberance height coefficient | [hprP*]                        | 0.000                 |
| Protuberance angle              | [αprP]                         | 0.000                 |
| Tip form height coefficient     | [hFaP*]                        | 0.000                 |
| Ramp angle                      | [αKP]                          | 0.000                 |
|                                 | not topping                    |                       |

## Gear reference profile

2:

|                                 |                                |                       |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Reference profile               | 1.25 / 0.30 / 1.0 DIN 867:1986 |                       |
| Dedendum coefficient            | [hfP*]                         | 1.250                 |
| Root radius factor              | [pfP*]                         | 0.300 (pfPmax*=0.472) |
| Addendum coefficient            | [haP*]                         | 1.000                 |
| Tip radius factor               | [paP*]                         | 0.000                 |
| Protuberance height coefficient | [hprP*]                        | 0.000                 |
| Protuberance angle              | [αprP]                         | 0.000                 |
| Tip form height coefficient     | [hFaP*]                        | 0.000                 |
| Ramp angle                      | [αKP]                          | 0.000                 |
|                                 | not topping                    |                       |

## Information on final machining

|                                  |         |       |       |
|----------------------------------|---------|-------|-------|
| Dedendum reference profile       | [hfP*]  | 1.250 | 1.250 |
| Tooth root radius Refer. profile | [pfP*]  | 0.300 | 0.300 |
| Addendum Reference profile       | [haP*]  | 1.000 | 1.000 |
| Protuberance height coefficient  | [hprP*] | 0.000 | 0.000 |
| Protuberance angle (°)           | [αprP]  | 0.000 | 0.000 |
| Tip form height coefficient      | [hFaP*] | 0.000 | 0.000 |



|                                                             |                        |                                  |         |          |         |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------|---------|----------|---------|
| Ramp angle (°)                                              | [αKP]                  | 0.000                            | 0.000   |          |         |
| Type of profile modification:                               | none (only running-in) |                                  |         |          |         |
| Tip relief by running in (μm)                               | [Ca L/R]               | 20.4                             | /20.4   | 20.4     | /20.4   |
| Lubrication type                                            | Dry-running            |                                  |         |          |         |
| Ambient temperature (°C)                                    | [TU]                   | 23.000                           |         |          |         |
|                                                             |                        | ----- Worm ----- Worm wheel ---- |         |          |         |
| Overall transmission ratio                                  | [itot]                 | -7.000                           |         |          |         |
| Gear ratio                                                  | [u]                    | 7.000                            |         |          |         |
| Transverse module (mm)                                      | [mt]                   | 11.6464                          | 1.5126  |          |         |
| Axial module (mm)                                           | [mx]                   | 1.5126                           | 11.6463 |          |         |
| Normal pressure angle at the operating pitch circle (°)     | [αsn]                  | 20.000                           | 20.000  |          |         |
| Transverse pressure angle at the operating pitch circle (°) |                        |                                  |         |          |         |
|                                                             | [αst]                  | 70.513                           | 20.154  |          |         |
| Axial pressure angle at the operating pitch circle (°)      | [αsx]                  | 20.155                           | 70.513  |          |         |
| Transverse pressure angle (°)                               | [αt]                   | 70.513                           | 20.155  |          |         |
| Axial pressure angle (°)                                    | [αx]                   | 20.155                           | 70.513  |          |         |
| Base helix angle (°)                                        | [βb]                   | 68.728                           | 6.951   |          |         |
| Diametral factor q                                          | [q]                    | 15.399                           |         |          |         |
| Reference center distance (mm)                              | [ad]                   | 22.235                           |         |          |         |
| Sum of profile shift coefficients                           | [Σxi]                  | -0.0000                          |         |          |         |
| Profile shift coefficient                                   | [x]                    | -0.0000                          | -0.0000 |          |         |
| Tip alteration (mm)                                         | [k*mn]                 | 0.000                            | 0.000   |          |         |
| Reference diameter (mm)                                     | [d]                    | 23.293                           | 21.176  |          |         |
| Base diameter (mm)                                          | [db]                   | 7.770                            | 19.880  |          |         |
| Tip diameter (mm)                                           | [da]                   | 26.293                           | 24.176  |          |         |
| (mm)                                                        | [da.e/i]               | 26.293 /                         | 26.272  | 24.176 / | 24.155  |
| Tip diameter allowances (mm)                                | [Ada.e/i]              | 0.000 /                          | -0.021  | 0.000 /  | -0.021  |
| Tip form diameter (mm)                                      | [dFa.e/i]              | 26.293 /                         | 26.272  | 24.176 / | 24.155  |
| Active tip diameter (mm)                                    | [dNa]                  | 25.807                           | 24.176  |          |         |
| Active tip diameter (mm)                                    | [dNa.e/i]              | 25.807 /                         | 25.807  | 24.176 / | 24.155  |
| Operating pitch circle diameter (mm)                        | [ds]                   | 23.293                           | 21.176  |          |         |
| Root diameter (mm)                                          | [df]                   | 19.543                           | 17.426  |          |         |
| Generating Profile shift coefficient                        | [x.e/i]                | -0.0495/                         | -0.0769 | -0.0495/ | -0.0769 |
| Generated root diameter with xE (mm)                        | [df.e/i]               | 19.394 /                         | 19.312  | 17.278 / | 17.196  |
| Theoretical tip clearance (mm)                              | [c]                    | 0.375                            | 0.375   |          |         |
| Effective tip clearance (mm)                                | [c.e/i]                | 0.511 /                          | 0.439   | 0.511 /  | 0.439   |
| Active root diameter (mm)                                   | [dNf]                  | 21.081                           | 19.925  |          |         |
| Root form diameter (mm)                                     | [dFf]                  | 20.166                           | 19.880  |          |         |
| (mm)                                                        | [dFf.e/i]              | 20.021 /                         | 19.940  | 19.880 / | 19.880  |
| Involute length (mm)                                        | [l_dFa-l_dFf]          | 9.158                            | 2.380   |          |         |
| Addendum, mn*(haP*+x+k) (mm)                                | [ha]                   | 1.500                            | 1.500   |          |         |
| (mm)                                                        | [ha.e/i]               | 1.500 /                          | 1.489   | 1.500 /  | 1.489   |
| Dedendum (mm)                                               | [hf=mn*(hfP*-x)]       | 1.875                            | 1.875   |          |         |
| (mm)                                                        | [hf.e/i]               | 1.949 /                          | 1.990   | 1.949 /  | 1.990   |
| Roll angle at dFa (°)                                       | [xsi_dFa.e/i]          | 185.215 /                        | 185.053 | 39.653 / | 39.547  |
| Roll angle to dNa (°)                                       | [xsi_dNa.e/i]          | 181.460 /                        | 181.460 | 39.653 / | 39.547  |
| Roll angle at dFf (°)                                       | [xsi_dFf.e/i]          | 136.055 /                        | 135.410 | 0.057 /  | 0.057   |
| Tooth height (mm)                                           | [h]                    | 3.375                            | 3.375   |          |         |
| Normal tooth thickness at tip circle (mm)                   | [san]                  | 1.259                            | 0.975   |          |         |
| (mm)                                                        | [san.e/i]              | 1.212 /                          | 1.175   | 0.927 /  | 0.879   |
| Normal space width at root circle (mm)                      | [efn]                  | 1.004                            | 0.000   |          |         |
| (mm)                                                        | [efn.e/i]              | 1.006 /                          | 1.006   | 0.000 /  | 0.000   |
| Lead height (mm)                                            | [pz]                   | 9.504                            | 512.232 |          |         |
| Axial pitch (mm)                                            | [px]                   | 4.752                            | 36.588  |          |         |
| Normal pitch, base circle (mm)                              | [pbn, pen]             | 4.428                            |         |          |         |
| Normal pitch, reference circle (mm)                         | [pn]                   | 4.712                            |         |          |         |
| Normal pitch, operating pitch circle (mm)                   | [psn]                  | 4.712                            |         |          |         |
| Length of path of contact (mm)                              | [gan]                  | 6.908                            |         |          |         |
| Length A-S (mm)                                             | [AS]                   | 3.653                            |         |          |         |
| Length S-E (mm)                                             | [SE]                   | 3.255                            |         |          |         |
| Transverse contact ratio                                    | [εα]                   | 0.205                            | 1.537   |          |         |
| Overlap ratio                                               | [εβ]                   | 1.355                            | 0.023   |          |         |
| Total contact ratio                                         | [εγ]                   | 1.560                            |         |          |         |
| Total contact ratio with allowances                         | [εγ.e/i]               | 1.567 /                          | 1.542   |          |         |

**General influence factors**

|                                                               |         | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |
|---------------------------------------------------------------|---------|------------------|-----------------|
| Nominal circumferential force at operating pitch circle (N)   | [Ft]    | 101.15           | 422.17          |
| Axial force (N)                                               | [Fa]    | -422.17          | -101.15         |
| Radial force (N)                                              | [Fr]    | 157.12           | -157.12         |
| Normal force (N)                                              | [Fnorm] | 459.4            |                 |
| (calculation with normal force, taking friction into account) |         |                  |                 |
| Pressure ellipse width (mm)                                   | [2*a]   | 4.623            |                 |
| Pressure ellipse height (mm)                                  | [2*b]   | 1.106            |                 |
| Surface of the pressure ellipse (mm²)                         | [π*a*b] | 5.725            |                 |
| Mean tooth friction number                                    | [muzm]  | 0.100            |                 |
| Tooth friction angle (°)                                      | [roz]   | 6.074            |                 |
| Meshing efficiency (%)                                        | [ηz]    | 54.204           |                 |
| Circumferential speed reference circle (m/s)                  | [v]     | 0.22             | 0.03            |
| Sliding velocity at operating pitch circle (m/s)              | [vgs]   | 0.22             |                 |
| Max. sliding velocity at tip (m/s)                            | [vgg]   | 0.25             | 0.24            |
| Mean sliding velocity (m/s)                                   | [vgm]   | 0.23             |                 |
| Bearing loss-power (W)                                        | [PVLP]  | 0.000            |                 |
| Sealing power loss (W)                                        | [PVD]   | 0.000            |                 |
| Idle power loss (W)                                           | [PV0]   | 0.000            |                 |
| Meshing power loss (W)                                        | [PVZ]   | 10.169           |                 |
| Total power loss (W)                                          | [PV]    | 10.169           |                 |
| Total efficiency (%)                                          | [ηGes]  | 54.204           |                 |
| Number of load cycles (in mio.)                               | [NL]    | 0.001            | 0.000           |

**Draft calculation**

|                                      |        | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |
|--------------------------------------|--------|------------------|-----------------|
| Coefficient for number of teeth      | [Kz]   | 0.46             |                 |
| Load-bearing face width worm (mm)    | [bm]   | 12.20            |                 |
| Load coefficient (N/mm²)             | [C]    | 19.950           |                 |
| Permissible load coefficient (N/mm²) | [Clim] | 11.037           |                 |
| Safety for load coefficient          | [Sc]   | 0.553            |                 |

**Tooth flank load capacity**

Interim results in accordance with VDI2736:

$p_n1 = 30.262 \text{ mm}$      $p_n2 = 3.675 \text{ mm}$      $p_n = 3.277 \text{ mm}$      $\phi = 71.750^\circ$      $\theta = 36.174^\circ$   
 $\eta = 0.560$      $\xi = 2.342$

|                                         |        |              |
|-----------------------------------------|--------|--------------|
| Normal force (N)                        | [Fn]   | 459.4        |
| Pressure ellipse width (mm)             | [2*ah] | 4.623        |
| Pressure ellipse height (mm)            | [2*bh] | 1.106        |
| Contact ratio factor                    | [ZεS]  | 0.801        |
| Elasticity factor ( $\sqrt{N/mm^2}$ )   | [ZE]   | 0.080        |
| Young's modulus for tooth flank (N/mm²) | [E]    | 4679    4679 |
| Nominal contact stress (N/mm²)          | [σHm0] | 137.35       |
| Contact stress (N/mm²)                  | [σHm]  | 171.68       |

**Tooth root load capacity**

|                                                                                |          | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------|-----------------|
| Shearing in tooth root                                                         |          |                  |                 |
| Calculation formula: $\tau_F = F_{t2} \cdot K_A / A_{\tau} \cdot Y_{\epsilon}$ |          |                  |                 |
| Interim results in accordance with VDI2736-3:                                  |          |                  |                 |
| Minimum gear diameter at the worm tip circle (mm)                              | [dx0=d2] | 21.18            |                 |
| Tooth thickness in the middle of the gear (mm)                                 | [sda1]   | 2.38             |                 |
| Maximum usable gear width (mm)                                                 | [bmax]   | 16.72            |                 |
| Shear cross-section (mm²)                                                      | [Aτ]     | 35.07            |                 |
| Contact ratio factor                                                           | [Yε]     | 1.00             |                 |
| Nominal circumferential force at operating pitch circle (N)                    | [Ft]     | 422.17           |                 |
| Shear stress (N/mm²)                                                           | [τF]     | 15.05            |                 |
| Admissible shear stress (N/mm²)                                                | [τFadm]  | 0.00             |                 |



(rFadm = 0.75 \* σZSch)

Safety shearing

[SFt]

0.00 &gt;= 1.3

**Measurements for tooth thickness**

|                                                             |                  | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |        |
|-------------------------------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------|
|                                                             |                  | DIN 3967 cd25    | DIN 3967 cd25   |        |
| Tooth thickness tolerance                                   |                  |                  |                 |        |
| Tooth thickness allowance (normal section) (mm)             | [As.e/i]         | -0.054 /         | -0.084-0.054 /  | -0.084 |
| Number of teeth spanned                                     | [k]              | 0.000            | 2.000           |        |
| Base tangent length (no backlash) (mm)                      | [Wk]             | 0.000            | 6.944           |        |
| Base tangent length with allowance (mm)                     | [Wk.e/i]         | 0.000 /          | 0.000 6.893 /   | 6.865  |
| (mm)                                                        | [ΔWk.e/i]        | 0.000 /          | 0.000 -0.051 /  | -0.079 |
| Diameter of measuring circle (mm)                           | [dMWk.m]         | 0.000            | 21.020          |        |
| Theoretical diameter of ball/pin (mm)                       | [DM]             | 2.578            | 2.622           |        |
| Effective diameter of ball/pin (mm)                         | [DMeff]          | 2.750            | 2.750           |        |
| Radial single-ball measurement backlash free (mm)           | [MrK]            | 13.802           | 12.620          |        |
| Radial single-ball measurement (mm)                         | [MrK.e/i]        | 13.728 /         | 13.687 12.565 / | 12.534 |
| Diameter of measuring circle (mm)                           | [dMMr.m]         | 0.000            | 21.241          |        |
| Diametral measurement over two balls without clearance (mm) | [MdK]            | 0.000            | 25.240          |        |
| Diametral two ball measure (mm)                             | [MdK.e/i]        | 0.000 /          | 0.000 25.130 /  | 25.067 |
| Diametral measurement over pins without clearance (mm)      | [MdR]            | 27.603           | 25.240          |        |
| Measurement over pins according to DIN 3960 (mm)            | [MdR.e/i]        | 27.456 /         | 27.374 25.130 / | 25.067 |
| Measurement over 3 pins, axial, according to AGMA 2002 (mm) |                  |                  |                 |        |
|                                                             | [dk3A.e/i]       | 27.456 /         | 27.374 25.130 / | 25.067 |
| Dimensions over 3 pins without clearance (mm)               | [Md3R]           | 27.603           | 0.000           |        |
| Measurement over 3 pins with allowance (mm)                 | [Md3R.e/i]       | 27.456 /         | 27.374 0.000 /  | 0.000  |
| Measurement over 3 pins: For ZI worms                       |                  |                  |                 |        |
| Chordal tooth thickness (no backlash) (mm)                  | [sc]             | 2.356            | 2.351           |        |
| Normal chordal tooth thickness with allowance (mm)          | [sc.e/i]         | 2.302 /          | 2.272 2.299 /   | 2.270  |
| Reference chordal height from da.m (mm)                     | [ha]             | 1.496            | 1.559           |        |
| Tooth thickness, arc (mm)                                   | [sn]             | 2.356            | 2.356           |        |
| (mm)                                                        | [sn.e/i]         | 2.302 /          | 2.272 2.302 /   | 2.272  |
| Backlash free center distance (mm)                          | [aControl.e/i]   | 22.085 /         | 22.002          |        |
| Backlash free center distance, allowances (mm)              | [jta]            | -0.150 /         | -0.233          |        |
| Tip clearance (mm)                                          | [c0.i(aControl)] | 0.216            | 0.216           |        |
| Center distance allowances (mm)                             | [Aa.e/i]         | 0.011 /          | -0.011          |        |
| Radial backlash (mm)                                        | [jrw.e/i]        | 0.243 /          | 0.139           |        |
| Circumferential backlash (transverse section) (mm)          | [jtw.e/i]        | 0.177 /          | 0.101           |        |
| Torsional angle on input with output fixed:                 |                  |                  |                 |        |
| Total torsional angle (°)                                   | [j.tSys]         | 7.1467/          | 4.0834          |        |

**Tooth tolerances**

|                                                                                                     |          | ----- Worm ----- | Worm wheel ---- |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------|-----------------|
| According to ISO 1328-1:2013, ISO 1328-2:1997                                                       |          |                  |                 |
| The standard does not specify tolerances for gears with helix angles > 45°..                        |          |                  |                 |
| The calculation can be activated under 'Module specific settings > Extrapolating tolerance values'. |          |                  |                 |
| One or several gear data (mn, b, z or d) lay beyond the limits covered by the standard.             |          |                  |                 |
| Tolerances are calculated following the formulae of the standard.                                   |          |                  |                 |
| The values are outside of the range of validity!                                                    |          |                  |                 |
| Accuracy grade                                                                                      | [Q]      | A6               | A6              |
| Single pitch deviation (μm)                                                                         | [fpT]    | 0.00             | 8.00            |
| Base circle pitch deviation (μm)                                                                    | [fpbT]   | 0.00             | 7.50            |
| Sector pitch deviation over k/8 pitches (μm)                                                        | [Fpk/8T] | 0.00             | 16.00           |
| Profile form deviation (μm)                                                                         | [ffaT]   | 0.00             | 8.00            |
| Profile slope deviation (μm)                                                                        | [fHaT]   | 0.00             | 6.50            |
| Total profile deviation (μm)                                                                        | [FaT]    | 0.00             | 11.00           |
| Helix form deviation (μm)                                                                           | [ffβT]   | 0.00             | 8.50            |
| Helix slope deviation (μm)                                                                          | [fHβT]   | 0.00             | 8.00            |
| Total helix deviation (μm)                                                                          | [FβT]    | 0.00             | 12.00           |
| Total cumulative pitch deviation (μm)                                                               | [FpT]    | 0.00             | 22.00           |
| Adjacent pitch difference (μm)                                                                      | [fuT]    | 0.00             | 11.00           |
| Runout (μm)                                                                                         | [FrT]    | 0.00             | 20.00           |
| Single flank composite, total (μm)                                                                  | [FisT]   | 0.00             | 30.00           |
| Single flank composite, tooth-to-tooth (μm)                                                         | [fisT]   | 0.00             | 8.00            |



|                                                                                                          |        |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|
| Radial composite, total ( $\mu\text{m}$ )                                                                | [FidT] | 23.00 | 23.00 |
| Radial composite, tooth-to-tooth ( $\mu\text{m}$ )                                                       | [fidT] | 6.50  | 6.50  |
| FidT (Fi"), fidT (fi") according to ISO 1328:1997 calculated with the geometric mean values for mn and d |        |       |       |

#### Supplementary data

|                                                                      |        |           |           |
|----------------------------------------------------------------------|--------|-----------|-----------|
| Weight - calculated with da (kg)                                     | [Mass] | 0.008     | 0.009     |
| Moment of inertia, system referenced to Gear 1:                      |        |           |           |
| Single gears $((da+df)/2 \dots di)$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) | [J]    | 5.244e-07 | 4.628e-07 |
| System, $(da+df)/2 \dots di$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )        | [J]    | 5.339e-07 |           |

Indications for the manufacturing by wire cutting:

|                                                          |           |      |
|----------------------------------------------------------|-----------|------|
| Deviation from theoretical tooth trace ( $\mu\text{m}$ ) | [WireErr] | 57.5 |
| Permissible deviation ( $\mu\text{m}$ )                  | [Fb/2]    | 6.0  |

#### Calculating the tooth form

Data for the tooth form calculation :

Data not available.

Please run the calculation in the "Tooth form" tab and open the main report again.

#### Service life, damage

Could not be calculated.

Remarks:

- Specifications with  $[.e/i]$  imply: Maximum [e] and minimum value [i] for taking all tolerances into account

The value entered for the circumferential backlash, and the center distance without backlash, used to verify the tooth thickness has not yet been investigated exactly.  
It is only to be used as an indication.

>

- The tooth form factor YF is calculated according to ISO 6336:1996 using Method C (Application of force at tip)

- The active root diameter is calculated as specified by Pech.

---

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| End of Report | lines: | 360 |
|---------------|--------|-----|

---



## **Anexo D: Desenhos de definição e de conjunto do sistema de regulação lombar**

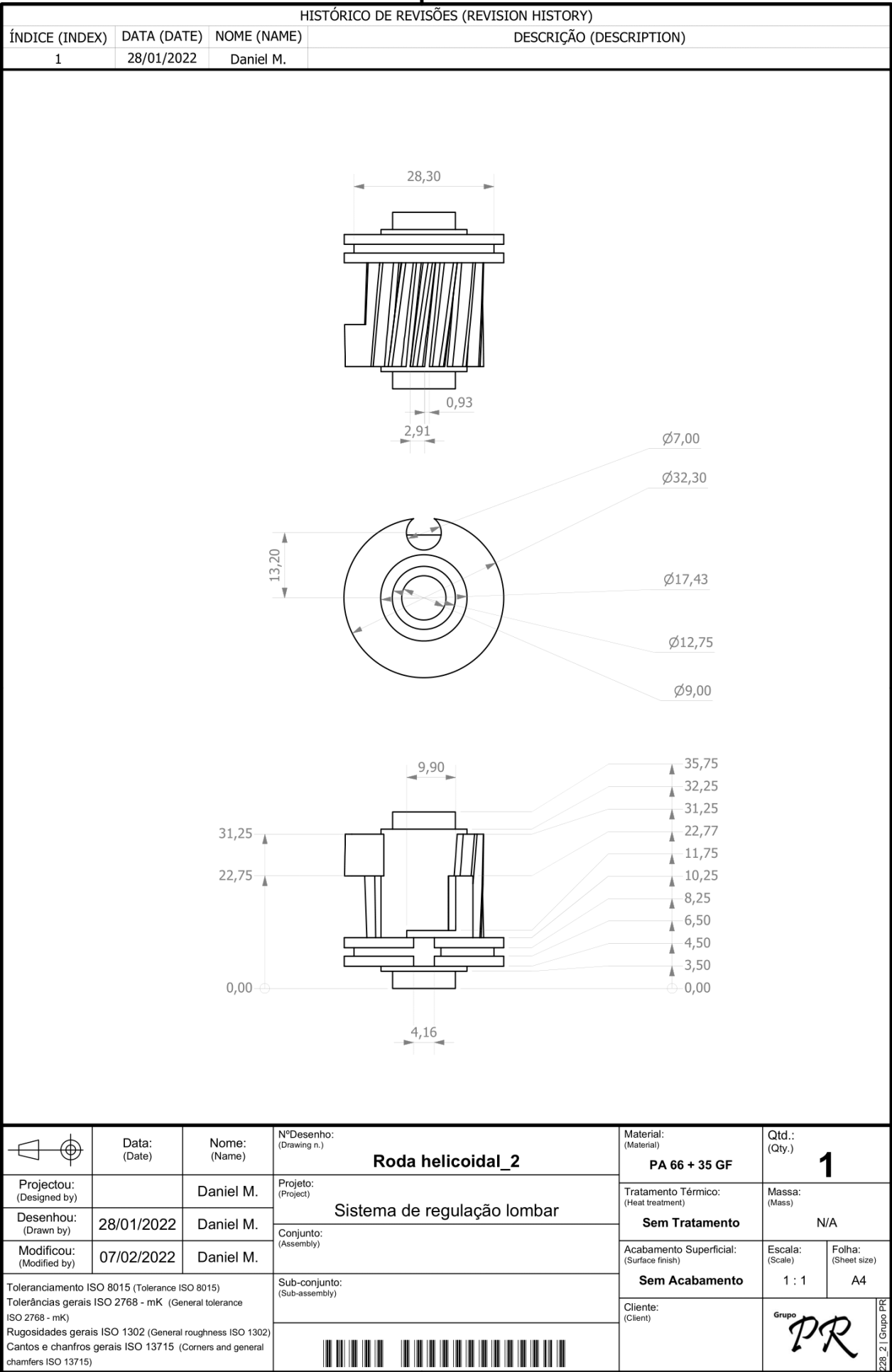
### **D.1: Parafuso sem-fim**

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita. This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.



## **Anexo D: Desenhos de definição e de conjunto do sistema de regulação lombar**

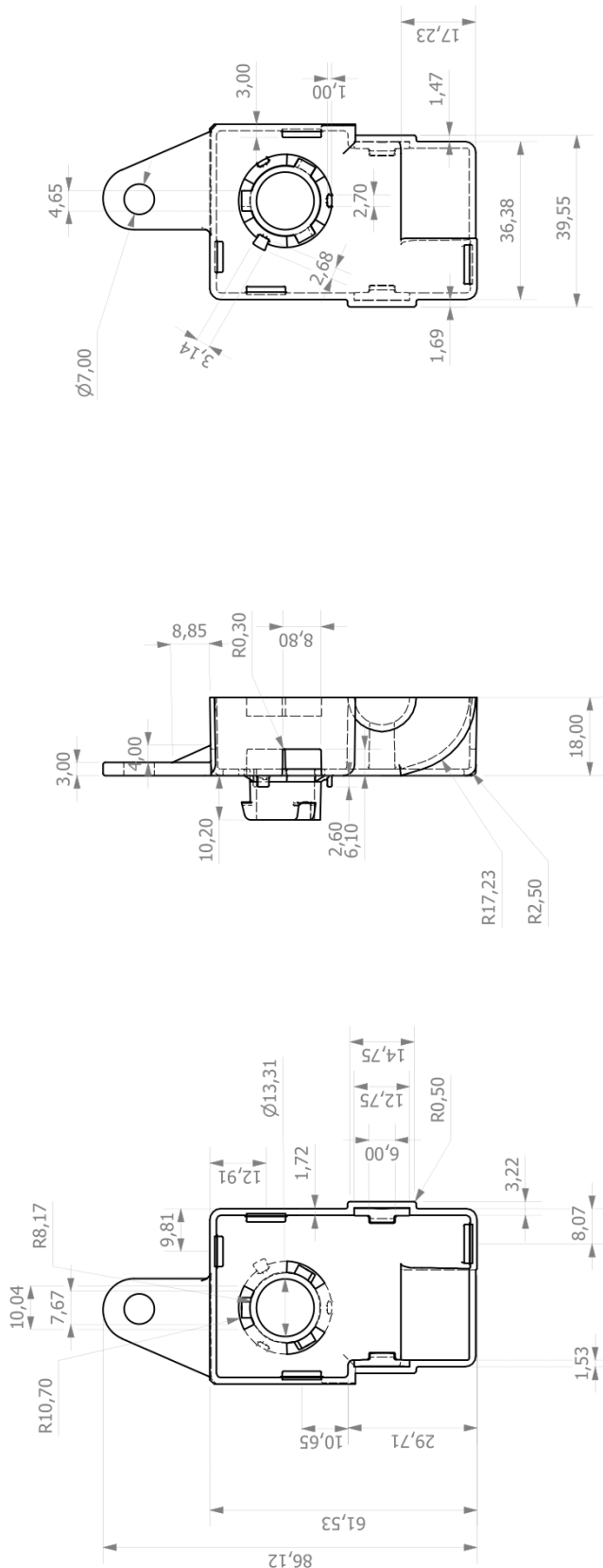
### **D.2: Roda helicoidal**



## **Anexo D: Desenhos de definição e de conjunto do sistema de regulação lombar**

### **D.3: Peça superior**

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |
| 1                                        | 28/01/2022  | Daniel M.   |                         |

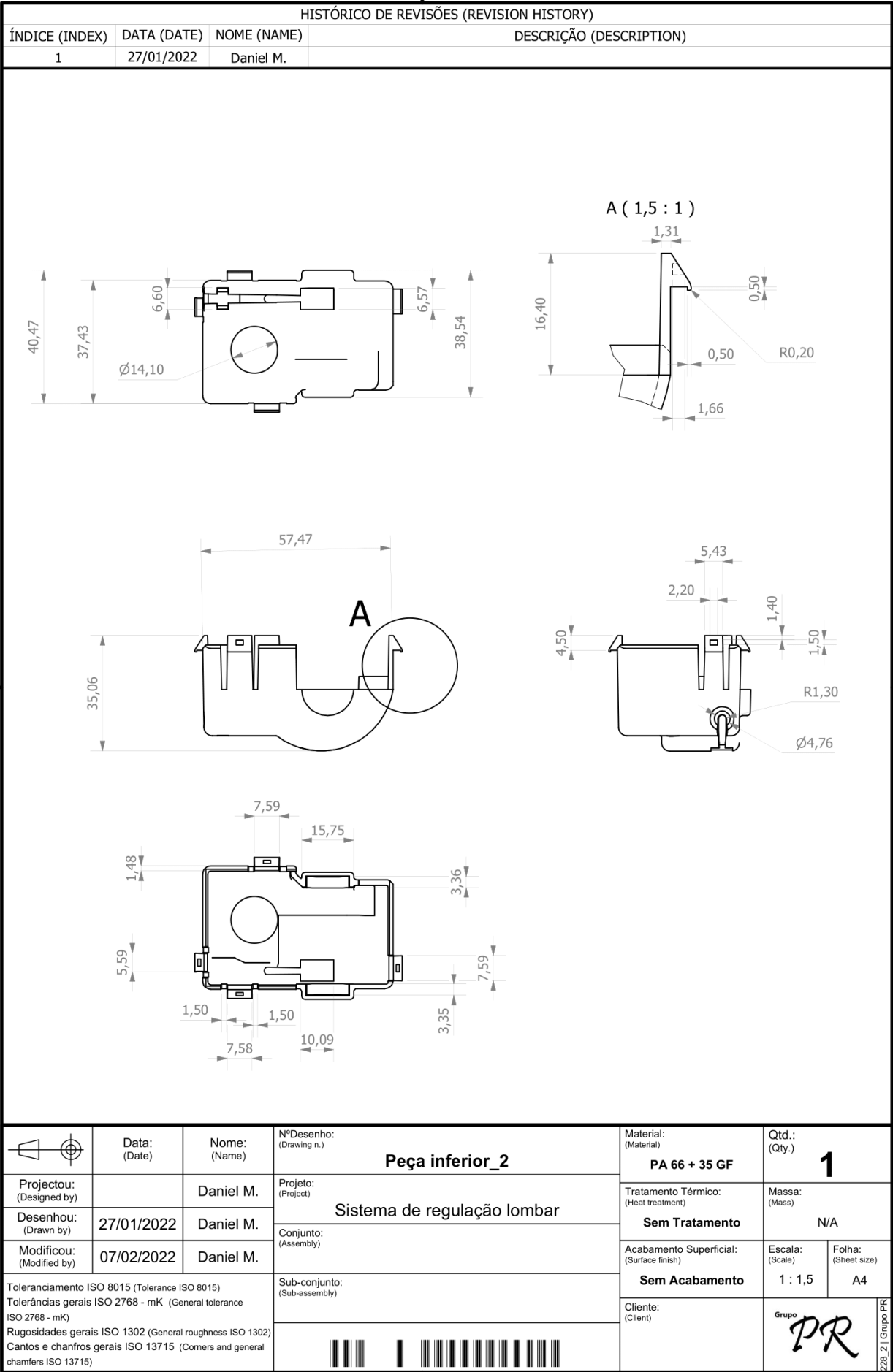


|                                                                             |                 |                 |                                 |                             |  |                            |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|--|----------------------------|
|                                                                             | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)      | Peça superior_2             |  | NºDesenho:<br>(Drawing n.) |
| Projectou:<br>(designed by)                                                 |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)           | Sistema de regulação lombar |  |                            |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                     | 28/01/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)         |                             |  |                            |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                 | 07/02/2022      | Daniel M.       | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly) |                             |  |                            |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)                               |                 |                 |                                 |                             |  |                            |
| Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)          |                 |                 |                                 |                             |  |                            |
| Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)                    |                 |                 |                                 |                             |  |                            |
| Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |                 |                 |                                 |                             |  |                            |

## **Anexo D: Desenhos de definição e de conjunto do sistema de regulação lombar**

### **D.4: Peça inferior**

Desenvolvimento de Sistema de Regulação Lombar para Assentos de Automóveis

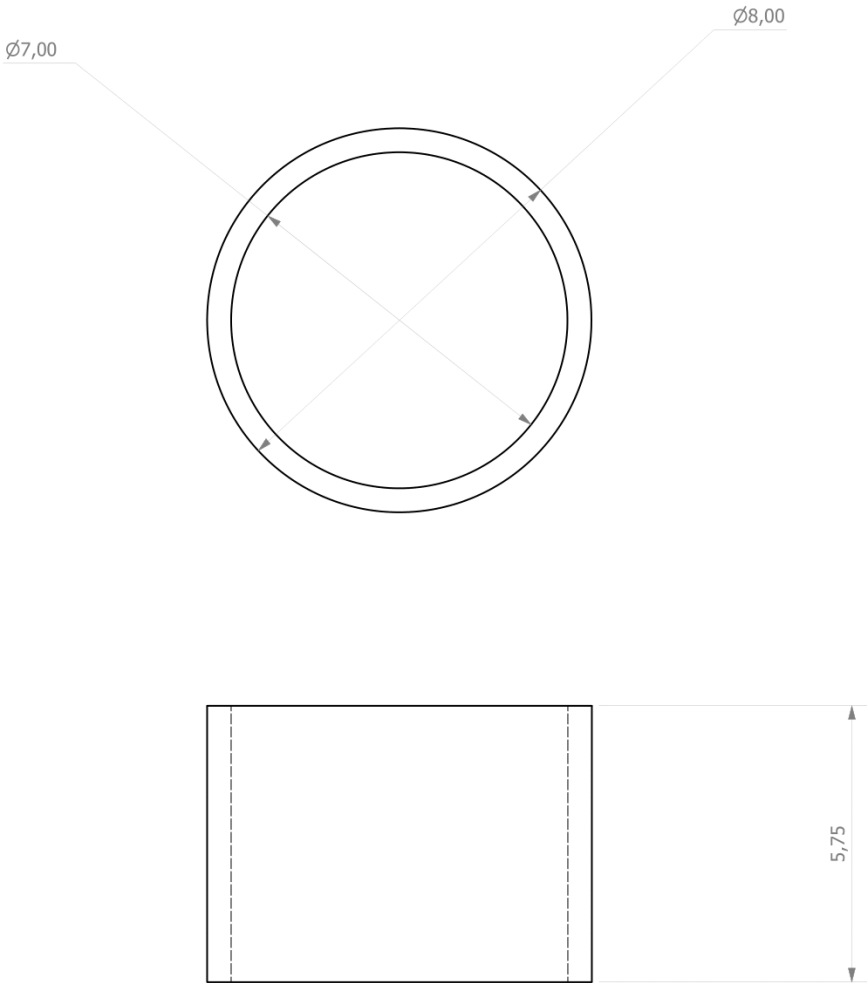


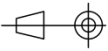
Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita. This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

## **Anexo D: Desenhos de definição e de conjunto do sistema de regulação lombar**

### **D.5: Casquilho de ajuste do cabo de aço na roda helicoidal**

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |  |  |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|--|--|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |  |  |
| 1                                        | 27/01/2022  | Daniel M.   |                         |  |  |



|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                                     |                                             |                                                                                       |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
|                                                                                                                                                                             | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)          | Material:<br>(Material)                     | Qtd.:<br>(Qty.)                                                                       |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 | <b>Casquilho ajuste cabo de aço</b> | <b>Alumínio</b>                             | <b>1</b>                                                                              |                        |
| Projectou:<br>(Designed by)                                                                                                                                                                                                                                    |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)               | Tratamento Térmico:<br>(Heat treatment)     | Massa:<br>(Mass)                                                                      |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 | <b>Sistema de regulação lombar</b>  | <b>Sem Tratamento</b>                       | <b>N/A</b>                                                                            |                        |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                                                                                                                                                                                                        | 27/01/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)             | Acabamento Superficial:<br>(Surface finish) | Escala:<br>(Scale)                                                                    | Folha:<br>(Sheet size) |
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                                     | <b>Sem Acabamento</b>                       | <b>7 : 1</b>                                                                          | <b>A4</b>              |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                                                                                                                                                                                                    | 10/02/2022      | Daniel M.       | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly)     | Cliente:<br>(Client)                        | Grupo                                                                                 |                        |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)<br>Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)<br>Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |                 |                 |                                     |                                             |  |                        |



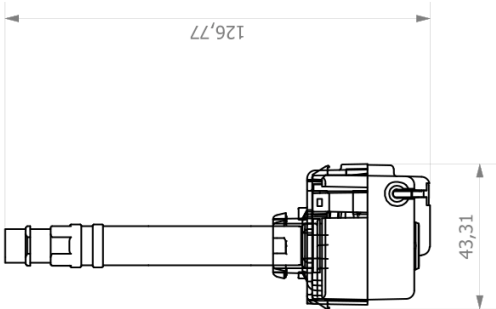
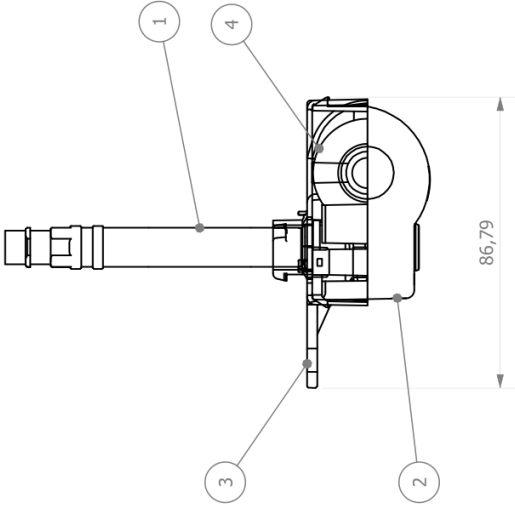
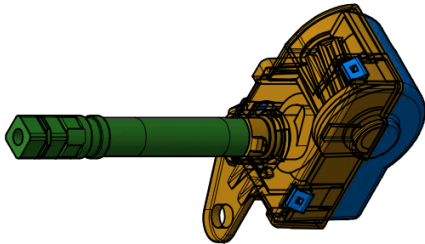
228\_2 | Grupo PR

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita.  
This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

## **Anexo D: Desenhos de definição e de conjunto do sistema de regulação lombar**

### **D.6: Desenho de conjunto do sistema de regulação lombar**

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |
|------------------------------------------|-------------|-------------|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) |
| 1                                        | 08/03/2022  | Daniel M.   |



| LISTA DE PEÇAS (PARTS LIST) |             |
|-----------------------------|-------------|
| ITEM                        | QTD. (QTY.) |
| 1                           | 1           |
| 2                           | 1           |
| 3                           | 1           |
| 4                           | 1           |

| REFERÊNCIA (PART NUMBER) |                   |
|--------------------------|-------------------|
| 1                        | Parafuso sem fim  |
| 2                        | Peça inferior_2   |
| 3                        | Peça superior_2   |
| 4                        | Roda helicoidal_2 |

| MATERIAL |               |
|----------|---------------|
| 1        | PA 66 + 35 GF |
| 2        | PA 66 + 35 GF |
| 3        | PA 66 + 35 GF |
| 4        | PA 66 + 35 GF |

| NºDesenho: (Drawing n.)      |              |
|------------------------------|--------------|
| Projeto: (Project)           | Nome: (Name) |
| Conjunto: (Assembly)         | Data: (Date) |
| Sub-conjunto: (Sub-assembly) |              |

| Gearbox reduction            |              |
|------------------------------|--------------|
| Projeto: (Project)           | Nome: (Name) |
| Conjunto: (Assembly)         | Data: (Date) |
| Sub-conjunto: (Sub-assembly) |              |

| Sistema de reeulação lombar  |              |
|------------------------------|--------------|
| Projeto: (Project)           | Nome: (Name) |
| Conjunto: (Assembly)         | Data: (Date) |
| Sub-conjunto: (Sub-assembly) |              |

| Tolerâncias gerais ISO 8015 (Tolerances ISO 8015)                           |  |
|-----------------------------------------------------------------------------|--|
| ISO 2768 - mK (General tolerance)                                           |  |
| Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)                    |  |
| Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |  |

| Tratamento Térmico: (Heat treatment)     |  |
|------------------------------------------|--|
| Sem Tratamento                           |  |
| Acabamento Superficial: (Surface finish) |  |
| Sem Acabamento                           |  |
| Escala: (Scale)                          |  |
| 1 : 2                                    |  |
| Folha: (Sheet size)                      |  |
| A4                                       |  |

| Material: (Material)                     |  |
|------------------------------------------|--|
| Qtd.: (Qty.)                             |  |
| Tratamento Térmico: (Heat treatment)     |  |
| Sem Tratamento                           |  |
| Acabamento Superficial: (Surface finish) |  |
| Sem Acabamento                           |  |
| Escala: (Scale)                          |  |
| 1 : 2                                    |  |
| Folha: (Sheet size)                      |  |
| A4                                       |  |

| Grupo |  |
|-------|--|
| PR    |  |



## **Anexo E: Desenhos de definição e de conjunto do banco de ensaios**

### **E.1: Mesa**

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita. This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.



## **Anexo E: Desenhos de definição e de conjunto do banco de ensaios**

### **E.2: Torres de apoio**

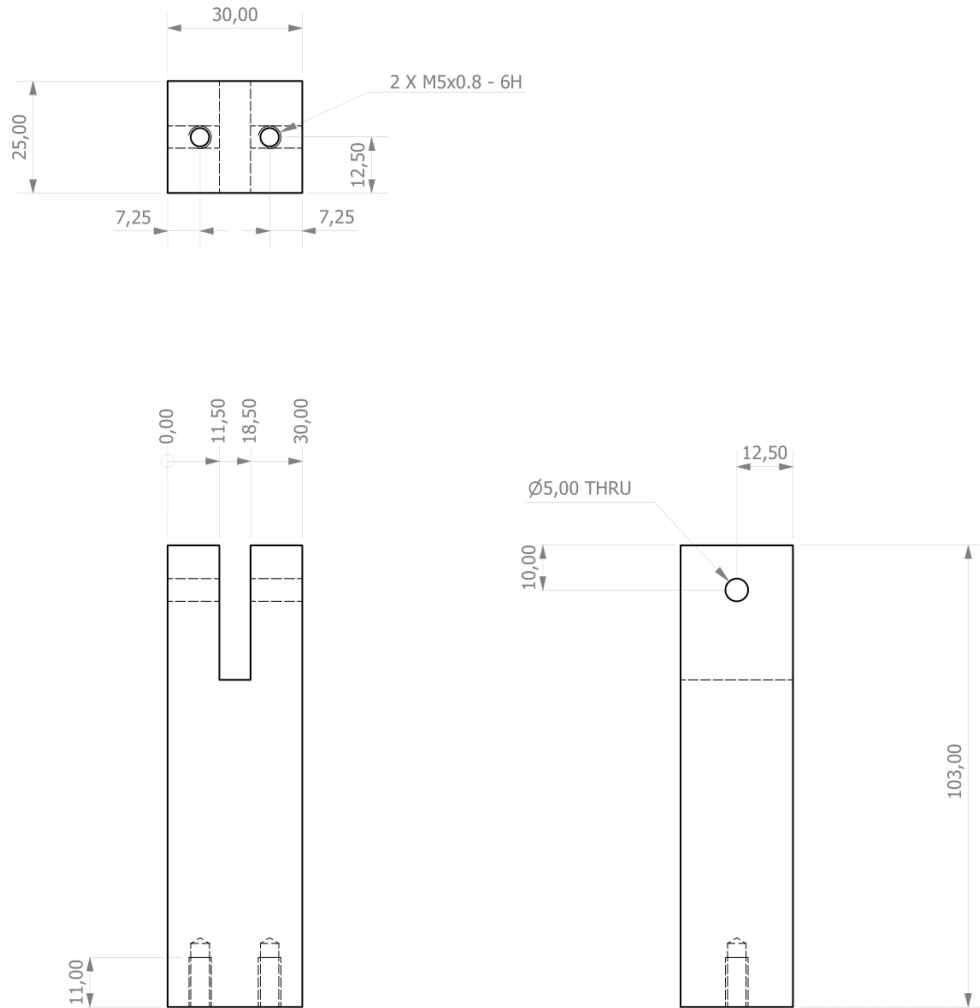
Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita. This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

28\_2 | Grupo PR

# Desenvolvimento de Sistema de Regulação Lombar para Assentos de Automóveis

## HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY)

| ÍNDICE (INDEX) | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |
|----------------|-------------|-------------|-------------------------|
| 1              | 11/01/2022  | Daniel M.   |                         |



|                                                                             |                 |                 |                                 |                                             |                        |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
|                                                                             | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)      | Material:<br>(Material)                     | Qtd.:<br>(Qty.)        |
| Projectou:<br>(Designed by)                                                 |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)           | CK45 (F10)                                  | 1                      |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                     | 11/01/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)         | Tratamento Térmico:<br>(Heat treatment)     | Massa:<br>(Mass)       |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                 | 20/01/2022      | Daniel M.       | Banco de ensaios                | Sem Tratamento                              | N/A                    |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)                               |                 |                 | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly) | Acabamento Superficial:<br>(Surface finish) | Escala:<br>(Scale)     |
| Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)          |                 |                 |                                 | Zincado                                     | 1 : 1.5                |
| Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)                    |                 |                 |                                 | Ciente:<br>(Client)                         | Folha:<br>(Sheet size) |
| Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |                 |                 |                                 |                                             | A4                     |
|                                                                             |                 |                 |                                 |                                             |                        |

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita.  
This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

Grupo  
**PR**

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |  |  |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|--|--|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |  |  |
| 1                                        | 11/01/2022  | Daniel M.   |                         |  |  |

Technical drawing of a horizontal castling (Castelo horizontal) showing top, side, and front views with dimensions.

Top view: Circular shape with a central hole. Dimensions:  $\varnothing 20,00$  (outer diameter),  $M5 \times 0.8 - 6H$  (thread).

Side view: Rectangular shape. Dimensions:  $35,00$  (total height),  $14,20$  (height of the top section),  $11,00$  (height of the bottom section),  $10,00$  (width of the top section),  $25,00$  (width of the bottom section).

Front view: Rectangular shape. Dimensions:  $R4,00$  (fillet radius),  $10,00$  (width),  $M5 \times 0.8 - 6H$  (thread).

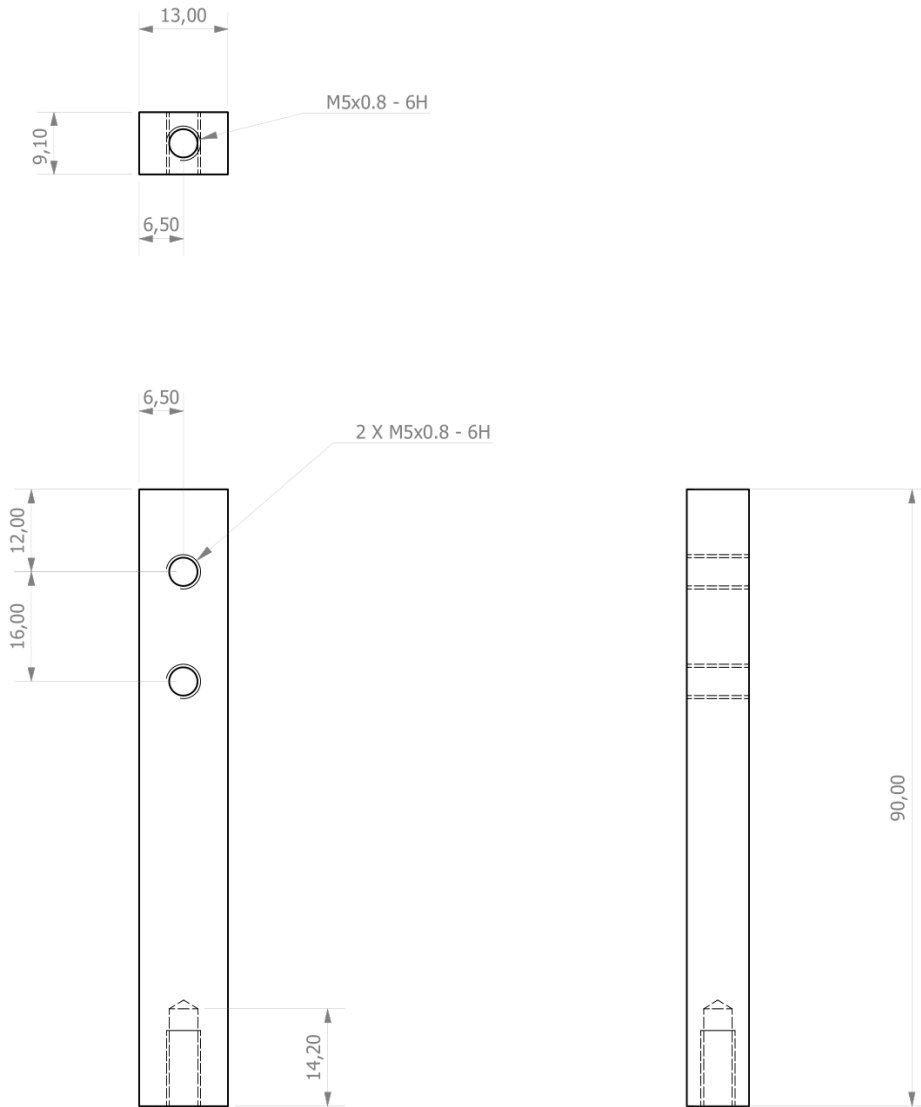
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                                    |                                             |                    |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------|------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)         | Material:<br>(Material)                     | Qtd.:<br>(Qty.)    |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 | <b>Castelo horizontal</b>          | <b>CK45 (F10)</b>                           | <b>2</b>           |                        |
| Projectou:<br>(Designed by)                                                                                                                                                                                                                                    |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)              | Tratamento Térmico:<br>(Heat treatment)     | Massa:<br>(Mass)   |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 | <b>Sistema de regulação lombar</b> | <b>Sem Tratamento</b>                       | <b>N/A</b>         |                        |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                                                                                                                                                                                                        | 11/01/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)            | Acabamento Superficial:<br>(Surface finish) | Escala:<br>(Scale) | Folha:<br>(Sheet size) |
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 | <b>Banco de ensaios</b>            | <b>Zincado</b>                              | <b>1 : 1</b>       | <b>A4</b>              |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                                                                                                                                                                                                    |                 |                 | 20/01/2022                         | Cliente:<br>(Client)                        | Grupo<br><b>PR</b> |                        |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)<br>Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)<br>Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |                 |                 | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly)    |                                             |                    |                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                                    |                                             |                    |                        |

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita.  
This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

# Desenvolvimento de Sistema de Regulação Lombar para Assentos de Automóveis

## HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY)

| ÍNDICE (INDEX) | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |
|----------------|-------------|-------------|-------------------------|
| 1              | 11/01/2022  | Daniel M.   |                         |



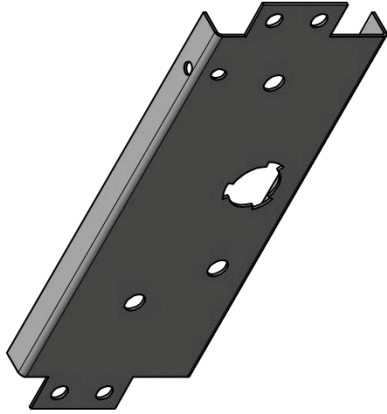
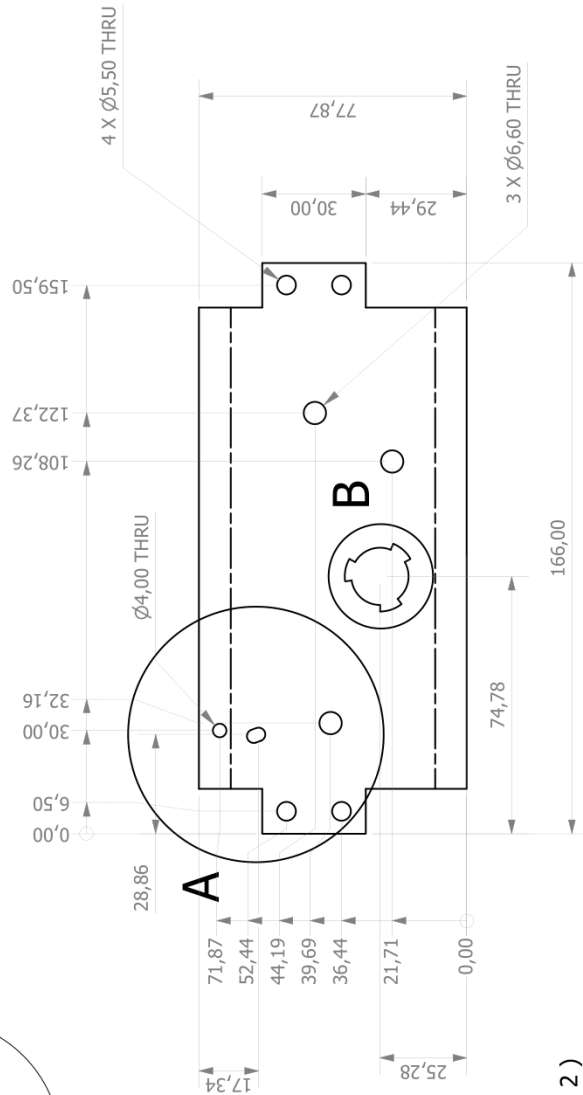
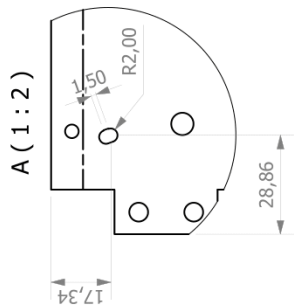
|                                                                             |                 |                 |                                 |                                             |                        |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
|                                                                             | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)      | Material:<br>(Material)                     | Qtd.:<br>(Qty.)        |
| Projectou:<br>(Designed by)                                                 |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)           | CK45 (F10)                                  | 2                      |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                     | 11/01/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)         | Tratamento Térmico:<br>(Heat treatment)     | Massa:<br>(Mass)       |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                 | 20/01/2022      | Daniel M.       |                                 | Sem Tratamento                              | N/A                    |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)                               |                 |                 | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly) | Acabamento Superficial:<br>(Surface finish) | Escala:<br>(Scale)     |
| Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)          |                 |                 |                                 | Zincado                                     | 1 : 1                  |
| Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)                    |                 |                 |                                 | Cliente:<br>(Client)                        | Folha:<br>(Sheet size) |
| Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |                 |                 |                                 |                                             | A4                     |
|                                                                             |                 |                 |                                 | Grupo<br><b>PR</b>                          |                        |



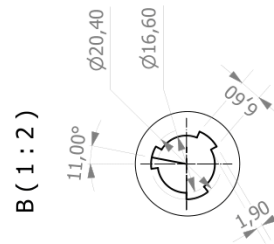
## **Anexo E: Desenhos de definição e de conjunto do banco de ensaios**

### **E.3: Chapa de fixação**

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |
| 1                                        | 11/01/2022  | Daniel M.   |                         |



## FOLDED MODEL



|                                                                                       |                        |                        |                                        |                                    |                                        |                                                                                     |                           |                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
|  | <b>Data:</b><br>(Date) | <b>Nome:</b><br>(Name) | <b>NºDesenho:</b><br>(Drawing n.)      | <b>Chapa fixação</b>               | <b>NºDesenho:</b><br>(Drawing n.)      | <b>Material:</b><br>(Material)                                                      | <b>Qtd.:</b><br>(Qty)     | <b>1</b>                      |
| <b>Projectou:</b><br>(Designed by)                                                    |                        | <b>Daniel M.</b>       | <b>Projeto:</b><br>(Project)           | <b>Sistema de regulação lombar</b> | <b>Projeto:</b><br>(Project)           | <b>Tratamento Térmico:</b><br>(Heat treatment)                                      | <b>Massa:</b><br>(Mass)   | <b>N/A</b>                    |
| <b>Desenhou:</b><br>(Drawn by)                                                        | <b>11/01/2022</b>      | <b>Daniel M.</b>       | <b>Conjunto:</b><br>(Assembly)         | <b>Banco de ensaios</b>            | <b>Conjunto:</b><br>(Assembly)         | <b>Acabamento Superficial:</b><br>(Surface finish)                                  | <b>Escala:</b><br>(Scale) | <b>Folha:</b><br>(Sheet size) |
| <b>Modificou:</b><br>(Modified by)                                                    | <b>20/01/2022</b>      | <b>Daniel M.</b>       | <b>Sub-conjunto:</b><br>(Sub-assembly) |                                    | <b>Sub-conjunto:</b><br>(Sub-assembly) | <b>Sem Acabamento</b>                                                               | <b>1 : 2</b>              | <b>A4</b>                     |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)                                         |                        |                        |                                        |                                    |                                        | <b>Cliente:</b><br>(Client)                                                         | <b>Grupo</b>              |                               |
| Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)                    |                        |                        |                                        |                                    |                                        |  |                           |                               |
| Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)                              |                        |                        |                                        |                                    |                                        |                                                                                     |                           |                               |
| Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715)           |                        |                        |                                        |                                    |                                        |                                                                                     |                           |                               |

## **Anexo E: Desenhos de definição e de conjunto do banco de ensaios**

### **E.4: Braço**



## **Anexo E: Desenhos de definição e de conjunto do banco de ensaios**

### **E.5: Elemento de forma oval**

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita. This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

00000000000000000000000000000000

## **Anexo E: Desenhos de definição e de conjunto do banco de ensaios**

### **E.6: “Mini form”**

Desenvolvimento de Sistema de Regulação Lombar para Assentos de Automóveis

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |  |  |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|--|--|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |  |  |
| 1                                        | 21/11/2018  | Daniel M.   |                         |  |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                                                             |                                                                      |                                    |                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)<br><b>Mini form</b>              | Material:<br>(Material)<br><b>Alumínio</b>                           | Qtd.:<br>(Qty.)<br><b>1</b>        |                                     |
| Projectou:<br>(Designed by)                                                                                                                                                                                                                                    |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)<br><b>Sistema de regulação lombar</b> | Tratamento Térmico:<br>(Heat treatment)<br><b>Sem Tratamento</b>     | Massa:<br>(Mass)<br><b>N/A</b>     |                                     |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                                                                                                                                                                                                        | 18/02/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)<br><b>Banco de ensaios</b>          | Acabamento Superficial:<br>(Surface finish)<br><b>Sem Acabamento</b> | Escala:<br>(Scale)<br><b>1 : 3</b> | Folha:<br>(Sheet size)<br><b>A4</b> |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                                                                                                                                                                                                    | 18/02/2022      | Daniel M.       | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly)                             | Cliente:<br>(Client)                                                 | Grupo<br><b>PR</b>                 |                                     |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)<br>Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)<br>Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |                 |                 |                                                             |                                                                      | 228_2   Grupo PR                   |                                     |

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita.  
This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

## **Anexo E: Desenhos de definição e de conjunto do banco de ensaios**

### **E.7: Outros elementos de pequena dimensão**

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |  |  |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|--|--|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |  |  |
| 1                                        | 11/01/2022  | Daniel M.   |                         |  |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                                                             |                                                                      |                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)<br><b>Casquilho</b>              | Material:<br>(Material)<br><b>Aluminio</b>                           | Qtd.:<br>(Qty.)<br><b>2</b>         |
| Projectou:<br>(Designed by)                                                                                                                                                                                                                                    |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)<br><b>Sistema de regulação lombar</b> | Tratamento Térmico:<br>(Heat treatment)<br><b>Sem Tratamento</b>     | Massa:<br>(Mass)<br><b>N/A</b>      |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                                                                                                                                                                                                        | 11/01/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)<br><b>Banco de ensaios</b>          | Acabamento Superficial:<br>(Surface finish)<br><b>Sem Acabamento</b> | Escala:<br>(Scale)<br><b>4 : 1</b>  |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                                                                                                                                                                                                    | 20/01/2022      | Daniel M.       | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly)                             | Cliente:<br>(Client)                                                 | Folha:<br>(Sheet size)<br><b>A4</b> |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)<br>Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)<br>Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |                 |                 |                                                             |                                                                      |                                     |

228\_2 | Grupo PR

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita.  
This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

Desenvolvimento de Sistema de Regulação Lombar para Assentos de Automóveis

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |  |  |  |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|--|--|--|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |  |  |  |
| 1                                        | 11/01/2022  | Daniel M.   |                         |  |  |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                                 |                                             |                    |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------------|--------------------|------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)      | Material:<br>(Material)                     | Qtd.:<br>(Qty.)    |                        |
| Projectou:<br>(Designed by)                                                                                                                                                                                                                                    |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)           | CK45 (F10)                                  | 2                  |                        |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                                                                                                                                                                                                        | 11/01/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)         | Tratamento Térmico:<br>(Heat treatment)     | Massa:<br>(Mass)   |                        |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                                                                                                                                                                                                    | 20/01/2022      | Daniel M.       |                                 | Sem Tratamento                              | N/A                |                        |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)<br>Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)<br>Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |                 |                 | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly) | Acabamento Superficial:<br>(Surface finish) | Escala:<br>(Scale) | Folha:<br>(Sheet size) |
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                                 | Zincado                                     | 1 : 1              | A4                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |                 |                                 | Cliente:<br>(Client)                        | Grupo<br>PR        |                        |

228\_2 | Grupo PR

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita.  
This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |  |  |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|--|--|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |  |  |
| 1                                        | 04/02/2022  | Daniel M.   |                         |  |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |                 |                                 |                                             |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                      | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)      | Material:<br>(Material)                     | Qtd.:<br>(Qty.)        |
| Projectou:<br>(Designed by)                                                                                                                                                                                                                                          |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)           | Aluminio                                    | 2                      |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                                                                                                                                                                                                              | 04/02/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)         | Tratamento Térmico:<br>(Heat treatment)     | Massa:<br>(Mass)       |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                                                                                                                                                                                                          | 04/02/2022      | Daniel M.       | Banco de ensaios                | Sem Tratamento                              | N/A                    |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)<br>Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance<br>ISO 2768 - mK)<br>Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)<br>Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general<br>chamfers ISO 13715) |                 |                 | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly) | Acabamento Superficial:<br>(Surface finish) | Escala:<br>(Scale)     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |                 |                                 | Zincado                                     | 1 : 1                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |                 |                                 | Cliente:<br>(Client)                        | Folha:<br>(Sheet size) |
|                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |                 |                                 |                                             | A4                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |                 |                                 | Grupo                                       | PR                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 |                 |                                 |                                             | 228.2   Grupo PR       |

Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita.  
This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.

Desenvolvimento de Sistema de Regulação Lombar para Assentos de Automóveis

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |  |  |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|--|--|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |  |  |
| 1                                        | 11/01/2022  | Daniel M.   |                         |  |  |

|                                                                             |                 |                 |                                 |                                             |                    |                        |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------------|--------------------|------------------------|
|                                                                             | Data:<br>(Date) | Nome:<br>(Name) | NºDesenho:<br>(Drawing n.)      | Material:<br>(Material)                     | Qtd.:<br>(Qty.)    |                        |
| Projectou:<br>(Designed by)                                                 |                 | Daniel M.       | Projeto:<br>(Project)           | Aço Prata                                   | 3                  |                        |
| Desenhou:<br>(Drawn by)                                                     | 11/01/2022      | Daniel M.       | Conjunto:<br>(Assembly)         | Tratamento Térmico:<br>(Heat treatment)     | Massa:<br>(Mass)   |                        |
| Modificou:<br>(Modified by)                                                 | 20/01/2022      | Daniel M.       |                                 | Sem Tratamento                              | N/A                |                        |
| Toleranciamento ISO 8015 (Tolerance ISO 8015)                               |                 |                 | Sub-conjunto:<br>(Sub-assembly) | Acabamento Superficial:<br>(Surface finish) | Escala:<br>(Scale) | Folha:<br>(Sheet size) |
| Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerance ISO 2768 - mK)          |                 |                 |                                 | Sem Acabamento                              | 2 : 1              | A4                     |
| Rugosidades gerais ISO 1302 (General roughness ISO 1302)                    |                 |                 |                                 | Cliente:<br>(Client)                        | Grupo<br>PR        |                        |
| Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |                 |                 |                                 |                                             |                    |                        |

228\_2 | Grupo PR

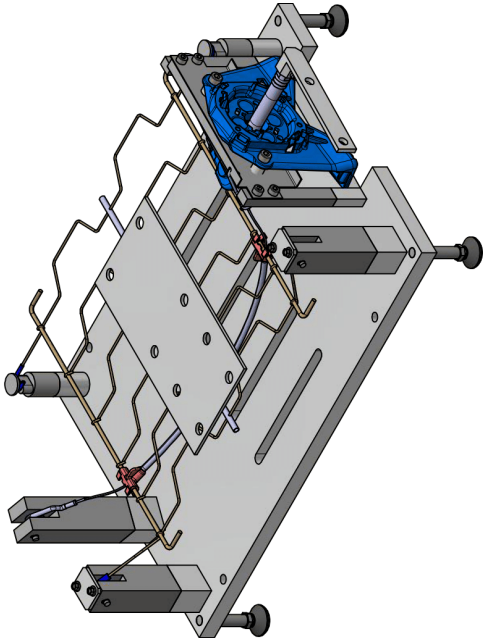
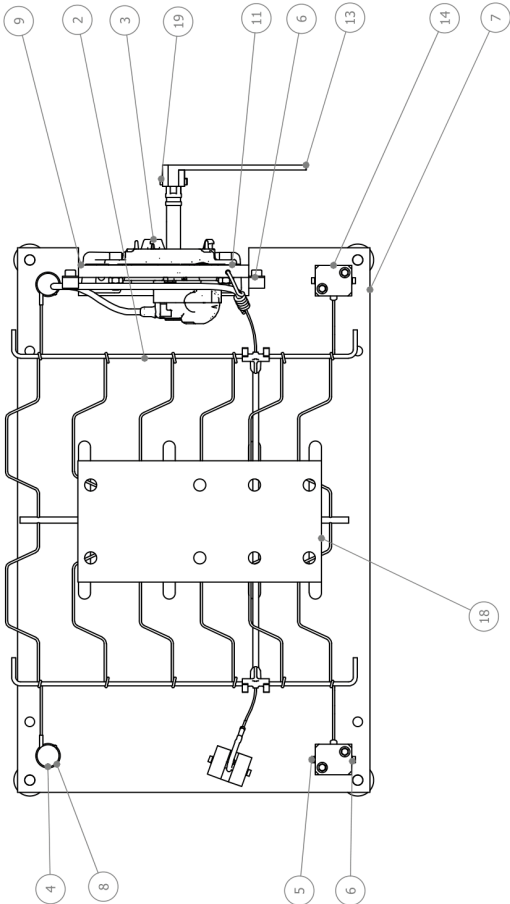
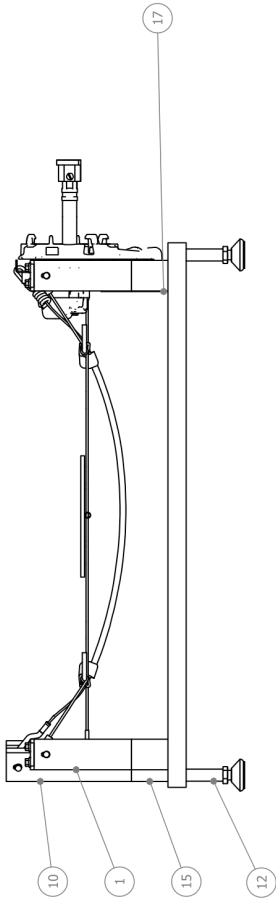
Este desenho é propriedade do Grupo PR. Todos os direitos reservados. É proibido copiar ou dar a terceiros sem a nossa permissão escrita. This drawing is property of PR Group. All rights reserved. It is forbidden to copy or let to third parties without our written consent.



## **Anexo E: Desenhos de definição e de conjunto do banco de ensaios**

### **E.8: Desenho de conjunto do banco de ensaios**

| HISTÓRICO DE REVISÕES (REVISION HISTORY) |             |             |                         |
|------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|
| ÍNDICE (INDEX)                           | DATA (DATE) | NOME (NAME) | DESCRIÇÃO (DESCRIPTION) |
| 1                                        | 18/03/2022  | Daniel M.   |                         |



| LISTA DE PEÇAS (PARTS LIST)                                                 |              |                                                     |                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|
| ITEM                                                                        | QTD. (QTY.)  | REFERÊNCIA (PART NUMBER)                            | MATERIAL                                 |
| 1                                                                           | 2            | Castelo vertical                                    | CK45 (F10)                               |
| 2                                                                           | 1            | 2943098X BACKREST SUSPENSION_MAT_WITH_LUMBAR_XDD_RH | Generic                                  |
| 3                                                                           | 1            | 1227343X CHAPE_ZAMAC_CMFL_DROIT                     | Generic                                  |
| 4                                                                           | 2            | Pino                                                | CK45 (F10)                               |
| 5                                                                           | 3            | Cavilha                                             | Aço Prata                                |
| 6                                                                           | 2            | Castelo fixação                                     | CK45 (F10)                               |
| 7                                                                           | 1            | Mesa                                                | Alumínio                                 |
| 8                                                                           | 2            | Castelo horizontal                                  | CK45 (F10)                               |
| 9                                                                           | 1            | Chapa fixação                                       | Generic                                  |
| 10                                                                          | 1            | Castelo vertical cabo                               | CK45 (F10)                               |
| 11                                                                          | 2            | Casquilho                                           | Alumínio                                 |
| 12                                                                          | 4            | Levelling elements LSX-A-26-10-AS-M1Dx45            | Alumínio                                 |
| 13                                                                          | 1            | Brço                                                | Alumínio                                 |
| 14                                                                          | 2            | Tampa castelo vertical                              | Alumínio                                 |
| 15                                                                          | 3            | Calço castelo vertical                              | Alumínio                                 |
| 16                                                                          | 2            | Calço castelo fixação                               | Alumínio                                 |
| 17                                                                          | 2            | Calço castelo horizontal                            | Alumínio                                 |
| 18                                                                          | 1            | Mini form                                           | Alumínio                                 |
| <b>Banco de ensaios</b>                                                     |              |                                                     |                                          |
| Projektor: (Designed by)                                                    | Data: (Date) | Nome: (Name)                                        | NºDesenho: (Drawing n.)                  |
| Desenho: (Drawn by)                                                         | 18/03/2022   | Daniel M.                                           | Projeto: (Project)                       |
| Modificou: (Modified by)                                                    | 18/03/2022   | Daniel M.                                           | Conjunto: (Assembly)                     |
| Tolerâncias ISO 8015 (Tolerances ISO 8015)                                  |              |                                                     | Tratamento Térmico: (Heat treatment)     |
| Tolerâncias gerais ISO 2768 - mK (General tolerances ISO 2768 - mK)         |              |                                                     | <b>Sem Tratamento</b>                    |
| Rugosidade geral ISO 1302 (General roughness ISO 1302)                      |              |                                                     | Acabamento Superficial: (Surface finish) |
| Cantos e chanfros gerais ISO 13715 (Corners and general chamfers ISO 13715) |              |                                                     | <b>Sem Acabamento</b>                    |
| Sub-conjuntos: (Sub-assembly)                                               |              |                                                     | Cliente: (Client)                        |
| Escala: (Scale)                                                             |              |                                                     | 1 : 4                                    |
| Folha: (Sheet size)                                                         |              |                                                     | A3                                       |
| Massa: (Mass)                                                               |              |                                                     | N/A                                      |
| Qtd.: (Qty.)                                                                |              |                                                     | 1                                        |
| Grupo                                                                       |              |                                                     | PR                                       |