

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGEM

**Comportamento Mecânico de Polímero Termoplástico para Aplicação em
Engrenagem Automotiva**

Alexandre Luís Gasparin

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2004

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGEM

Comportamento Mecânico de Polímero Termoplástico para Aplicação em
Engrenagem Automotiva

Alexandre Luís Gasparin
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2004

Essa Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Madalena de Camargo Forte

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Roberto Cauduro – DEMC/CCET/UCS

Prof. Dr. Luís Alberto dos Santos – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira
Coordenador do PPGEM

Dedico a Deus
À Marivete e ao Moacir
À Estela e ao Gustavo

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram na elaboração desse trabalho, o meu reconhecimento.

À Profa. Maria Madalena Camargo Forte pela orientação e pelo companheirismo em minha jornada.

Aos Engenheiros Sandro Adolfo Trentin, Fabiano Diesel e Fabrício Colvara Borges da empresa Jost Brasil por permitirem uma parceria valiosa para a execução do trabalho.

Ao Sr. Israel Barreira Motta da empresa Rhodia pela doação do material *Technylstar*.

Ao Engenheiro Moacir Luiz Gasparin pela injeção dos cilindros na empresa MAGPLAST e pelo exemplo de vida.

Ao Sr. Raul Carniel da empresa MCA pela usinagem dos cilindros termoplásticos.

Aos colegas Maira Finkler, Jorge Ferreira Gomes, Pedro Barrionuevo Roese, Ana Paula Rodrigues Pedrozo, Márcia Regina Becker, Gláucio de Almeida Carvalho e César Gabriel Angeletti pelas valiosas contribuições dadas ao trabalho.

Ao Prof. Albano Luiz Weber pelo incentivo e apoio.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
RESUMO.....	XII
ABSTRACT	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 ENGRENAGENS: UMA VISÃO GERAL.....	4
2.2 ENGRENAGEM TIPO PARAFUSO SEM FIM	10
2.3 PLÁSTICOS DE ENGENHARIA	14
2.3.1 Polipropileno.....	19
2.3.2 Poliamidas ou náilons	22
2.3.3 Poliésteres de cristal líquido	27
2.4 APLICAÇÃO DE PLÁSTICOS DE ENGENHARIA EM ENGRENAGENS	29
3 OBJETIVO.....	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 MATERIAIS, ESPECIFICAÇÃO E ORIGEM	37
4.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	38
4.2.1 Injeção dos corpos-de-prova	38
4.2.2 Usinagem dos corpos-de-prova.....	39
4.2.3 Condicionamento dos corpos-de-prova.....	39
4.3 TÉCNICAS TERMO-ANALÍTICAS.....	40
4.3.1 Análise termogravimétrica (TGA)	40
4.3.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC).....	40
4.3.3 Análise dinâmico-mecânica (DMA)	41
4.4 REOMETRIA CAPILAR	42
4.5 ENSAIOS MECÂNICOS NORMALIZADOS	42
4.5.1 Ensaio de tração.....	43
4.5.2 Ensaio de flexão	43
4.5.3 Ensaio de impacto izod.....	43
4.5.4 Ensaio de abrasão e de intempérie.....	43
4.6 OBTENÇÃO DE TARUGO	44
4.7 GEOMETRIA DA ENGRENAGEM PARAFUSO SEM FIM	46
4.8 USINAGEM DA ENGRENAGEM PROTÓTIPO.....	47
4.9 ENSAIO EM BANCADA DE TESTE DO PORTA-ESTEPE	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS POLÍMEROS.....	54
5.2 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS AMOSTRAS	57
5.2.1 Resistência à tração.....	58
5.2.2 Resistência à flexão	61
5.2.3 Resistência ao impacto	63
5.2.4 Resistência à abrasão e às intempéries	64
5.3 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO-DINÂMICO DAS AMOSTRAS	69
5.4 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS POLÍMEROS	74
5.5 AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DA ENGRENAGEM	77
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80

6 CONCLUSÕES	81
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXO 1 – TERMOGRAMAS DE DSC	89
Anexo 1.1 – Termograma do Polipropileno.....	89
Anexo 1.2 – Termograma da PA 6 com 15% de FV.....	89
Anexo 1.3 – Termograma da PA 6 com 30% de FV.....	90
Anexo 1.4 – Termograma da PA 66 sem fibra.....	90
Anexo 1.5 – Termograma da PA 66 com 15% de FV.....	91
Anexo 1.6 – Termograma da PA 66 com 30% de FV.....	91
Anexo 1.7 – Termograma da PA <i>Technylstar</i> com 60% de FV.....	92
Anexo 1.8 – Termograma do LCP <i>Vectra</i> com 25% de grafite.....	92
ANEXO 2 – TERMOGRAMAS DE TGA	93
Anexo 2.1 – Termograma da PA 6 sem fibra.....	93
Anexo 2.2 – Termograma da PA 6 com 30% de fibra de vidro.....	93
Anexo 2.3 – Termograma da PA 66 com 15% de fibra de vidro.....	94
Anexo 2.4 – Termograma da PA 66 com 30% de fibra de vidro.....	94
Anexo 2.5 – Termograma da PA <i>Technylstar</i> com 60% de fibra de vidro.....	95
Anexo 2.6 – Termograma do LCP <i>Vectra</i> com 25% de grafite.....	95
ANEXO 3 – TABELAS E CURVAS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO	96
Anexo 3.1 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do polipropileno.....	96
Anexo 3.2 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 sem tratamento.....	97
Anexo 3.3 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 com tratamento.....	98
Anexo 3.4 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 com 15% de fibra de vidro sem tratamento.....	99
Anexo 3.5 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 com 15% de fibra de vidro com tratamento.....	100
Anexo 3.6 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 com 30% de fibra de vidro com tratamento.....	101
Anexo 3.7 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 sem tratamento.....	102
Anexo 3.8 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com tratamento.....	103
Anexo 3.9 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com 15% de fibra de vidro sem tratamento.....	104
Anexo 3.10 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com 15% de fibra de vidro com tratamento.....	105
Anexo 3.11 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com 30% de fibra de vidro sem tratamento.....	106
Anexo 3.12 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com 30% de fibra de vidro com tratamento.....	107
Anexo 3.13 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do <i>Technylstar</i> com 60% de fibra de vidro sem tratamento.....	108
Anexo 3.14 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do <i>Technylstar</i> com 60% de fibra de vidro com tratamento.....	109
Anexo 3.15 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do <i>Vectra</i> com 25% de grafite.....	110
ANEXO 4 – TABELAS E CURVAS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO	111
Anexo 4.1 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do polipropileno.....	111
Anexo 4.2 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 sem tratamento.....	112
Anexo 4.3 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 com tratamento.....	113
Anexo 4.4 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 com 15% de fibra de vidro sem tratamento.....	114
Anexo 4.5 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 com 15% de fibra de vidro com tratamento.....	115
Anexo 4.6 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 com 30% de fibra de vidro com tratamento.....	116
Anexo 4.7 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 sem tratamento.....	117
Anexo 4.8 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com tratamento.....	118
Anexo 4.9 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com 15% de fibra de vidro sem tratamento.....	119
Anexo 4.10 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com 15% de fibra de vidro com tratamento.....	120
Anexo 4.11 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com 30% de fibra de vidro sem tratamento.....	121
Anexo 4.12 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com 30% de fibra de vidro com tratamento.....	122
Anexo 4.13 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do <i>Technylstar</i> com 60% de fibra de vidro sem tratamento.....	123
Anexo 4.14 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do <i>Technylstar</i> com 60% de fibra de vidro com tratamento.....	124
Anexo 4.15 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do <i>Vectra</i> com 25% de grafite.....	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Engrenagens cilíndricas de dentes retos com engrenamento externo (a) ^[12] e interno (b) ^[13]	5
Figura 2.2: Engrenagem cilíndrica de dentes retos com cremalheira ^[13]	5
Figura 2.3: Engrenagens helicoidais com eixos paralelos (a) ^[12] e com eixos cruzados (b) ^[14]	6
Figura 2.4: Engrenagens cônicas com dentes retos (a) ^[12] , helicoidais (b) ^[14] e hipoidais (c) ^[14]	6
Figura 2.5: Engrenagens parafuso cilíndrico sem fim associado com coroa globóide (a) ^[14] e parafuso globóide sem fim associado com coroa globóide (b) ^[14]	7
Figura 2.6: Nomenclatura de engrenagem de dentes retos ^[15]	8
Figura 2.7: Representação esquemática de engrenagens de dentes retos, formando o ângulo de pressão ^[13]	8
Figura 2.8: Representação do ângulo de pressão e das forças resultantes do contato no engrenamento ^[16]	9
Figura 2.9: Geometria de engrenagem parafuso cilíndrico sem fim e coroa globóide ^[13]	11
Figura 2.10: Geometria de engrenagem parafuso cilíndrico sem fim de várias entradas e coroa globóide ^[13]	11
Figura 2.11: Aplicação em capa de DVD. Representação esquemática da estrutura química do mero do poliestireno ^[19]	15
Figura 2.12: Representação esquemática da estrutura química reticulada do fenol-formaldeído, o baquelite ^[18]	16
Figura 2.13: Aplicação em CD. Representação esquemática da estrutura química do mero de policarbonato ^[20]	17
Figura 2.14: Representação esquemática da estrutura química da poliamida aromática, kevlar, com aplicação em coletes à prova de balas ^[19]	18
Figura 2.15: A conformação helicoidal do polipropileno isotático - PPI (a), esquema da morfologia lamelar cruzada do PPI (b) e micrografia do PPI (c) ^[21]	20
Figura 2.16: Exemplos de aplicação de PP: pára-choques e painéis de automóveis, seringas descartáveis e fitas transparentes, respectivamente ^[21]	21
Figura 2.17: Peças em náilon presentes em veículos automotivos ^[3]	23
Figura 2.18: Representação esquemática dos monômeros e respectivos polímeros das poliamidas 6 e 66 ^[18]	24
Figura 2.19: Representação esquemática das cadeias em zigue-zague da PA 66 onde as linhas são seqüências de metileno (a) e respectivo esferulito (b) ^[22]	24
Figura 2.20: Representação esquemática dos monômeros e respectivo polímero de poliéster de cristal líquido ^[18]	27
Figura 2.21: Efeito da temperatura no estado nemático líquido cristalino, onde as linhas são seqüências de metileno ^[25]	28
Figura 2.22: Módulo de elasticidade <i>versus</i> resistência à tração para metais, cerâmicos, polímeros e compósitos ^[25]	30

Figura 2.23: Roda dentada de náilon da transmissão por correia da moto de corrida ^[27]	31
Figura 2.24: Máquina injetora e o ciclo do processo de moldagem por injeção ^[28]	35
Figura 4.1: Tarugos usados para usinagem do par de engrenagens parafuso sem fim	45
Figura 4.2: Dimensões do parafuso sem fim	46
Figura 4.3: Dimensões da coroa	46
Figura 4.4: Usinagem do parafuso sem fim (a) e da coroa (b)	47
Figura 4.5: Par de engrenagens parafuso sem fim.....	47
Figura 4.6: Fotos do porta-estepe montado na bancada (a) e da bancada que ilustra seus componentes (b)	48
Figura 4.7: Foto do par de engrenagens no mecanismo do porta-estepe.....	49
Figura 5.1: Fluxograma das etapas do desenvolvimento do trabalho	53
Figura 5.2: Termograma de DSC da amostra de PA 6 sem fibra de vidro	54
Figura 5.3: Termograma de TGA da amostra de PA 6 com 15% fibra de vidro	56
Figura 5.4: Tensão de tração <i>versus</i> deformação da amostra PA 6 com 30% de FV sem tratamento (05 corpos-de-prova).....	58
Figura 5.5: Tensão de flexão <i>versus</i> deformação da amostra PA 6 com 30% de FV sem tratamento (05 corpos-de-prova).....	61
Figura 5.6: Perda de massa relativa (%) das amostras sem e após exposição aos raios UVB e à condensação	67
Figura 5.7: Resistência à abrasão das amostras sem e com tratamento térmico.....	67
Figura 5.8: Resistência à abrasão das amostras sem e com tratamento térmico expostas aos raios UVB e à condensação de água	68
Figura 5.9: Módulo de armazenamento dos polímeros sem tratamento térmico <i>versus</i> temperatura (modo <i>single cantilever</i>).....	70
Figura 5.10: Módulo de armazenamento dos polímeros com tratamento térmico <i>versus</i> temperatura (modo <i>single cantilever</i>).....	71
Figura 5.11: Módulo de perda dos polímeros sem tratamento térmico <i>versus</i> temperatura (modo <i>single cantilever</i>).....	72
Figura 5.12: Módulo de perda dos polímeros com tratamento térmico <i>versus</i> temperatura (modo <i>single cantilever</i>).....	72
Figura 5.13: Tangente delta dos polímeros sem tratamento térmico <i>versus</i> temperatura (modo <i>single cantilever</i>).....	73
Figura 5.14: Tangente delta dos polímeros com tratamento térmico <i>versus</i> temperatura (modo <i>single cantilever</i>).....	74
Figura 5.15: Variação da taxa de cisalhamento em função da viscosidade aparente.....	76
Figura 5.16: Par de engrenagens em PA 6 com 30% de fibra de vidro, após 623 ciclos.....	78
Figura 5.17: Par de engrenagens em PA ramificada <i>Technylstar</i> com 60% de FV, desgaste do dente do pinhão (a) e desgaste da cavidade dos dentes da coroa (b), após 161 ciclos.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Denominação dos símbolos e formulário utilizados na caracterização geométrica da engrenagem parafuso cilíndrico sem fim e coroa globóide ^[13]	13
Tabela 2.2 – Classificação dos plásticos quanto a sua aplicação ^[18]	14
Tabela 4.1 – Parâmetros de injeção por material termoplástico.....	38
Tabela 4.2 – Temperaturas e calor de fusão de referência (ΔH_f°) das amostras, na análise de DSC.	41
Tabela 4.3 – Parâmetros de injeção dos tarugos por material termoplástico.....	45
Tabela 5.1 – Temperatura de fusão e cristalização, e respectivas faixas e percentual de cristalinidade dos materiais termoplásticos pré-selecionados	55
Tabela 5.2 – Temperatura de decomposição, perda de massa e resíduo dos polímeros pré-selecionados	57
Tabela 5.3 – Valores de tensão, deformação, módulo e energia dos cinco corpos-de-prova da PA 6 com 30% de FV sem tratamento, para o ensaio de tração	59
Tabela 5.4 – Limites de resistência à tração e módulo de elasticidade por amostra	59
Tabela 5.5 – Valores de tensão, deformação, módulo e energia de flexão dos cinco corpos-de-prova da PA 6 com 30% de FV sem tratamento.....	62
Tabela 5.6 – Limites de resistência à flexão e módulo de elasticidade por amostra.....	63
Tabela 5.7 – Energia absorvida e resistência ao impacto por material	64
Tabela 5.8 – Perda de massa relativa (%) por material.....	65
Tabela 5.9 – Viscosidade de cisalhamento das amostras de PA 6 e 66 e PA <i>Technylstar</i> com FV	75

LISTA DE SÍMBOLOS

DMA – Análise Dinâmico-Mecânica

DSC – Calorimetria Diferencial de Varredura

FV – Fibra de Vidro

G' – Módulo de armazenamento

G'' – Módulo de perda

ΔH_f – Calor de fusão

ΔH_f° – Calor de fusão de um padrão de polímero 100% cristalino

IF – Índice de Fluidéz

J – Joules

LCP – Polímero de Cristal Líquido

m – Módulo da engrenagem

N – Newtons

P – Diametral pitch

PA – Poliamida

PP – Polipropileno

RH – Umidade relativa

rpm – rotações por minuto

$\tan \delta$ – Tangente delta

T_f – Temperatura de fusão

T_g – Temperatura de transição vítrea

TGA – Análise Termogravimétrica

X_c – Percentual de cristalinidade

W – Watts

α – Ângulo de pressão

γ – Deformação por cisalhamento

$\dot{\gamma}$ – Taxa de cisalhamento

η – Viscosidade aparente

η_0 – Viscosidade Newtoniana

λ – Ângulo de hélice

τ – Tensão de cisalhamento

RESUMO

Polímeros de engenharia foram avaliados para aplicação no par de engrenagens parafuso sem fim do porta-estepe de caminhão. A fim de suportar o carregamento de forma eficiente, dispensando lubrificantes e considerando um custo de fabricação competitivo para a engrenagem de um porta-estepe, foram pré-selecionados nove polímeros: um polipropileno, as poliamidas (PA) 6 e 66, de cadeia molecular linear, sem e com 15 e 30% de fibra de vidro (FV), uma poliamida de cadeia molecular ramificada, tipo estrela com 60% de fibra de vidro e um poliéster com 25% de grafite. Esses termoplásticos foram avaliados para selecionar o polímero com a melhor performance para a fabricação do par de engrenagens. O trabalho foi dividido em três etapas. A primeira consistiu na confecção de corpos-de-prova e análise dos polímeros quanto às resistências à tração e à flexão, resistência ao impacto Izod, análise dinâmico-mecânica (DMA) e resistência à abrasão. Os materiais selecionados, com o melhor conjunto de propriedades nessa etapa foram as PA 6 e 66 ambas com 30% de FV e também a PA com 60% de FV. Na segunda etapa, esses polímeros foram avaliados quanto às características reológicas. Os materiais com as melhores características reológicas foram a PA 6 com 30% de FV e a PA com 60% de FV. A terceira etapa consistiu em teste em bancada a partir da confecção de pares de engrenagens, sendo os materiais selecionados injetados em forma de tarugos e após usinados. Foram feitas três combinações com as duas PA selecionadas para ensaio em bancada. Na primeira utilizou-se a PA 6 com 30% de FV no pinhão e na coroa; após 623 ciclos, houve falha do par de engrenagens com ruptura do dente do pinhão. Na segunda combinação, o pinhão e a coroa em PA com 60% de FV; em 161 ciclos, teve a quebra do dente do pinhão. Na última combinação utilizou-se a PA com 60% de FV no pinhão e a PA 6 com 30% de FV na coroa, sendo que o par de engrenagens resistiu até 1200 ciclos sem ocorrer falha do sistema. Apesar da garantia do porta-estepe ser de seis meses, a estimativa do fabricante é de cinco anos de vida útil do par de engrenagens, tendo três trocas de pneu por mês; com isso, tem-se um total de 180 ciclos de aplicação desse mecanismo. Portanto, o pinhão em PA com 60% de FV e a coroa em PA 6 com 30% de FV apresentaram a melhor performance para a fabricação do par de engrenagens parafuso sem fim do porta-estepe de caminhão.

ABSTRACT

Engineering polymers were evaluated for application in the single enveloping worm gears of the truck spare wheel holder. In order to support loading in efficient form, eliminating grease and considering a competitive manufacture cost for the spare wheel holder gears, nine polymers were preselected: a polypropylene, the polyamides (PA) 6 and 66 of linear structure, without and with 15 and 30% of glass fibre (GF), respectively, a branched structure polyamide, type star, with 60% of GF and a polyester with 25% of graphite. These thermoplastics were analyzed in order to select the polymer with the best performance for the gears manufacture. The work was carried out in three stages. The first one consisted of the polymer specimens' manufacture and analyses properties, such as: tensile strength and modulus, flexural modulus and strength, impact Izod resistance, dynamic-mechanic behavior and wear test. The selected materials with the best set of properties in this stage were the PA 6 and 66, both with 30% of GF and the PA with 60% of GF. In the second stage, these polymers were evaluated regarding its reologic characteristics. The materials with better reologic characteristics were the PA 6 with 30% of GF and the PA with 60% of GF. The third stage consisted of bench test, through the assembly of pairs of gears in the spare wheel holder. The materials selected were molded in billets form and after machined to acquire the worm gears form. Three combinations with the two polyamides selected were made for the testing bench. In the first one, PA 6 with 30% of GF was used in the pinion and in the gear; after 623 cycles, there is failure of the pair of gear with rupture of the pinion tooth. In the second combination, both pinion and gear were made with PA with 60% of GF and there was break of the pinion tooth, after 161 cycles. The last combination consisted of using PA with 60% of GF in the pinion and PA 6 with 30% of GF in the gear; this pair of gears resisted 1200 cycles without the system failure. In spite of the six months spare wheel holder guarantee, manufacturer estimative is about five years of useful gears life, considering three tire changes per month, which gives a total of 180 application cycles of the gears mechanism. So, the PA with 60% of GF pinion and the PA 6 with 30% of GF gear were the options with the best performance for the truck spare wheel holder gears.

1 INTRODUÇÃO

As engrenagens são amplamente aplicadas na indústria automotiva, desde a utilização em caixas de câmbio até limpadores de pára-brisa. A maneira como se transmite o movimento é o que torna esses componentes mecânicos especiais, podendo-se alterar a velocidade angular, o torque e até a direção de movimento de um eixo a outro de um par de engrenagens.

Nesse trabalho, foi objeto de estudo um par de engrenagens utilizado no aparelho de levantamento da roda estepe de caminhão, o porta-estepe. Esse equipamento é responsável pela fixação da roda estepe no chassi do caminhão, bem como pelo movimento vertical da roda no sentido de erguer ou baixar o estepe de maneira segura para efetuar a troca da roda ou a guarda do estepe. A frequência de uso desse equipamento é diretamente proporcional à quantidade de vezes em que são trocados os pneus do caminhão. De acordo com o fabricante, para uma utilização do porta-estepe estimada em três ciclos por mês, a duração do equipamento será em torno de cinco anos, estando sujeito, portanto, ao total de 180 ciclos.

O sistema de acionamento do porta-estepe utiliza um par de engrenagens do tipo coroa e parafuso sem fim. Esse tipo de engrenagem permite que o estepe permaneça imóvel ao cessar o torque dado pelo usuário, funcionando como um mecanismo de travamento e de segurança, impedindo a queda brusca do estepe no chão e facilitando o manuseio do equipamento.

O par de engrenagens tipo coroa e parafuso sem fim tem a peculiaridade de transmitir movimento em eixos perpendiculares, porém isso implica esforços variados nos dentes das engrenagens. Podem ser citados os esforços de compressão e tração resultantes da flexão dos dentes em contato. O atrito também exerce um importante papel no funcionamento da engrenagem, uma vez que o movimento relativo entre a coroa e o parafuso sem fim não é puro rolamento^[1]. À medida que o dente desgasta, seja por perda de massa ou por deformação do perfil

original, a variação das dimensões neste poderá afetar significativamente a distribuição de tensões no conjunto de engrenagens, o que diminui a performance e a vida útil do componente mecânico.

O material do par de engrenagens influencia a resistência mecânica, o processo de fabricação e o custo do mecanismo. Por exemplo, as engrenagens plásticas comparadas às metálicas possuem menor densidade e ruído, além da alta produtividade que o processo de injeção de termoplásticos proporciona, se comparado ao processo de usinagem dos materiais metálicos. É possível fabricar várias peças por ciclo, através do uso de várias cavidades no molde de injeção de termoplásticos, enquanto que no processo de usinagem, normalmente, fabrica-se uma peça por vez.

Os polímeros termoplásticos têm a grande vantagem da facilidade de processamento ou transformação pelo calor. As suas propriedades podem ser modificadas ou não pela adição de aditivos aos mesmos, os quais conferem ao polímero propriedades diferenciadas. A rigidez desses materiais tem sido aumentada pela adição de cargas ou fibras a esses, apesar de, em alguns casos, ter-se a diminuição da resistência ao impacto e o aumento da abrasividade.

A utilização de polímeros em peças de engenharia tem crescido nos últimos anos, sendo os setores eletrônico e automobilístico um dos principais usuários desses materiais.

O plástico é um material de alto desempenho mecânico e baixo custo; com o polímero termoplástico pode-se integrar um grande número de componentes em uma só peça, com uma única etapa de fabricação, a injeção^[3].

O polipropileno (PP), apesar de estar na categoria dos plásticos de uso comum, é produzido em larga escala e é facilmente processado. Sendo muito utilizado em pára-choques e painéis de automóveis, além de novos produtos, como os absorvedores de choque para veículos automotivos, que se localizam logo atrás

do pára-choque e também são fabricados de PP^[4]. O uso em partes automotivas corresponde a 15% da demanda de polipropileno no mercado^[5] e por apresentar características mecânicas superiores a outros polímeros da mesma categoria; como o polietileno, esse polímero tem sido utilizado na indústria automobilística para confecção de peças técnicas.

As poliamidas ou os náilons, como são conhecidas, representam um dos principais polímeros utilizados industrialmente, além de terem sido os primeiros termoplásticos utilizados em engenharia. Os náilons 6 e 66 respondem por aproximadamente 90% do consumo mundial do mercado de poliamidas^[5]. A marca Nylon é uma marca registrada da empresa DuPont. Polímeros reforçados com fibras de vidro ou de carbono são excelentes materiais, em termos de altos níveis de rigidez, tenacidade e resistência termo-mecânica, em relação aos polímeros sem carga^[6,7]. Os polímeros de engenharia de alto desempenho, como exemplo o *Vectra*, um poliéster de cristal líquido, são usados tanto na indústria automotiva como na eletrônica^[5]. E, segundo o fabricante, é indicado para a fabricação de engrenagem podendo ser adicionada carga mineral para melhorar a rigidez e a resistência mecânica do material^[8]. A marca *Vectra* é uma marca registrada pela empresa Ticona.

Diversos trabalhos foram feitos a respeito de engrenagens plásticas, avaliando-se a performance desses mecanismos^[9-11]. Não foi encontrada na literatura uma abordagem com o intuito de selecionar diversos materiais termoplásticos de estrutura química e propriedades diferentes, para aplicação no tipo específico de engrenagem tipo coroa e parafuso sem fim.

Os materiais utilizados nesta dissertação foram o polipropileno puro, as poliamidas náilon 6 e 66 sem e com 15 e 30% de fibra de vidro, respectivamente, a poliamida *Technylstar* com 60% de fibra de vidro e o poliéster de cristal líquido *Vectra* com 25% de grafite. Estes foram avaliados quanto às suas propriedades mecânicas para a seleção de um material termoplástico adequado à aplicação em engrenagem tipo coroa e parafuso sem fim.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Engrenagens: uma visão geral

A transmissão de movimento de um par de engrenagens permite alterar a velocidade angular, o torque e até a direção de movimento de um eixo a outro de uma engrenagem. Isso é possível devido à geometria desses componentes mecânicos. Esses elementos de transmissão de movimento e torque permitem a redução ou o aumento do momento de torção, com perdas pouco significativas de energia, por não permitirem patinação. Pode-se aumentar ou reduzir velocidades de rotação, propriedade fundamental em determinados mecanismos como a caixa de câmbio de um automóvel, por exemplo.

Dentre as variadas combinações de geometria pode-se classificar em quatro os tipos principais de engrenagem^[1]:

1. *Engrenagens cilíndricas de dentes retos*: possuem os dentes paralelos ao eixo de rotação e são usadas para transmitir movimento de um eixo a outro paralelo; os dentes são formados sobre uma superfície cilíndrica.
2. *Engrenagens cilíndricas helicoidais*: possuem os dentes inclinados em relação ao eixo de rotação e são usadas para transmitir tanto movimento de um eixo a outro paralelo quanto de um eixo a outro não paralelo; os dentes são formados sobre uma superfície cilíndrica.
3. *Engrenagens cônicas*: possuem os dentes que podem ser retos, helicoidais e hipoidais, porém são formados sobre uma superfície cônica e são usadas para transmitir movimento entre eixos onde as linhas de centro podem se interceptar ou não.
4. *Engrenagens tipo parafuso sem fim*: o nome é sugestivo para definir como são os dentes do sem fim, ou seja, similares aos de um parafuso. São montadas, na grande maioria dos casos, para transmitir movimento em eixos que não se interceptam e que formam um ângulo de 90°.

Os quatro tipos principais de engrenagem geram outras maneiras de engrenamento, conforme mostram as Figuras 2.1 a 2.6.

As engrenagens cilíndricas (Figura 2.1) com dentes retos externos são muito usadas em transmissões que requerem mudança de posição dos eixos das engrenagens em serviço, pois são fáceis de engatar. São mais usadas nas transmissões de baixa rotação do que nas de mais alta, por causa do ruído que produzem. O uso das engrenagens cilíndricas com dentes retos internos é em transmissões planetárias, permitindo uma economia de espaço e distribuição uniforme de torque.^[12]

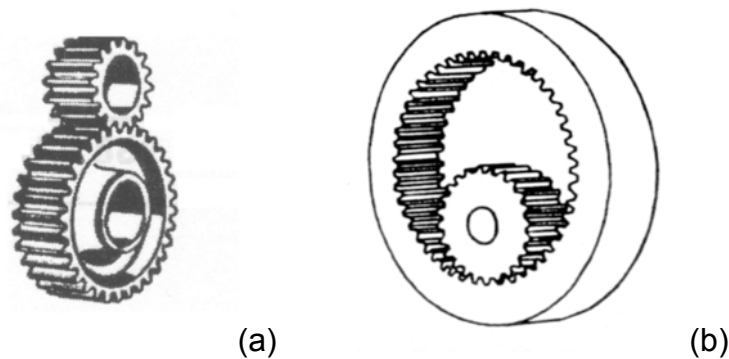


Figura 2.1: Engrenagens cilíndricas de dentes retos com engrenamento externo (a)^[12] e interno (b)^[13]

A engrenagem cilíndrica com cremalheira (Figura 2.2) é usada para transformar movimento giratório em longitudinal e vice-versa em casos onde as velocidades não são muito grandes^[12]. Por esse motivo é utilizada no sistema de direção do automóvel.

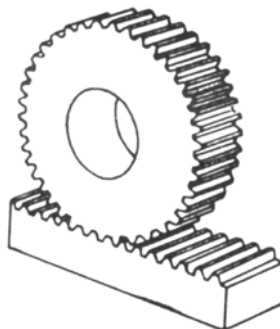


Figura 2.2: Engrenagem cilíndrica de dentes retos com cremalheira^[13]

As engrenagens cilíndricas com dentes espirais ou helicoidais (Figura 2.3) são usadas em transmissões fixas de rotações altas, em razão de serem silenciosas e duráveis. Têm, porém, um componente axial de força nos dentes que deve ser compensado pelo mancal ou rolamento. Permitem mudar a direção da força quando se inverte a posição de uma delas de 90° .^[12]

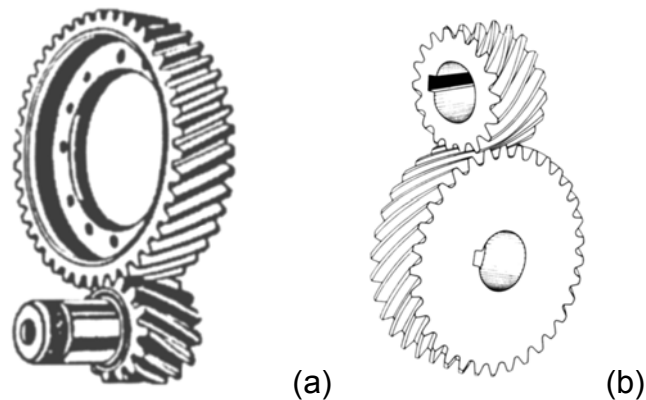


Figura 2.3: Engrenagens helicoidais com eixos paralelos (a)^[12] e com eixos cruzados (b)^[14]

As engrenagens cônicas com dentes retos são usadas para mudar a rotação e a direção do torque em baixas velocidades, sem impacto. As engrenagens cônicas com dentes espirais são usadas para mudar rotações e a direção da força, em transmissões com velocidades e esforços grandes. Já as engrenagens cônicas com dentes hipoidais são usadas para mudar as rotações e a direção da força em diferenciais, onde é essencial a questão da altura do eixo propulsor^[12]. Observa-se, através da Figura 2.4, que os eixos de engrenagem do respectivo par não se interceptam somente na engrenagem cônica com dentes hipoidais.



Figura 2.4: Engrenagens cônicas com dentes retos (a)^[12], helicoidais (b)^[14] e hipoidais (c)^[14]

As engrenagens tipo parafuso sem fim são usadas para mudança de direção de torque e de velocidade, quando a redução desta e conseqüentemente o aumento de momento de torção forem muito grandes. Podem ser usadas em grandes caixas de redução de elevadores, por exemplo^[12]. As engrenagens parafuso globóide sem fim e coroa globóide da Figura 2.5 (b) são caracterizadas pelo mútuo envolvimento entre a coroa e o sem fim, enquanto que as engrenagens parafuso cilíndrico sem fim e coroa globóide da Figura 2.5 (a) são caracterizadas pelo envolvimento somente da coroa no sem fim^[14].

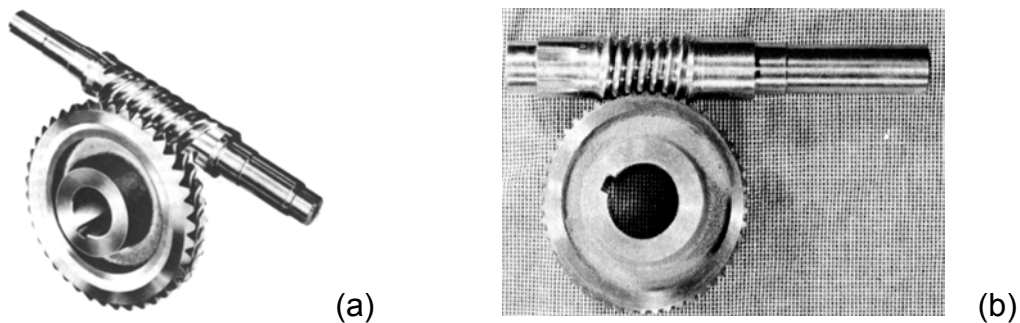


Figura 2.5: Engrenagens parafuso cilíndrico sem fim associado com coroa globóide (a)^[14] e parafuso globóide sem fim associado com coroa globóide (b)^[14]

O par de engrenagens é constituído por uma engrenagem de diâmetro primitivo maior denominada de coroa e outra de diâmetro primitivo menor denominada pinhão. No dimensionamento de um par de engrenagens, o pinhão é geralmente a engrenagem dimensionada, pois, se ele resistir ao esforço aplicado, a coroa suportará com folga a mesma carga por ser uma engrenagem maior^[13].

A terminologia de uma engrenagem é discutida através do modelo mais simples desse mecanismo: a engrenagem de dentes retos, ver Figura 2.1. A Figura 2.6 destaca o diâmetro primitivo, o círculo sobre o qual, usualmente, todos os cálculos de dimensionamento estão baseados^[1]. O passo circular é o resultado da espessura do dente mais o vão do dente. A altura do dente é definida como a soma das alturas de adendo e de dedendo, que são as distâncias radiais entre o topo do dente e o diâmetro primitivo, e entre o pé do dente e o diâmetro primitivo, respectivamente.

O módulo é a divisão do diâmetro primitivo pelo número de dentes, sendo o índice de tamanho de dente no sistema internacional, a unidade desse índice é milímetros por dente. O *diametral pitch* corresponde à divisão do número de dentes da engrenagem pelo seu diâmetro primitivo, a unidade usada é dentes por polegada, pois esse sistema está em unidades inglesas.^[1]

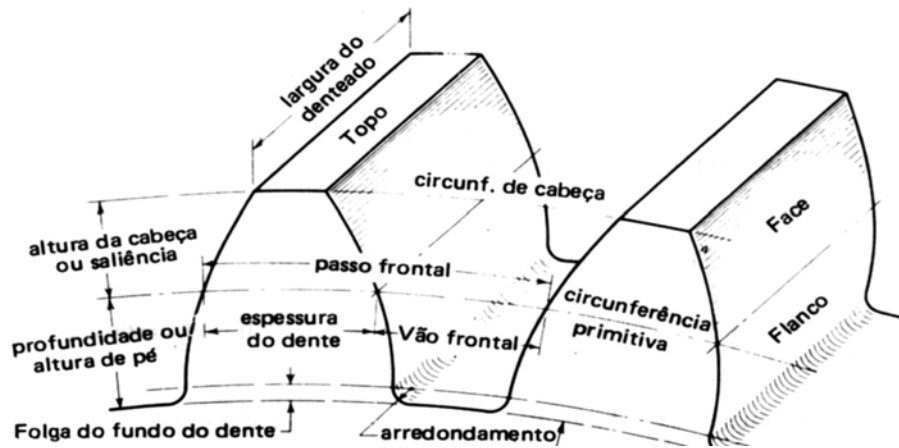


Figura 2.6: Nomenclatura de engrenagem de dentes retos^[15]

A linha de pressão representada na Figura 2.7 é definida como a linha formada pelos pontos de contato entre os dentes de um par de engrenagens. O ângulo formado pela linha de pressão localizada sobre os pontos A e B, e a tangente comum aos respectivos diâmetros primitivos do par de engrenagens em contato, é definido como o ângulo de pressão^[13].

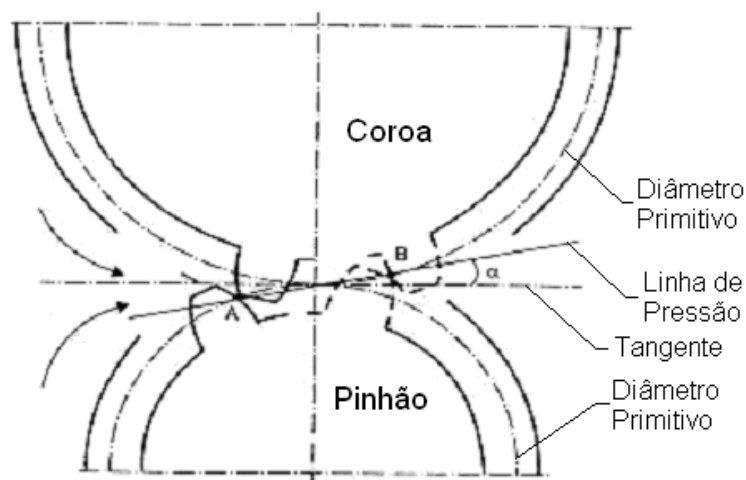


Figura 2.7: Representação esquemática de engrenagens de dentes retos, formando o ângulo de pressão^[13]

O ângulo de pressão define o formato do dente, enquanto que o módulo o tamanho do dente^[13]. Mantendo-se o diâmetro primitivo constante num engrenamento de uma engrenagem cilíndrica com uma cremalheira e, variando-se apenas o ângulo de pressão dos dentes, a evolvente ou o formato do dente varia de acordo como o ângulo de pressão^[16], como pode ser observado na Figura 2.8.

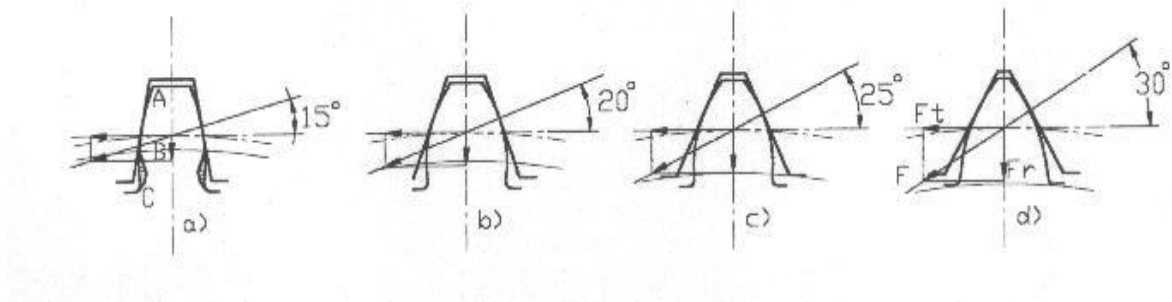


Figura 2.8: Representação do ângulo de pressão e das forças resultantes do contato no engrenamento^[16]

Ao aumentar o módulo de uma engrenagem, muda-se a altura do dente da engrenagem e o passo circunferencial, conforme demonstrado nas relações para engrenagens cilíndricas de dentes retos^[16], sendo que a altura do dente $h_z = 2,2.m$ e o passo circunferencial $t_o = \pi.m$, onde m é o módulo. Essas relações são estabelecidas segundo as normas DIN 862 e 867^[16].

Existem vários esforços que ocorrem numa transmissão de movimento por meio de um par de engrenagens. Essas forças são transmitidas de uma engrenagem a outra, através do contato entre os respectivos dentes da coroa e do pinhão. A flexão nos dentes do pinhão é fundamental para se avaliar a resistência do engrenamento, conforme a potência requerida para o mecanismo. À medida que ocorre o contato entre os dentes no ponto de contato A ou B (ver Figura 2.7), é aplicada uma força na direção da linha de pressão que resulta numa solitação sobre a estrutura da engrenagem e do sistema onde estão montadas as transmissões.

As forças tangencial e radial resultantes da decomposição da força de contato, localizada na linha de pressão, exercem solitações de flexão e de compressão nos dentes do par de engrenagens, respectivamente (ver Figura 2.8). O

dente deve ser projetado levando-se em conta essas solicitações. A flexão no dente é o resultado da aplicação de um momento fletor produzido pela força tangencial que gera solicitações de tração e compressão no pé do dente^[1,13].

A potência resultante do produto do torque pela velocidade de rotação da engrenagem, mais a relação de transmissão resultante da divisão do número de dentes da coroa pelo número de dentes do pinhão, constituem duas das principais grandezas no dimensionamento de pares de engrenagem. Variáveis como o material utilizado, o tempo de vida útil do par de engrenagens e o local de instalação e funcionamento do mecanismo também são fundamentais no projeto desses componentes mecânicos^[14].

2.2 Engrenagem tipo parafuso sem fim

Engrenagens tipo parafuso sem fim são caracterizadas por terem numa das engrenagens um parafuso. Essas engrenagens são montadas em eixos que não se interceptam e formam, normalmente, um ângulo de 90° entre si. A engrenagem parafuso sem fim tem capacidade maior de carregamento que a engrenagem helicoidal de eixos cruzados (ver Figuras 2.5 e 2.3, respectivamente), isso resulta do fato da primeira possuir uma linha de contato ao invés de ponto de contato entre os dentes observado na segunda^[14].

A diferença importante entre os pares de engrenagens tipo parafuso globóide sem fim e coroa globóide e os pares tipo parafuso cilíndrico sem fim e coroa globóide é que existe uma área de contato entre os dentes do primeiro par, enquanto que no segundo par existe somente uma linha de contato^[17]. Uma maior área ou região de contato aumenta a capacidade de carregamento suportado pelo par de engrenagens^[14].

A propriedade de reversão de movimento é definida como a troca da engrenagem motora, o parafuso, passando a ser a engrenagem movida pela coroa do par de engrenagens. Para que haja reversão é necessário que o ângulo da hélice λ seja igual ou maior que o ângulo de atrito α dos filetes, ou seja, $\lambda \geq \alpha$ ^[13], conforme esquema do par de engrenagens na Figura 2.9.

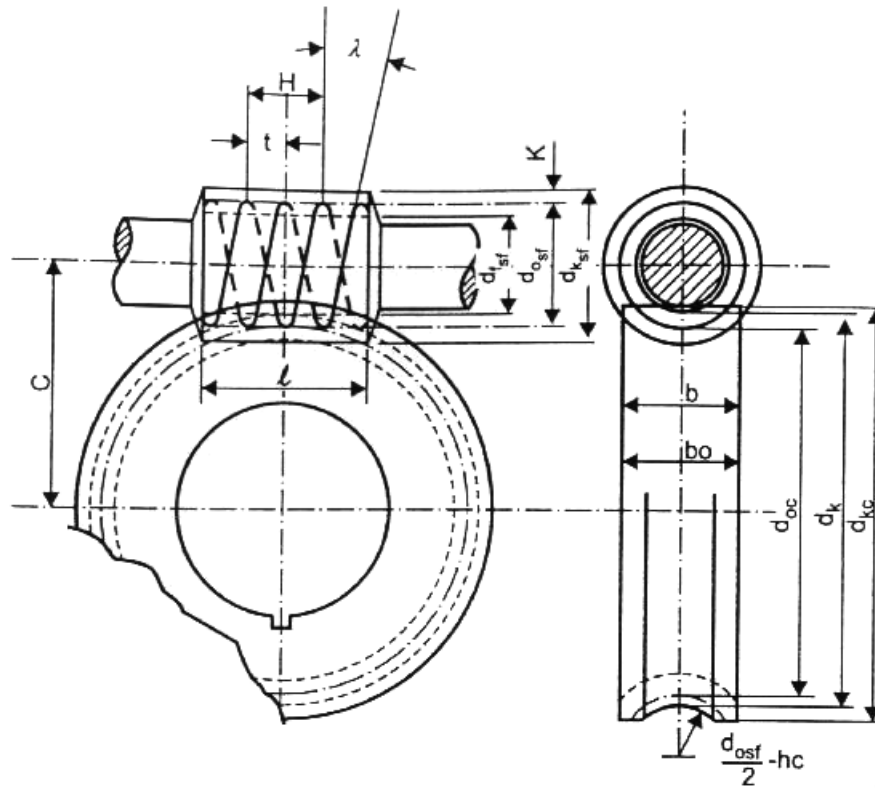


Figura 2.9: Geometria de engrenagem parafuso cilíndrico sem fim e coroa globóide^[13]

Na Figura 2.10, por exemplo, pode-se ver que o parafuso sem fim possui seis entradas. O número de entradas é definido como a quantidade de vãos entre os dentes em formas espirais formados na superfície do parafuso sem fim.

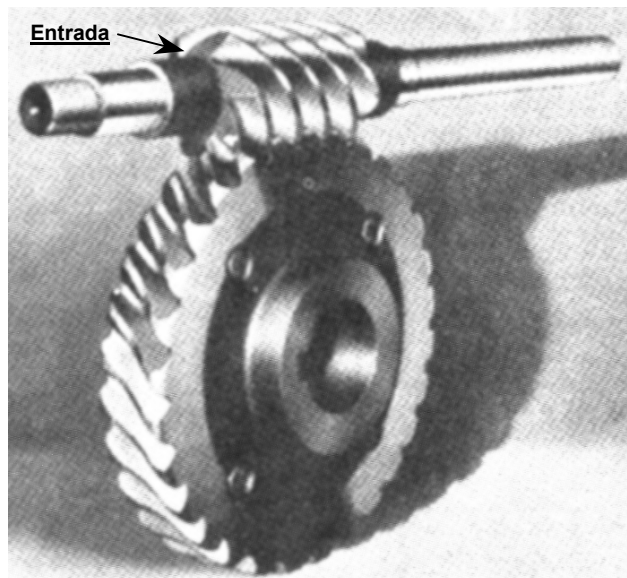


Figura 2.10: Geometria de engrenagem parafuso cilíndrico sem fim de várias entradas e coroa globóide^[13]

Os materiais de construção da presente engrenagem podem ser metálicos e também poliméricos. A aplicação da engrenagem parafuso cilíndrico e coroa globóide é o que vai determinar o tipo de material aplicado, uma vez que existem elevadores com redutores de aço e também redutores do limpador de pára-brisas de polímero.

As propriedades necessárias desse tipo de engrenagem devem ser suficientes para suportar a potência exigida pelo equipamento fabricado com esse mecanismo.

O material deve possuir resistência à flexão, à tração e ao desgaste suficiente para não ocorrer falha, considerando-se falhas as deformações permanentes ou as rupturas no par de engrenagens.

A necessidade de resistir à potência de aplicação deve ser coerente também com o custo, pois se sabe que, apesar de o aço possuir melhores propriedades mecânicas que a grande maioria dos polímeros, o processo de fabricação utilizando-se material metálico pode inviabilizar o projeto no contexto econômico.

A Tabela 2.1 mostra as variáveis ou os parâmetros que definem o dimensionamento e o formulário de cálculo das engrenagens tipo parafuso cilíndrico sem fim e coroa globóide.

Tabela 2.1 – Denominação dos símbolos e formulário utilizados na caracterização geométrica da engrenagem parafuso cilíndrico sem fim e coroa globóide^[13]

Denominação:	Símbolo:	Fórmula:
Módulo	m	$m = t / \pi$
Passo do sem fim	t	$t = m \cdot \pi$
Módulo normal	m_n	$m_n = m \cdot \cos \lambda$
Passo normal	t_n	$t_n = m_n \cdot \pi$
Ângulo da hélice	λ	$\operatorname{tg} \lambda = \frac{m \cdot n_{\text{esf}}}{d_{\text{ksf}}}$
Número de dentes da coroa	Z_c	$Z_c = \frac{d_{\text{oc}}}{m}$
Número de entradas do sem fim	n_{esf}	$n_{\text{esf}} = \frac{H}{t}$
Avanço do sem fim	H	$H = n_{\text{esf}} \cdot t$
Diâmetro primitivo do sem fim	d_{osf}	$d_{\text{osf}} = \frac{m_n \cdot n_{\text{esf}}}{\operatorname{sen} \lambda}$
Diâmetro primitivo da coroa	d_{oc}	$d_{\text{oc}} = m \cdot Z_c$
Altura da cabeça do dente	h_k	$\lambda < 15^\circ \Rightarrow h_k = m$ $\lambda \geq 15^\circ \Rightarrow h_k = m_n$
Altura do pé do dente	h_f	$\lambda < 15^\circ \Rightarrow h_f = 1,2 \cdot m$ $\lambda \geq 15^\circ \Rightarrow h_f = 1,2 \cdot m_n$
Altura total do dente	H	$\lambda < 15^\circ \Rightarrow h = 2,2 \cdot m$ $\lambda \geq 15^\circ \Rightarrow h = 2,2 \cdot m_n$
Diâmetro externo do sem fim	d_{ksf}	$d_{\text{ksf}} = d_{\text{osf}} + 2 \cdot h_k$
Diâmetro interno do sem fim	d_{fsf}	$d_{\text{ksf}} = d_{\text{osf}} - 2 \cdot h_f$
Diâmetro externo da coroa	d_{kc}	$d_{\text{kc}} = d_{\text{ke}} + m$
Diâmetro da cabeça da coroa	d_{ke}	$d_{\text{ke}} = d_{\text{oc}} + 2 \cdot h_k$
Diâmetro interno da coroa	d_{fc}	$d_{\text{fc}} = d_{\text{oc}} - 2 \cdot h_f$
Largura útil da coroa	B	$b = 2 \cdot m \cdot \sqrt{\frac{d_{\text{osf}}}{m} + 1}$
Largura da coroa	bo	$bo \cong b + m$
Comprimento do sem fim	ℓ	$\ell = 2 \cdot (1 + \sqrt{Z_c}) \cdot m$
Relação de transmissão	i	$i = \frac{n_{\text{esf}}}{n_c}$
Distância entre centros	C	$C = \frac{d_{\text{osf}} + d_{\text{oc}}}{2}$

2.3 Plásticos de engenharia

O conceito de plásticos de engenharia se aplica a todos os polímeros que podem ser usados em substituição aos materiais tradicionais de engenharia^[18]. As propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas e outras, como a densidade, são comparadas entre os materiais para avaliar a troca, visando a uma melhor performance, por exemplo, como melhor *design*, maior resistência ao impacto, melhor resistência às intempéries e até menor peso.

Os polímeros podem ser classificados em dois grandes grupos quanto à aplicação geral e de engenharia, conforme é mostrado na Tabela 2.2. Por sua vez os polímeros de uso geral são subdivididos em termoplásticos e termorrígidos, conforme suas características de fusibilidade, ou seja, o primeiro pode ser fundido e resfriado várias vezes, enquanto que o termorrígido após o primeiro aquecimento torna-se infusível. Os polímeros de engenharia podem ser de uso geral ou especial, cuja fusibilidade permite fácil processamento.

Tabela 2.2 – Classificação dos plásticos quanto a sua aplicação^[18]

Aplicação:	Grupo:	Principais plásticos:	Sigla:
Geral	Termoplástico	Poliétileno de alta e baixa densidade	PEAD e PEBD
		Polipropileno	PP
		Poliestireno	PS
		Poliestireno de alto impacto	HIPS
		Poli(metacrilato de metila)	PMMA
	Termorrígido	Resina epoxidílica	ER
		Resina poliéster	PETINS
		Resina de fenol-formaldeído	PR
		Poliuretanos*	PU
	Engenharia	Uso geral	Poliétileno de altíssimo peso molecular
Polipropileno			PP
Poli(óxido de metileno)			POM
Poli(tereftalato de etileno)			PET
Policarbonato			PC
Poliâmidas alifáticas			PA
Uso especial ou de alto desempenho		Poli(tetraflúor-etileno)	PTFE
		Poliésteres líquido-cristalinos	LCP
		Poliâmidas aromáticas	PA
		Poli(éter-éter-cetona)	PEEK
		Poli(aril-sulfona)	PAS

*Os poliuretanos podem ser termoplásticos e termorrígidos.

O polietileno de baixa densidade (PEBD) possui uma estrutura molecular ramificada que dificulta sua cristalização, enquanto o de alta densidade (PEAD) possui uma estrutura linear, o que facilita o empacotamento das moléculas e favorece a cristalização. O aumento da cristalinidade também aumenta a resistência mecânica, motivo pelo qual o PEAD é utilizado em bombonas d'água, enquanto o PEBD é utilizado para embalagens de alimentos e brinquedos em geral.

Outro plástico de uso geral é o poliestireno, que possui alta rigidez, baixa resistência ao impacto e pode ser transparente ou não. A presença do anel aromático, na sua estrutura química (ver Figura 2.11), aumenta a rigidez da cadeia molecular e a temperatura de transição vítrea. A alta rigidez e a baixa resistência ao impacto do poliestireno são devidas à sua aplicação abaixo da temperatura de transição vítrea de, aproximadamente 100°C, onde o polímero se comporta como um sólido rígido. A transparência é devido à ausência de cristalinidade do poliestireno, uma vez que esse é um material amorfo, por não apresentar uma cadeia estereoregular.

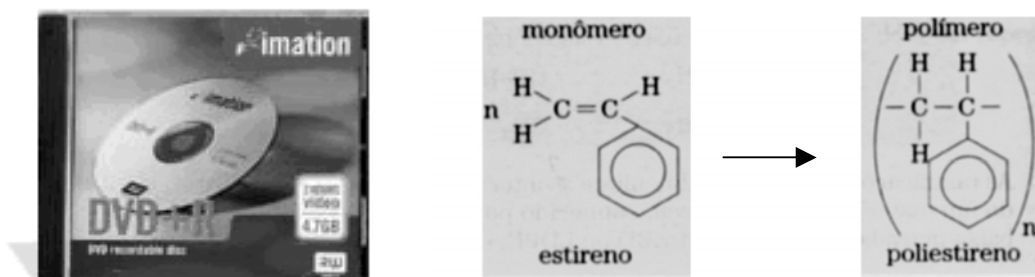


Figura 2.11: Aplicação em capa de DVD. Representação esquemática da estrutura química do monômero do poliestireno^[19]

O poliestireno de alto impacto (HIPS) é aplicado onde a resistência ao impacto e a rigidez são fatores importantes, por exemplo, em caixas ou carcaças de interruptores industriais e equipamentos eletroeletrônicos. O HIPS é um poliestireno modificado com borracha, normalmente o polibutadieno, que absorve melhor o impacto por ser um elastômero, enquanto que o PS é responsável pela rigidez necessária para garantir maior resistência mecânica do HIPS.

Grassi et al^[39] fizeram a correlação das propriedades, o módulo elástico e a resistência ao impacto com os aspectos morfológicos, a porcentagem da fase Gel e a porcentagem de polibutadieno, verificando-se que o estudo da morfologia do poliestireno de alto impacto (HIPS) é um dos principais fatores responsáveis pelo elevado desempenho desse copolímero^[39].

A estabilidade dimensional e a alta resistência mecânica e térmica da resina termorrígida do fenol-formaldeído ou baquelite são características necessárias em aplicações como engrenagens, pastilhas de freio e materiais elétricos, por exemplo. Os plásticos de uso geral termorrígidos possuem melhor estabilidade dimensional que os termoplásticos devido às ligações reticuladas ou cruzadas presentes nos termorrígidos que dificultam o movimento das cadeias moleculares, conferindo também alta resistência mecânica e térmica. Os monômeros de origem e a estrutura molecular do baquelite são mostrados na Figura 2.12.

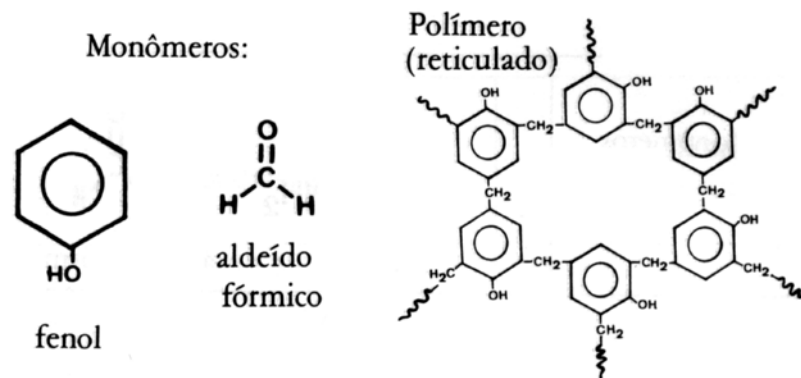


Figura 2.12: Representação esquemática da estrutura química reticulada do fenol-formaldeído, o baquelite^[18]

Os plásticos de engenharia de uso geral apresentam módulo elástico elevado a temperaturas relativamente altas e bom isolamento elétrico. A sua estrutura química permite uma ordenação estereoregular, que se reflete na cristalinidade e, conseqüentemente, no reforço das propriedades mecânicas, na resistência a reagentes químicos e a intempéries e também na alta estabilidade dimensional. Esses polímeros são aplicados em carcaça de chuveiros elétricos e de computadores, cintos de segurança de automóveis e engrenagens, por exemplo, o poli(óxido de metileno), ou poliacetato.

As poliamidas alifáticas são plásticos de engenharia de uso geral com aplicação em ventiladores para refrigeração de motores, velocímetros, cabos de martelo e até rodas de bicicleta. Esses polímeros de boa resistência à tração quando conformados com um pequeno diâmetro em relação a um grande comprimento formam fibras, sendo utilizados em roupas e fios para pesca.

O poliacetal, juntamente com as poliamidas alifáticas e o policarbonato são os plásticos de engenharia de uso geral mais consumidos mundialmente. O policarbonato possui semelhança ao vidro, ver Figura 2.13; porém, é mais resistente ao impacto, além de possuir boa estabilidade dimensional e resistência elétrica, boa resistência a intempéries e à chama. Por suas características é usado em lanternas de carros, CD para gravação de dados e partes internas de aeronaves. A transparência desse polímero é devida à sua baixa cristalinidade^[18].

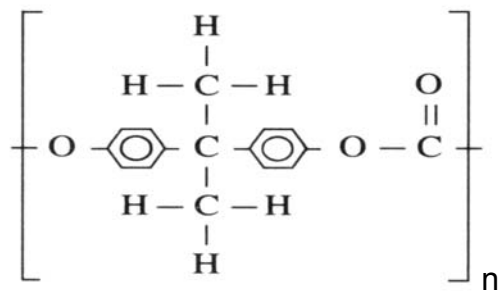
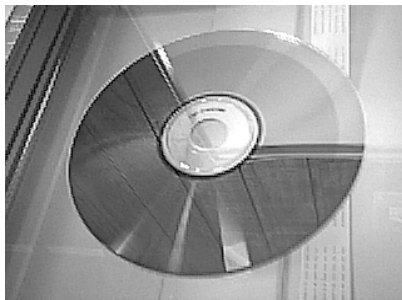


Figura 2.13: Aplicação em CD. Representação esquemática da estrutura química do mero de policarbonato^[20]

Os plásticos de engenharia de uso especial ou de alto desempenho começaram a surgir no final da década de 70, suas estruturas químicas foram planejadas para superar as propriedades dos plásticos de engenharia de uso geral^[18].

Os plásticos de alto desempenho apresentam estruturas lineares não reticuladas com cadeias macromoleculares formadas por anéis aromáticos sem ramificações pendentes na cadeia principal. A rigidez da cadeia faz com que esses apresentem alta resistência à tração, elevado módulo de elasticidade e baixa

deformação por tração ou compressão, devido à estrutura aromática ser pouco flexível. A ligação química C—C em anéis aromáticos exige uma energia de 520 kJ/mol, que é muito mais elevada que a requerida pela ligação alifática ou de cadeia aberta C—C, que necessita de 335 kJ/mol para romper a ligação; esse fator explica a alta resistência termomecânica^[18].

A boa estabilidade dimensional está relacionada à rigidez dos plásticos de alto desempenho, enquanto que a resistência às intempéries e à oxidação é devida à inexistência de ligações insaturadas nos segmentos que ligam os anéis aromáticos na cadeia e também à ausência de carbono terciário nesses segmentos^[18].

Os poliésteres líquido-cristalinos, pela sua resistência ao calor à temperatura de até 200°C e, devido a sua alta resistência mecânica, são aplicados na substituição a partes complexas de cerâmica ou metal, na indústria aeroespacial e em fornos de microondas^[18].

As poliamidas aromáticas, ver Figura 2.14, por possuírem excepcional resistência ao calor (550°C)^[18], elevada rigidez, são usadas como fibras, com excelentes propriedades dielétricas. Essas têm aplicação em substituição ao asbesto em roupas para bombeiros, em coletes e capacetes à prova de bala e no isolamento elétrico de motores.

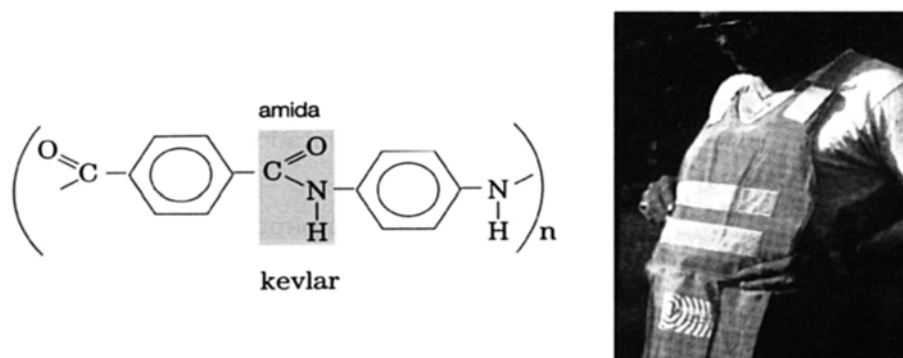


Figura 2.14: Representação esquemática da estrutura química da poliamida aromática, kevlar, com aplicação em coletes à prova de balas^[19]

As policetonas são outro importante exemplo de polímeros de engenharia especiais que possuem grande resistência a produtos corrosivos e alta resistência mecânica, por serem aplicáveis em partes estruturais de aeronaves, cabos de nave espacial, conectores em planta de energia nuclear e válvulas e bombas para líquidos corrosivos.

Através da correlação entre a propriedade e a estrutura molecular, pode-se entender melhor as características especiais de determinados polímeros de modo a selecioná-los melhor para uma determinada aplicação.

2.3.1 Polipropileno

Em meados dos anos 50 houve diversificação de novos processos e novos produtos devido à transformação do polipropileno até então obtido, ou seja, um óleo com cadeia molecular ramificada de baixo peso molecular com pouco interesse comercial, num polímero estereoregular semicristalino com alto peso molecular e elevado interesse comercial. Esse fato ocorreu graças às descobertas de Ziegler e Natta que, através da catálise produziram polipropilenos estereoregulares, aumentando o peso molecular do polímero e tornando-o semicristalino^[21]. A produção de itens moldados pelo processo de injeção e a melhoria das propriedades mecânicas foram possíveis devido à alta cristalinidade do polipropileno.

A cristalinidade de um polímero é um fator crítico e determinante da sua morfologia. O grau de cristalinidade do homopolímero de PP é governado primariamente pela microestrutura de sua cadeia. A conformação da cadeia do PP é helicoidal, conforme mostra a Figura 2.15 (a), e a cristalização das cadeias estereoregulares (isotáticas e sindiotáticas), pelo pagueamento e empacotamento ordenado destas pode resultar em um alto teor de cristalinidade, na faixa de 40% a 70%. A cristalinidade de um polipropileno atático em um caso extremo é nula^[21].

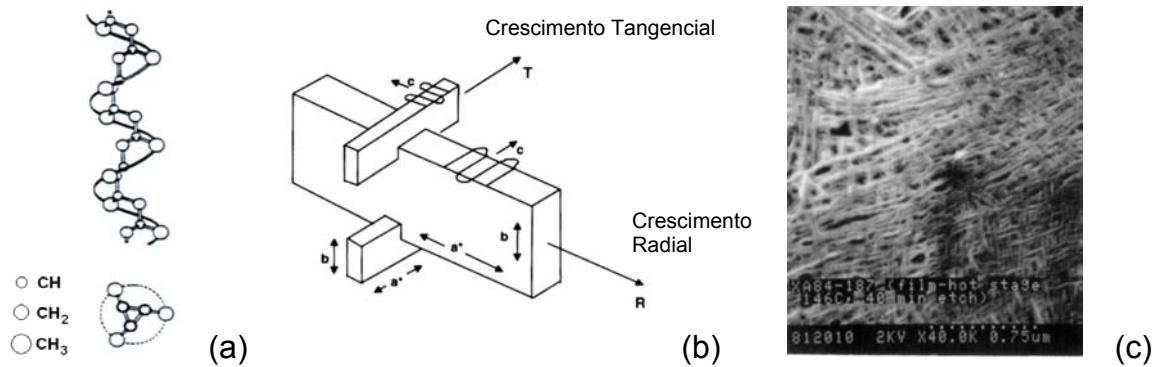


Figura 2.15: A conformação helicoidal do polipropileno isotático - PPi (a), esquema da morfologia lamelar cruzada do PPi (b) e micrografia do PPi (c)^[21]

O PP pode ser tratado como mercadoria (*commodity*) ou como especialidade (*speciality*). O PP como mercadoria é mais comum, com alto volume de produção. Já o PP como especialidade requer capacidade de produção mais flexível e uma relação mais complexa com a sua aplicabilidade ou finalidade. O PP com boa resistência ao impacto à baixa temperatura e o PP com alta transparência são exemplos de especialidades, ambos produzidos segundo condições específicas ou especiais do processo de polimerização^[21]. Os compostos de PP possuem grande aplicabilidade como plásticos de engenharia, podendo ser carregados ou não.

O PP é utilizado em diversas áreas que vão desde utensílios domésticos, equipamentos automotivos até equipamentos hospitalares. Alguns exemplos são fornecidos na Figura 2.16, porém ainda é muito mais amplo o campo de aplicação desse polímero.

As propriedades e o custo competitivo fazem com que o PP apareça em tapetes, devido à sua resistência à mancha e à facilidade de pigmentação para se colorir esse componente doméstico. Assim também ocorre em sacolas plásticas, onde fitas estreitas ou rafia de PP são trançadas para formar o tecido que, além de leve possui considerável resistência mecânica. O tecido de PP pode ser produzido por termo-moldagem, onde fios de PP são pré-fabricados e depois prensados à quente, esse tecido possui aplicação em fraldas descartáveis e em roupas cirúrgicas descartáveis^[21].

A densidade do PP é inferior à da água, logo cordas desse material são usadas com aplicações náuticas; desse modo, as cordas flutuam e permanecem visíveis sobre a água^[21]. Seringas descartáveis, tampas de garrafas, malas, galões ou garrafas são aplicações do uso do PP injetado em molde metálico. Apesar de não inibir a passagem de oxigênio, o PP possui excelente resistência à transmissão de umidade; por isso, em embalagens contendo alimentos perecíveis deve-se colocar uma camada de outro material sobre o PP, evitando-se assim a passagem de oxigênio. Além disso, devido à sua tenacidade e resistência ao rasgamento, as embalagens podem ter paredes finas economizando-se material^[21]. Por esses motivos é também utilizado em fraldas descartáveis.

O PP, devido à resistência química, rigidez, estética e à durabilidade, foi utilizado em equipamentos domésticos, por exemplo, na máquina de lavar louças, onde está sujeito à água quente, detergentes e a solicitações mecânicas^[21].

A possibilidade de se produzir filmes, no processo de injeção por sopro, que podem ser biorientados e ainda opacos, fornecendo assim alta resistência ao rasgamento e aos raios UV, respectivamente, foi de grande importância para a utilização em embalagens de biscoito, salgadinhos e até de cigarros. O processo de extrusão com resfriamento rápido produz filmes com excelente transparência^[21], conforme mostra Figura 2.16.

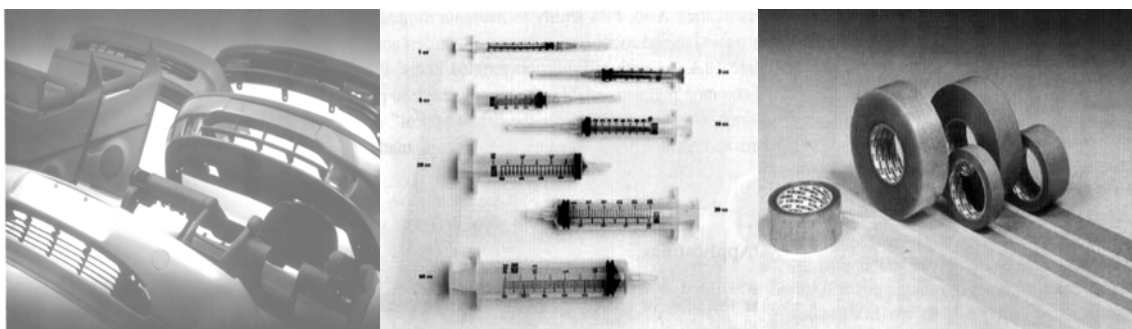


Figura 2.16: Exemplos de aplicação de PP: pára-choques e painéis de automóveis, seringas descartáveis e fitas transparentes, respectivamente^[21]

Entre os novos desenvolvimentos para o PP está o couro sintético a base de composto de PP, substituindo os de PVC. Revestimentos de PP têm sido usados em assentos dos novos carros de marcas Gol, topo de linha, e Santana; como não tem plastificante, não tem odor e também não sofre rachaduras. Hoje, as aplicações de maior relevância para o polipropileno são em pára-choques, painéis e revestimentos internos de automóveis^[3].

Atualmente os automóveis brasileiros contém cerca de 40 quilos de polipropileno, 35 dos quais na forma de composto da resina. A absorção na indústria automotiva de mais de 70% da produção destes compostos, é outro dado que demonstra a força do polipropileno^[21].

2.3.2 Poliamidas ou náilons

A reação de polimerização por condensação, que origina as poliamidas, ocorre entre um diácido carboxílico e uma diamina. A poliamida alifática mais conhecida é o náilon 66, obtido pela primeira vez por Wallace Carothers, em 1935, ao reagir um ácido adípico e hexametilenodiamina. A invenção do náilon veio suprir as deficiências das fibras naturais, que são caras e pouco duráveis, finas como a seda, ou grossas como a lã^[19].

O primeiro produto feito com fios de náilon foram as meias transparentes femininas, que eram mais resistentes e secavam mais rapidamente que as meias de seda, além de serem mais baratas. O mercado aproveitou esse polímero de engenharia de uso geral também no setor automotivo. Fazendo-se algumas estimativas, os carros brasileiros carregam hoje desde 100 até 150 kg de plástico, dos quais entre 5 e 8 kg são de náilon. Nos carros europeus, o plástico chega aos 200 kg, alguns modelos têm até 20 kg de náilon^[3]. Na Figura 2.17 pode-se ter uma idéia das peças automobilísticas feitas de náilon.

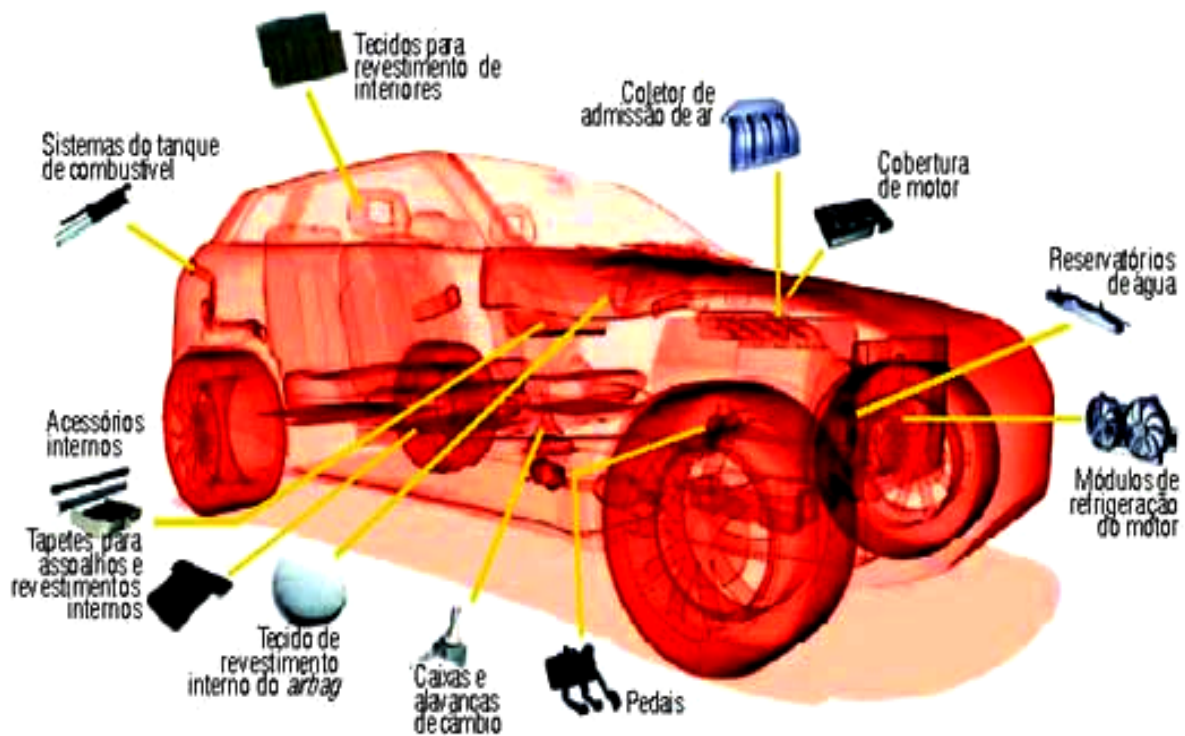


Figura 2.17: Peças em náilon presentes em veículos automotivos^[3]

A estrutura primária das poliamidas alifáticas consiste de grupos amidas separadas por seqüências de metileno, conforme mostra a Figura 2.18. Os náilons com estrutura linear, como as PA 6 e 66, possuem conformação das cadeias em zigue-zague com pontes de hidrogênio entre os grupos funcionais^[22], as quais cristalizam na forma de esferulitos, como pode ser visto na Figura 2.19.

As pontes de hidrogênio aumentam a temperatura de fusão do polímero e reforçam a região cristalina, aumentando sua resistência à abrasão; porém, esse tipo de ligação intermolecular favorece a absorção de umidade ambiental, o que faz variar seu volume, comprometendo a estabilidade dimensional da peça plástica^[18].

Um aspecto prático da influência da morfologia é o seu efeito sobre as propriedades mecânicas; por exemplo, amostras de náilon 66 com esferulitos pequenos apresentam maior módulo de flexão e tensão de escoamento; porém, menor alongamento que amostras com esferulitos grandes, comparando-se amostras com cristalinidade em torno de 50%. As diferenças nas propriedades associadas ao tamanho do esferulito são mais pronunciadas em amostras secas à

temperatura ambiente e decrescem ou desaparecem com a absorção de água pelo polímero ou pelo aumento da temperatura^[22] de tratamento térmico.

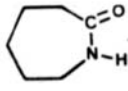
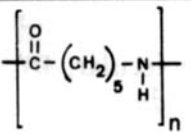
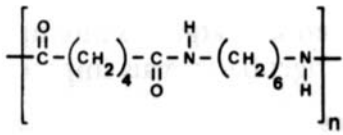
Poliamida-6	Monômero:  ϵ -caprolactama
	Polímero: 
Poliamida-66	Monômeros: $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_4-\text{COOH}$ $\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2$ ácido adípico hexametilenodiamina
	Polímero: 

Figura 2.18: Representação esquemática dos monômeros e respectivos polímeros das poliamidas 6 e 66^[18]

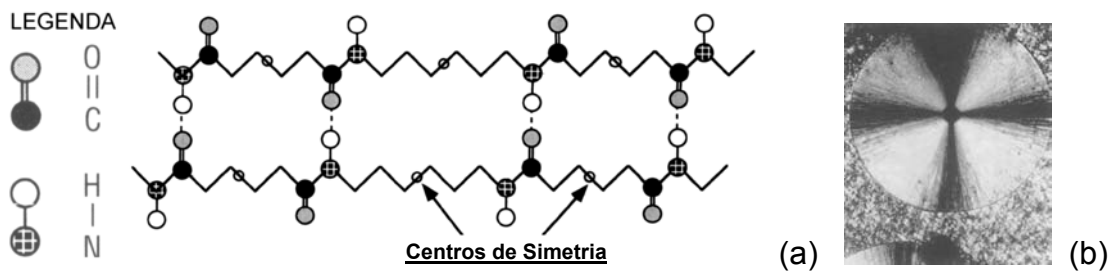


Figura 2.19: Representação esquemática das cadeias em zigue-zague da PA 66 onde as linhas são seqüências de metileno (a) e respectivo esferulito (b)^[22]

Os náilons absorvem água reversivelmente, sendo que a quantidade de água absorvida depende da umidade relativa e da temperatura do meio, do tempo de exposição e do tipo de náilon, de sua cristalinidade e das modificações. A taxa de absorção de umidade depende do tipo do náilon, da temperatura, da cristalinidade do náilon e da espessura da seção da peça de náilon.

O aumento da cristalinidade diminui a absorção de umidade. Náilons contendo materiais inertes como fibras de vidro ou mineral absorvem umidade na proporção da quantidade de náilon presente^[22].

A mudança nas dimensões devido à absorção de umidade e ao alívio de tensões da peça no resfriamento, após ser moldada, corresponde a efeitos de expansão e de contração, respectivamente. Considerando-se um ano de exposição a 50% de umidade relativa de uma peça de náilon 66, a mudança nas dimensões de 3,2 mm de espessura da peça moldada será menor que 1%^[22]. Isso explica por que os náilons têm sido usados com sucesso em aplicações, tais como engrenagens e outros componentes que possuam requisitos dimensionais críticos. A variação da umidade relativa também resulta em pequena mudança dimensional; por exemplo, uma peça moldada de PA 66 em equilíbrio a 50% de umidade relativa apresenta menos que $\pm 0,4\%$ de mudança dimensional, se houver variação de $\pm 10\%$ de umidade relativa^[22].

Os efeitos da absorção de umidade em poliamidas alifáticas são a diminuição da rigidez e da resistência à tração, porém ocorre aumento da resistência ao impacto, e o alongamento^[22], uma vez que a água flexibiliza a cadeia molecular desfazendo as pontes de hidrogênio formadas entre moléculas adjacentes, agindo como um plastificante.

A adição de fibra de vidro nos náilons aumenta sua rigidez, sua resistência à tração e à flexão e sua resistência ao impacto Izod, mas diminui seu alongamento, considerando-se que a umidade relativa (RH) seja menor que 0,2% a 23°C. No entanto, quando se eleva para 50% de RH, mantendo-se os 23°C, o comportamento da resistência ao impacto Izod muda. Tomando-se como exemplo o náilon 6 sem fibra de vidro, que possui resistência ao impacto Izod de 267 J/m a 23°C e 50% de RH, ao se adicionar 15% de fibra de vidro neste, nas mesmas condições de temperatura e umidade, observa-se uma diminuição da resistência ao impacto para 123 J/m. Se aumentada para 30% a quantidade em massa de fibra de vidro, a resistência ao impacto passa para 256 J/m. O mesmo comportamento de resistência ao impacto Izod é verificado no náilon 66, aumentando-se a quantidade de fibra de vidro sob as mesmas condições^[22].

A temperatura de transição vítrea (Tg) das poliamidas também é afetada pela absorção de água; por exemplo, no náilon 66 virgem a sua Tg diminui de 78°C para 35°C, ao se passar de 0,2% para 50% de RH e diminui para -15°C em condições de 100% de RH. Observou-se esses valores da Tg, através de medição dinâmica com pêndulo de torção^[22].

Os efeitos da absorção de umidade, somado ao da adição da fibra de vidro ou da carga nos náilons, não podem ser avaliados isoladamente, pois quando combinados resultam em propriedades que devem ser avaliadas através de testes normalizados e/ou comparativos quando necessários.

As poliamidas alifáticas 6, 66, 69, 7, 57, 610 e 612 são exemplos de polímeros com estrutura molecular linear. A empresa Rhodia^[24] desenvolveu uma poliamida diferenciada, com estrutura molecular ramificada em forma de estrela, denominada *Technylstar*. Embora possua alto peso molecular, o polímero apresenta alta fluidez. Esse tipo de estrutura permite manter as propriedades mecânicas, mesmo com peso molecular elevado e boa processabilidade do material. A estrutura diferenciada ainda permite a adição de 65% de reforço ou carga, elevando mais a resistência mecânica e aproximando suas propriedades das poliamidas aromáticas. O *Technylstar*, no entanto, não suporta temperaturas elevadas, pois se comporta como uma poliamida convencional^[24].

A nova poliamida *Technylstar* deverá substituir as poliamidas alifáticas nos coletores de admissão, nas coberturas de motor e também nas carcaças de ferramentas manuais. No Brasil, já é usada na confecção de fivelas para mochilas do exército. A nova família de poliamidas é composta por cerca de 15 grades^[24].

Novos compostos de poliamidas surgem no mercado, conforme a aplicação do polímero. Arakawa et al^[23] criou um composto de poliamidas 66, 12 e outros ingredientes, com resistências química e termo-mecânica suficientes para suportar as altas temperaturas da água de arrefecimento do motor. Mostrando a versatilidade desses polímeros atendendo às necessidades do mercado.

2.3.3 Poliésteres de cristal líquido

Classificados como plásticos de engenharia de uso especial, os poliésteres de cristal líquido (LCP) são originados a partir de diversos monômeros, sendo mais conhecido comercialmente como *Vectra* (ver Figura 2.20). O *Vectra* é marca registrada da empresa Ticona, a maior fabricante mundial de LCP^[24].

Algumas propriedades desses polímeros são marcantes, como a resistência ao calor, permitindo o uso contínuo em temperaturas de até 200°C. Os LCP são auto-retardantes de chama, gerando pouca fumaça, possuem boa estabilidade dimensional mesmo a altas temperaturas; baixa absorção de água e alta resistência à oxidação. Apresentam alta resistência mecânica, como alta rigidez e tenacidade, porém é um material anisotrópico. Apresentando, também, excepcional resistência química e baixa permeabilidade a gases e líquidos entre outros^[18].

As aplicações típicas do LCP vão desde a substituição de partes complexas de cerâmica e metal no segmento aeroespacial, químico e automobilístico, até sua aplicação em fibras óticas e em fornos de microondas^[18].

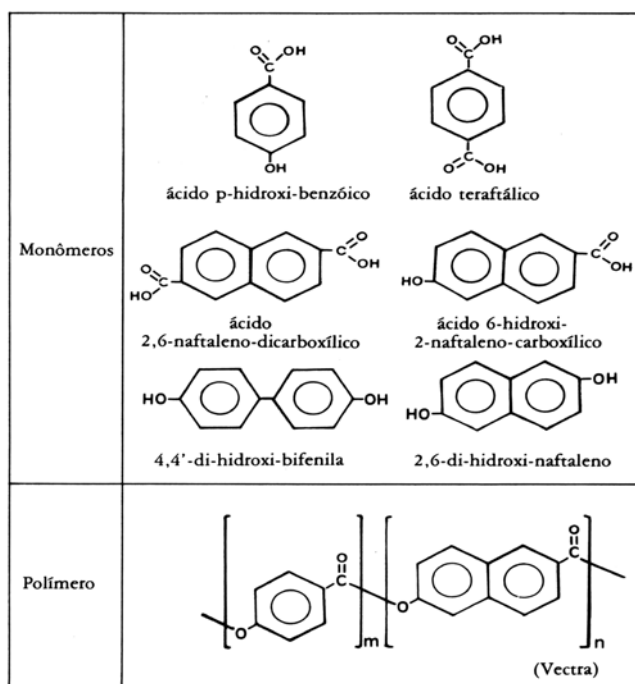


Figura 2.20: Representação esquemática dos monômeros e respectivo polímero de poliéster de cristal líquido^[18]

Substâncias que residem no estado mesogênico, ou seja, que se comportam como um cristal rígido, mas mantêm a mobilidade similar a outros líquidos são denominadas de cristais líquidos. As propriedades desse material têm grande popularidade nos *displays* eletrônicos de cristal líquido. Em contraste os polímeros de cristal líquido somente estão nesse estado por um breve período de tempo durante o processo de fusão ou em solução^[25].

Os LCP são termotrópicos, isso é, caracterizados por dois pontos de fusão. O menor ponto de fusão indica a temperatura de transição da fase cristalina para a nemática, onde desaparecem as ligações de Van der Waals, ficando somente o alinhamento das moléculas. O maior ponto de fusão se refere à transição da fase nemática para a fase do polímero fundido isotrópico, onde não existem ligações intermoleculares e alinhamentos, conforme mostra a Figura 2.21. O processamento deve ocorrer próximo à faixa de temperatura na fase nemática, para que o cisalhamento do fluxo possa alinhar os cristalitos paralelos na direção do fluxo, onde as regiões cristalinas ordenadas consistem de cadeias de polímeros distendidas rígidas ou semi-rígidas. Esse alinhamento confere ao material alta resistência e alto módulo de elasticidade^[25].

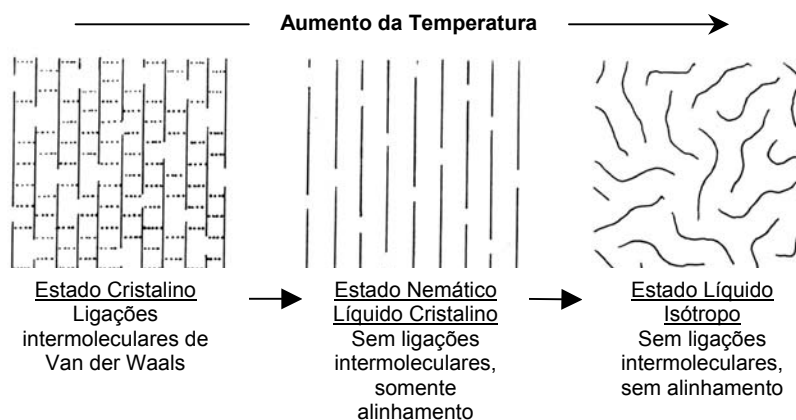


Figura 2.21: Efeito da temperatura no estado nemático líquido cristalino, onde as linhas são seqüências de metileno^[25]

A facilidade em se obter orientação na direção do fluxo de injeção torna possível moldar peças com alta resistência mecânica e alto módulo de elasticidade na direção do fluxo. Uma desvantagem dessa alta taxa de orientação é a insuficiente resistência nas direções transversais às fibras, fácil abrasão superficial e fibrilação. Uma orientação inconsistente da peça pode causar empenamento da peça moldada, a qual pode ser corrigida mantendo-se a direção do fluxo sob controle, uma vez que os poliésteres de cristal líquido possuem estabilidade térmica e baixa viscosidade do fundido facilitando o adequado preenchimento do molde^[25].

A segunda maior produtora mundial de polímeros de cristal líquido, a empresa DuPont, destaca como principais propriedades desses polímeros a excelente fluidez, resistência à temperatura e contração próxima de zero, permitindo a produção de peças complexas de precisão e com dimensões reduzidas, além disso, a resina mantém o alinhamento molecular mesmo no estado fundido, garantindo altíssimo índice de cristalinidade^[24].

2.4 Aplicação de plásticos de engenharia em engrenagens

Engrenagens poliméricas têm excelentes propriedades, tais como autolubrificação, alta resistência química, baixo ruído e alta resistência ao impacto, porém, em geral, elas são inferiores às engrenagens de aço nas capacidades de carga. Reforçando-se com fibras de vidro (GFRP) ou de carbono (CFRP), os polímeros ganham maior resistência mecânica e rigidez, conforme é indicado na Figura 2.22. Essa mostra um gráfico de seleção de materiais que relaciona duas propriedades fundamentais para a performance do par de engrenagens, o módulo de elasticidade e a resistência à tração^[26].

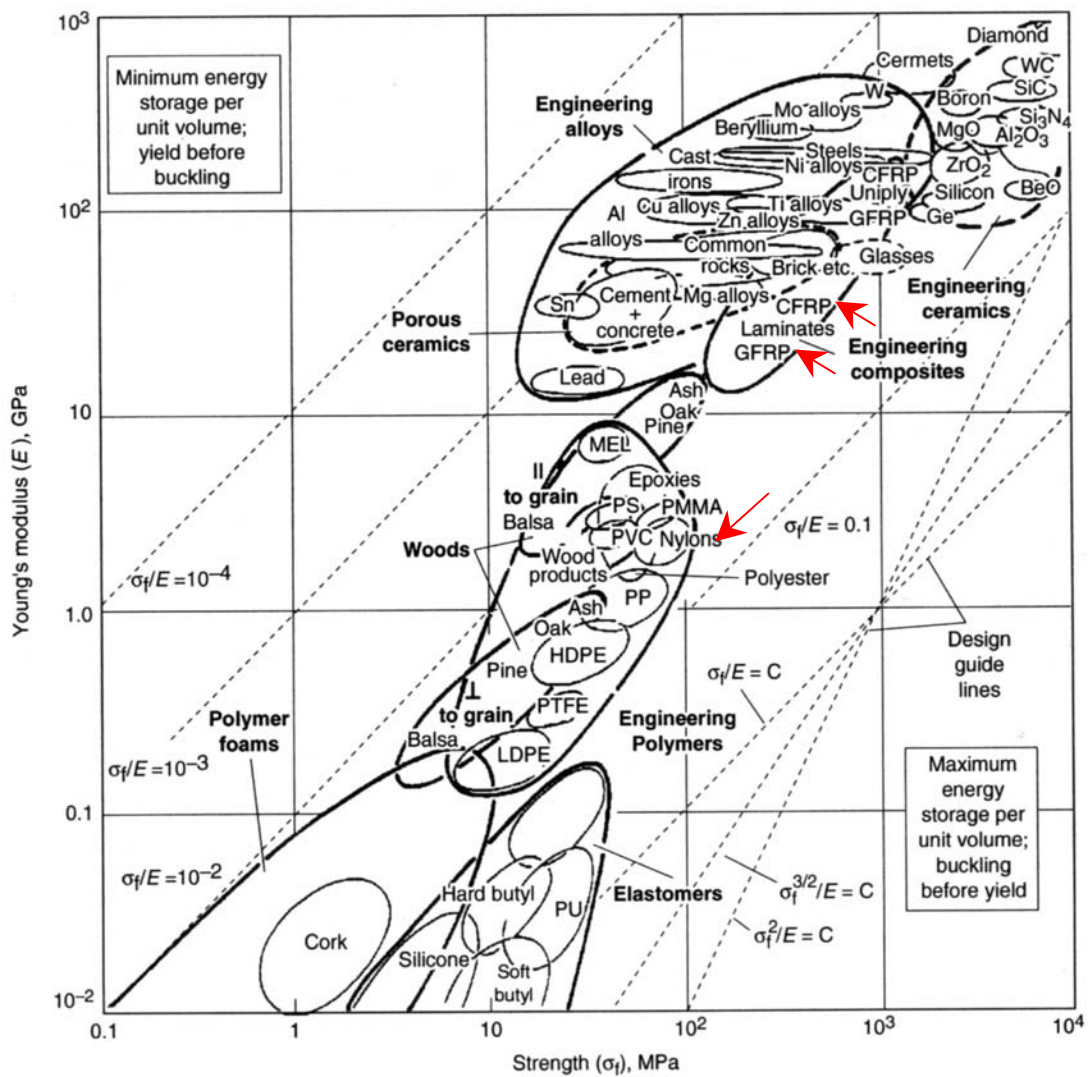


Figura 2.22: Módulo de elasticidade *versus* resistência à tração para metais, cerâmicos, polímeros e compósitos^[25]

A substituição do metal pelo polímero tem sido amplamente utilizada, devido à melhora da performance relacionada à aplicabilidade do componente com a combinação das propriedades necessárias e suficientes. A troca de material da roda dentada de uma moto de corrida, por exemplo, alia a alta tenacidade e a resistência ao impacto com a alta resistência à corrosão da poliamida na substituição do aço e do alumínio pela roda dentada de náilon^[27], conforme mostra a Figura 2.23.



Figura 2.23: Roda dentada de náilon da transmissão por correia da moto de corrida^[27]

Ensaio de desgaste e técnicas de medição foram aplicadas para o estudo de engrenagens cilíndricas de dentes retos de PA 66 com fibra de vidro no trabalho de Kukureka et al^[9]. Esse trabalho propõe um estudo sistemático para a performance do desgaste de engrenagens de compósitos de matriz polimérica. Os métodos de teste de abrasão foram comparados, incluindo teste em bancada com o par de engrenagens poliméricas, medição do perfil dos dentes e perda de massa.

O tipo de contato de dois dentes de engrenagem pode ser simplificado por dois componentes: rolamento e deslizamento. O material no local de rolamento está sujeito ao cisalhamento e a tensões trativas e compressivas, resultantes num material viscoelástico, ocorrendo também perdas por histerese. Com o aumento das tensões subsuperficiais, a iniciação à fadiga ou o escoamento do material podem ocorrer. Uma adicional deformação superficial no ponto de contato produz um aumento de área de contato entre os dentes e, conseqüentemente, o deslizamento entre as duas superfícies cria fricção. Propriedade esta avaliada pela resistência à abrasão, tendo como resultados, a perda de massa e a deformação do perfil evolvente dos dentes. A variação dimensional no perfil evolvente das engrenagens foi avaliada por Kukureka et al^[9], através da medição em projetor de perfis. Gráficos de perda de massa por número de ciclos, variação dimensional do perfil evolvente pelo ângulo de rolamento e pela velocidade de deslizamento foram alguns dos resultados obtidos.

A variação de massa devido à absorção de umidade pelas poliamidas 66 pode levar a erros significativos no cálculo do desgaste por perda de massa. Na tentativa de minimizar esses erros foram colocadas engrenagens poliméricas idênticas às engrenagens poliméricas de teste próximo da bancada de teste. A perda de massa devido à abrasão foi calculada em intervalos, através da diferença de massa dos dois pares de engrenagens, a de teste e a de referência, até o momento em que o perfil evolvente do dente estiver perdido. As mudanças dimensionais devido à umidade são menos problemáticas do que a mudança na massa, uma vez estimada uma expansão linear de 0,15% quando o conteúdo de água é aumentado em 1% de massa. Considerando-se em média de 1 a 1,5% de umidade nas engrenagens de poliamida com carga, esse fator tem pouca influência no ensaio de medição do perfil evolvente^[9].

O poli-éter-éter-cetona (PEEK) é um termoplástico semicristalino rígido com excelentes propriedades mecânicas e, por isso, tem sido aplicado como matriz de compósitos. O desgaste de compósitos do PEEK relacionado às performances mecânicas foi investigado por Zhang et al^[28], através de misturas de diferentes quantidades de PTFE e/ou de grafite reforçados com várias quantidades de fibra de carbono curtas. A mistura dos compósitos de PEEK foi realizada em extrusora, e os corpos-de-prova foram obtidos por injeção. A dependência das propriedades mecânicas, isso é, a resistência ao impacto Charpy, tenacidade à fratura, resistência e módulo de flexão de várias misturas desses compósitos foi investigada, com o objetivo de se comparar a resistência à abrasão desses compósitos. Foi verificado que as taxas de desgaste dos compósitos de PEEK têm dependência da rigidez, densidade e resistência ao impacto. As propriedades de flexão e tenacidade não são influenciadas pelo tipo de mistura^[28].

A resistência ao desgaste do PEEK pode ser significativamente melhorada pelo uso de fibras de carbono curtas, flocos de grafite e partículas de PTFE, porém sob pena da deterioração de algumas outras propriedades mecânicas em alguns níveis, a tenacidade e a resistência^[28].

Pares de engrenagem plástica com PEEK reforçado com fibra de carbono (CF), preparadas por injeção, foram avaliadas quanto à sua performance. Foi descoberto que o processo de desgaste da engrenagem de PEEK reforçado com CF é significativamente dependente das condições de teste, tais como do tipo de engrenagem e se existe um lubrificante na região de engrenamento ou não. Foi observado que o filme de transferência na região de engrenamento, a afinidade entre o PEEK e CF, o módulo de compressão, assim como a dureza da superfície da engrenagem e as características da CF, possuem papéis diferenciados na profundidade do desgaste^[28].

Engrenagens plásticas têm uma série de vantagens em comparação com as metálicas, tais como o peso e o ruído reduzido e o alto grau de liberdade na geometria da engrenagem. O aumento do torque e da rotação de transmissão torna limitada a aplicação de engrenagens poliméricas; um dos motivos, é o aumento do desgaste dos dentes da engrenagem^[10]. No trabalho de Kurokawa et al^[10], foi investigada a capacidade de carga das engrenagens cilíndricas de dentes retos de PEEK/CF e o processo de desgaste dos dentes, variando-se o material, o acabamento superficial e as condições de lubrificação do par de engrenagens.

Geralmente o poliacetal (POM), a PA e o policarbonato (PC) são usados como materiais para engrenagens termoplásticas, entre os quais o POM é o mais abundantemente utilizado. A engrenagem de POM tem seu uso limitado devido à sua baixa temperatura de fusão (160°C), embora possua excelente performance quando usado à temperatura ambiente. Portanto, para o desenvolvimento da engrenagem plástica que possa ser utilizada a uma temperatura de aproximadamente 200°C foi utilizado o PEEK, um plástico de engenharia com maior capacidade de carga que o POM^[10].

Os dentes das engrenagens poliméricas^[10] foram medidos antes em bancada em projetor de perfis e através dos testes. Desse modo a profundidade do desgaste nos dentes foi observada e traçada intermitentemente várias vezes durante os ensaios. Foram utilizados quatro materiais, sendo um PEEK sem carga e os outros três o PEEK com 15% em volume de fibra de carbono padrão (CF1), com alta

resistência à tração (CF2) e o quarto com alto módulo de elasticidade (CF3) para as engrenagens termoplásticas. A rugosidade foi variada numa das engrenagens do par, utilizando-se os acabamentos de fresa e retífica numa engrenagem de aço S45C. As condições de lubrificação do par de engrenagens também variaram com combinações desde secas ou sem lubrificação, com uso de somente graxa, graxa com CF1, com CF2 e com CF3. Dessas condições de ensaio resultaram seis combinações de materiais das engrenagens com rugosidade e lubrificação variadas. O acabamento superficial da engrenagem de aço com acabamento de retífica (R_a : $0,1 \mu\text{m}$) provocou menor desgaste nos dentes de todas as engrenagens plásticas do que com acabamento de fresa (R_a : $0,9 \mu\text{m}$), quando utilizadas sem lubrificação. Porém repetindo-se o teste e adicionando-se graxa tipo Lítio, observou-se que a profundidade de desgaste dos dentes foi menor que o ensaio anterior, exceto para a engrenagem de PEEK/CF3 combinada com engrenagem de aço com acabamento de fresa (R_a : $0,9 \mu\text{m}$). Por outro lado, quando submetido à condição de teste, onde a engrenagem de aço é substituída pela de PEEK com fibra de grafite padrão (CF1), usando somente graxa como lubrificante, a menor perda de massa ocorre com a engrenagem de PEEK/C3 e a maior com o PEEK/CF1, fato que possui, como causa principal, a menor resistência mecânica do PEEK/CF1. Isso mostra que a resistência ao desgaste dos dentes das engrenagens plásticas depende das propriedades mecânicas das mesmas^[10].

Existem diversas formas de fabricação de engrenagens plásticas. Os processos de usinagem, através de ferramenta de corte e de fundição, e os de injeção em molde são exemplos típicos.

A injeção de polímeros é um processo de transformação de termoplásticos em diversos estágios, nos quais o polímero em forma de grânulos é aquecido e fundido, através de resistências elétricas nas zonas de aquecimento da injetora e, finalmente, forçado sob pressão para dentro de um molde, por meio de um pistão com rosca. A Figura 2.24 mostra o perfil de uma máquina injetora e os principais estágios do ciclo de injeção (A), (B) e (C). A pressão de injeção aplicada desloca retilineamente o pistão até preencher a cavidade do molde. Logo após, devido à contração volumétrica do material termoplástico, é aplicada uma pressão de

recalque, evitando-se assim que ocorra rechupes na peça, finalizando o estágio (A). A dosagem de material ocorre através da rotação e do deslocamento do pistão com rosca, distribuindo o material através das zonas de aquecimento até preencher a extremidade do pistão, iniciando no estágio (B) e finalizando no (C). Ainda dentro do molde, a peça moldada é resfriada abaixo da faixa de temperatura de cristalização, o molde então é aberto e a peça moldada é extraída, finalizando o estágio (C)^[28]. Os parâmetros de injeção, tais como pressão, dosagem e temperatura, devem ser adequados para a moldagem de uma peça termoplástica homogênea e com precisão dimensional.

O processo de moldagem é intermitente, ou seja, após cada peça ser extraída do molde, um novo ciclo já teve início, obtendo-se uma alta produtividade na máquina injetora.

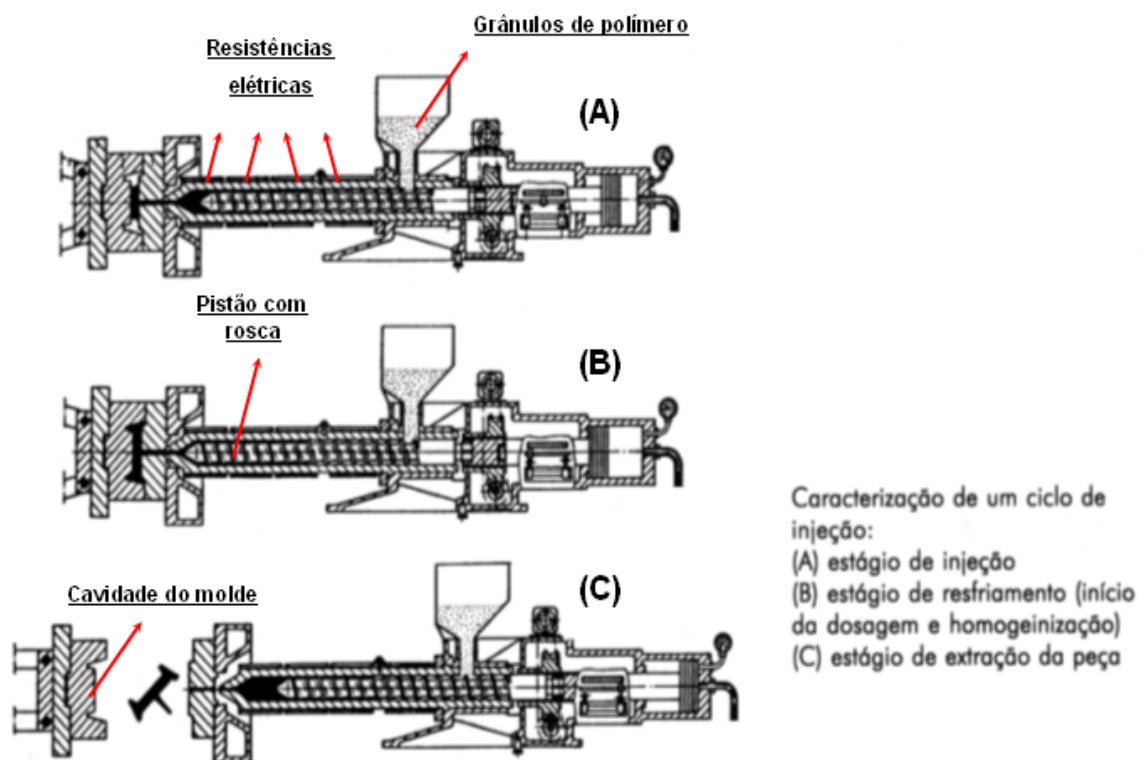


Figura 2.24: Máquina injetora e o ciclo do processo de moldagem por injeção^[28]

3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo determinar as características mecânicas necessárias e suficientes de um polímero termoplástico adequado para a confecção do par de engrenagens automotiva tipo coroa globóide e parafuso cilíndrico sem fim (parafuso sem fim), para aplicação em porta-estepe de caminhão. Para tanto foram selecionados no mercado nove polímeros, aplicáveis como plásticos de engenharia, os quais foram avaliados quanto às suas propriedades e à adequação frente aos seus desempenhos em testes de laboratório.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais, especificação e origem

As nove amostras de polímeros termoplásticos pré-selecionados, utilizadas no presente trabalho, estão descritas a seguir.

Polipropileno CP 442 XP fornecido pela empresa Polimarketing Resinas Petroquímicas distribuidora de resinas da Braskem S.A. foi usado como recebido.

As poliamidas (PA) 6 sem e com 30% de fibra de vidro (FV) na cor preta, da família 6000 foram fornecidas pela empresa Master Distribuidora de Polímeros da Mazzaferro Tecnopolímeros Ltda. A PA 6 com 15% de FV foi obtida através da mistura de 50% em massa de PA 6 virgem mais 50% da massa da PA 6 com 30% de FV, ambos da empresa Mazzaferro Tecnopolímeros Ltda.

As poliamidas 66 com 15 e 30% de fibra vidro foram obtidas através da mistura da PA 66 com 20% de FV com a PA 66 sem FV e da mistura da PA 66 com 33% de FV com PA 66 sem FV, respectivamente. As poliamidas 66 sem, com 20 e 33% de FV na cor branca, especificadas através dos respectivos códigos por Nylon 6.6L, Zytel 70g23LNC010 e Zytel 70g33LNC010 foram fornecidas pela empresa Master Distribuidora de Polímeros da DuPont Polímeros de Engenharia S.A.

As poliamidas 6 e 66 com 15% de FV e a PA 66 com 30% de FV foram obtidas através da mistura de grãos ou *pellets* na rosca da máquina de injeção.

A poliamida com 60% de FV na cor preta especificada como *Technylstar* SX218 V60 foi gentilmente doada pela empresa Rhodia.

O poliéster cristal líquido com 25% de grafite na cor cinza, especificado por *Vectra* A625 foi gentilmente doado pela empresa Ticona.

4.2 Preparação dos corpos-de-prova

4.2.1 Injeção dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova de tração e flexão foram moldados segundo as normas da ASTM, através da injeção do material polimérico fundido em molde metálico. Para tanto, utilizou-se uma injetora hidráulica de marca Himaco, modelo LH150-80, com capacidade de até 150 gramas de injeção e força máxima de fechamento de 80 toneladas. Os parâmetros de injeção utilizados para cada material encontram-se na Tabela 4.1.

A umidade absorvida por parte das poliamidas pode causar bolhas no fundido, afetando a homogeneidade, as características reológicas, as propriedades mecânicas e as dimensões finais dos corpos-de-prova moldados. Portanto, todas as poliamidas foram secas por um período de 8 horas à temperatura de 80°C em estufa antes de serem injetadas. Por recomendação do fabricante, o *Vectra* permaneceu por 4 horas a 150°C na estufa antes de ser injetado. O PP não foi desumidificado em estufa.

Tabela 4.1 – Parâmetros de injeção por material termoplástico

Parâmetros:	Material:								
	PP	PA 6	PA 6 15%FV	PA 6 30%FV	PA 66	PA 66 15%FV	PA 66 30%FV	PA 60%FV*	<i>Vectra</i> A625**
Tempo de Injeção (s)	6	4,5	5	6	4,5	5	5	5	4
Tempo de Resfriamento (s)	20	23	22	20	22	18	20	20	12
Pressão de Injeção (%)	35	35	40	40	50	40	45	25	30
Pressão de Fluxo (%)	80	70	80	70	70	80	80	50	70
Pressão de Recalque II (%)	25	30	35	40	40	40	40	40	40
Pressão de Fluxo II (%)	90	70	70	80	70	80	80	50	70
Dosagem (rpm)	100	90	90	90	50	100	100	100	60
Fluxo (%)	80	80	80	80	80	80	80	80	90
Temperatura do Bico (%)	60	40	30	60	25	50	40	60	60
Temperatura da Zona 1 (°C)	200	250	250	250	280	280	280	230	295
Temperatura da Zona 2 (°C)	185	230	230	230	270	270	270	220	285
Temperatura da Zona 3 (°C)	170	210	210	210	260	260	260	210	275

* Poliamida ramificada marca *Technylstar* SX218 V60 com 60% de fibra de vidro

** Poliéster de Cristal Líquido marca *Vectra* A625 com 25% de grafite

4.2.2 Usinagem dos corpos-de-prova

Corpos-de-prova obtidos da mesma maneira que os de tração e flexão foram usinados com a finalidade de adequá-los para os ensaios de impacto, abrasão e análise dinâmico-mecânica.

Os corpos-de-prova dos ensaios de impacto Izod foram do tipo daqueles do ensaio de flexão, usinando-se o entalhe em forma de “V”, conforme as dimensões exigidas pela norma de ensaio de impacto Izod. Para os corpos-de-prova do ensaio de abrasão, foram utilizados aqueles injetados para o ensaio de tração, sendo usinadas as extremidades do corpo-de-prova com serra-copo, para se obter as dimensões exigidas pela norma de ensaio de abrasão. Os corpos-de-prova injetados para o ensaio de flexão foram usinados com serra fita com o comprimento adequado para a análise de DMA.

4.2.3 Condicionamento dos corpos-de-prova

Previamente às análises, os corpos-de-prova de todos os materiais termoplásticos pré-selecionados foram expostos às condições padrão, ou seja, temperatura de 23°C, umidade relativa de 50% e pressão entre 86 a 106 kPa, por um período de 48 horas, conforme norma ABNT 7452^[31].

As poliamidas possuem diferentes propriedades quando submetidas a diferentes níveis de absorção de umidade^[22]. Por isso foram executados testes sem e com tratamento baseado no item 7.5 da norma ASTM D570 – 98^[32]. Esse tratamento térmico consistiu em imergir os corpos-de-prova condicionados em água fervente por um período de duas horas e após repetir o condicionamento em atmosfera padrão. Somente para os ensaios de TGA, DSC e de reometria capilar foram utilizadas poliamidas sem tratamento; para todos os demais testes foram utilizados os dois tipos de poliamidas, sem e com tratamento.

4.3 Técnicas termo-analíticas

Técnicas termo-analíticas foram utilizadas para a verificar a porcentagem de carga nos polímeros (TGA), a temperatura de fusão, a porcentagem de cristalinidade (DSC), a temperatura de transição vítrea e os módulos de perda e armazenamento (DMA).

4.3.1 Análise termogravimétrica (TGA)

A perda de massa do polímero em função do aumento da temperatura à taxa de aquecimento de 20°C/min de 20°C até 1000°C, de cerca de 10 mg de amostra em atmosfera de nitrogênio e ar possibilitou quantificar a porcentagem de fibra de vibro nos polímeros com carga. Na análise do poliéster de cristal líquido, utilizou-se somente ar. Foi usada uma balança termoanalítica modelo Universal da *TA Instruments*.

4.3.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

O equipamento utilizado foi o calorímetro modelo 2920 da *TA Instruments*. Para cada amostra foram feitas duas varreduras, sendo utilizado a segunda varredura para a coleta dos dados de temperatura de fusão e cálculo da cristalinidade. As amostras, cerca de 7 mg cada, foram aquecidas à taxa de 10°C/min e mantidas por cinco minutos acima da temperatura de fusão de cada amostra. Após essas, foram resfriadas à taxa de 10°C/min até a temperatura ambiente; a Tabela 4.2 mostra o intervalo de temperatura utilizado na análise de cada amostra.

As temperaturas de fusão e cristalização correspondem aos valores máximos dos picos relativos às respectivas transições térmicas dos termogramas. Através da equação $X_c = 100 \cdot (\Delta H / \Delta H_f^0)$, foi determinado o percentual de cristalinidade (X_c) da amostra, a partir do calor de fusão da amostra (ΔH_f) obtido pela integração da área do pico de fusão abaixo da linha base, utilizando-se como

valores de referência os calores de fusão das amostras 100% cristalinas^[33] (ΔH_f°) mostrados na Tabela 4.2. Para a amostra PA *Technylstar* com 60% de FV foi utilizado o ΔH_f° da amostra PA 6, uma vez que esses apresentaram comportamentos térmicos semelhantes.

Tabela 4.2 – Temperaturas e calor de fusão de referência (ΔH_f°) das amostras, na análise de DSC

Parâmetros:	Material:								
	PP	PA 6	PA 6 15%FV	PA 6 30%FV	PA 66	PA 66 15%FV	PA 66 30%FV	PA 60%FV*	<i>Vectra</i> A625**
Temperatura de aquecimento (°C)	250	300	300	300	300	300	300	300	350
Temperatura de resfriamento (°C)	50	100	100	100	100	100	100	100	200
ΔH_f° (J/g)	209	190	190	190	196	196	196	190	-

* Poliamida ramificada marca *Technylstar* SX218 V60 com 60% de fibra de vidro

** Poliéster de Cristal Líquido marca *Vectra* A625 com 25% de grafite

4.3.3 Análise dinâmico-mecânica (DMA)

O equipamento modelo 2980 da *TA Instruments* foi utilizado no ensaio de DMA. Os módulos de perda, de armazenamento e a tangente δ das amostras foram obtidos a partir de um modo de deformação, o modo correspondente à flexão da amostra, aplicando-se uma carga variável numa das extremidades do corpo-de-prova e engastando-se a outra, o *single cantilever*. As amostras foram ensaiadas variando-se a temperatura no intervalo de -50°C até 125°C para o PP, até 200°C para as poliamidas e até 250°C para o LCP.

A relação existente entre a tangente delta ($\tan \delta$), o módulo de perda ou viscoso (G'') e o módulo de armazenamento ou elástico (G') é definida conforme fórmula abaixo:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'}$$

As dimensões dos corpos-de-prova necessárias para os ensaios de flexão para o tipo *single cantilever* foram de 36 x 12,8 x 3,2 mm.

4.4 Reometria capilar

O equipamento modelo 9052 Galaxi III, com capilar L/D 20, foi utilizado para analisar o comportamento reológico das amostras.

As viscosidades aparentes e as tensões de cisalhamento foram medidas variando-se a taxa de cisalhamento de 18,2 até 1100,6 s⁻¹ do polímero em estado fundido, 15°C acima da sua temperatura de fusão determinada por DSC.

O polímero é introduzido na forma de grãos (*pellet*) na cavidade do reômetro capilar, empacotado para eliminar o ar e após estar no estado fundido é comprimido por um pistão e forçado a passar através de um orifício ou capilar. A compressão se dá com velocidade crescente pela aplicação de força pelo pistão, imprimindo uma taxa de cisalhamento crescente na amostra. Através das equações de Poiseuille, para fluxo em capilar, determinam-se as tensões e taxas de cisalhamento (viscosidade \equiv tensão de cisalhamento / taxa de cisalhamento)^[30].

4.5 Ensaios mecânicos normalizados

Os ensaios normalizados são regidos por normas, total ou parcialmente, possuindo sempre a indicação de alguma norma nacional ou internacional. Para cada ensaio mecânico normalizado, foram testados cinco corpos-de-prova de cada material, sendo que as poliamidas sem tratamento e com tratamento foram avaliadas através de dez corpos-de-prova, sendo a metade sem e a outra metade com tratamento térmico.

4.5.1 Ensaio de tração

A máquina de ensaios universais da fabricante EMIC, modelo Emic DL2000, com capacidade de até 20 kN foi utilizada para os ensaios de tração, segundo a norma ASTM D 638 – 99^[34]. Os dados obtidos nesse ensaio foram a tensão limite de resistência à tração e o respectivo alongamento, bem como o módulo de elasticidade do material.

4.5.2 Ensaio de flexão

A máquina de ensaios universais da fabricante EMIC, modelo Emic DL2000, com capacidade de até 20 kN foi utilizada para os ensaios de flexão, segundo a norma ASTM D 790 – 99^[35]. Os corpos-de-prova foram apoiados pelas extremidades com aplicação de carga no centro. Os dados obtidos nesse ensaio foram a tensão máxima de resistência à flexão e o respectivo alongamento, bem como o módulo de elasticidade à flexão do material.

4.5.3 Ensaio de impacto izod

A máquina de ensaios da CEAST, modelo 6545/000, foi utilizada para os ensaios de impacto Izod, segundo a norma ASTM D 256 – 97^[36]. No ensaio foi utilizado martelo com energia de 7,5 J e velocidade de impacto de 3,46 m/s. O entalhe foi do tipo B em forma de “V” com ângulo de 45°. A resistência ao impacto foi medida à 23°C e expressa nas unidades de J, J/m e kJ/m².

4.5.4 Ensaio de abrasão e de intempérie

O ensaio de abrasão foi executado em máquina de abrasão da *Veb Thüringer Industriewerk Rauenstein*, modelo AGPi, segundo a norma DIN 53516^[37]. Ao invés de porcentagem de perda de volume, conforme a norma estabelece, foi calculada a porcentagem de perda de massa do material em relação à massa inicial.

O corpo-de-prova foi pressionado sobre uma lixa P60 de marca Alcar, através de uma carga compressiva de 5 N, percorrendo uma distância de 20 m. A porcentagem de perda de massa foi calculada através da variação da massa do corpo-de-prova antes e depois do ensaio, dividindo-se pela massa antes do ensaio multiplicando o resultado por cem.

A resistência à intempérie foi avaliada através da câmara de envelhecimento acelerado da Comexim Ltda; modelo C-UV. Os corpos-de-prova de abrasão foram expostos num ciclo à radiação ultravioleta tipo B a 60°C durante 4 horas, seguido por exposição de 4 horas ao vapor de água de condensação a 40°C na câmara, conforme ASTM G151 – 00^[38], por um período total de 240 horas, correspondente a aproximadamente seis meses de exposição ao meio ambiente, conforme dados informativos do fabricante da câmara de envelhecimento acelerado. Depois de serem retiradas da câmara de envelhecimento acelerado, as amostras foram condicionadas conforme norma ABNT 7452^[31], antes de se executarem os ensaios de abrasão.

As amostras sem e com envelhecimento acelerado foram comparadas com a finalidade de se avaliar a perda de massa ou o desgaste por abrasão relativo a cada material sob essas duas condições.

4.6 Obtenção de tarugo

Os tarugos para usinagem de peças foram obtidos numa máquina Himaco, modelo LH500-120, com capacidade de injeção de 500 gramas e força de fechamento do molde de 120 toneladas. A PA 6 com 30% de FV e a PA *Technylstar* com 60% de FV foram secas por um período de 8 horas a 80°C em estufa antes de serem injetadas. Para cada tipo de tarugo do par de engrenagens, foi feita uma adaptação no molde de uma cavidade, para ser usado tanto na injeção da coroa como na do pinhão, a cada fixação deste na injetora. Os parâmetros de injeção por amostra estão relacionados na Tabela 4.3, e os tarugos produzidos para a coroa e parafuso sem fim estão mostrados na Figura 4.1.

Tabela 4.3 – Parâmetros de injeção dos tarugos por material termoplástico

Parâmetros de injeção:	Material:	
	PA 6 30%FV	PA 60%FV*
Tempo de Injeção (s)	23	23
Tempo de Resfriamento (s)	320	320
Pressão de Injeção (%)	74	74
Pressão de Fluxo (%)	49	49
Pressão de Recalque II (%)	65	65
Pressão de Fluxo II (%)	65	65
Dosagem (rpm)	325	325
Fluxo (%)	65	65
Temperatura do Bico (%)	50	50
Temperatura da Zona 1 (°C)	250	235
Temperatura da Zona 2 (°C)	245	220
Temperatura da Zona 3 (°C)	245	220
Temperatura da Zona 4 (°C)	220	215
Temperatura da Zona 5 (°C)	210	210
Temperatura da Zona 6 (°C)	210	210

*Poliamida ramificada *Technylstar SX218 V60* com 60% de fibra de vidro

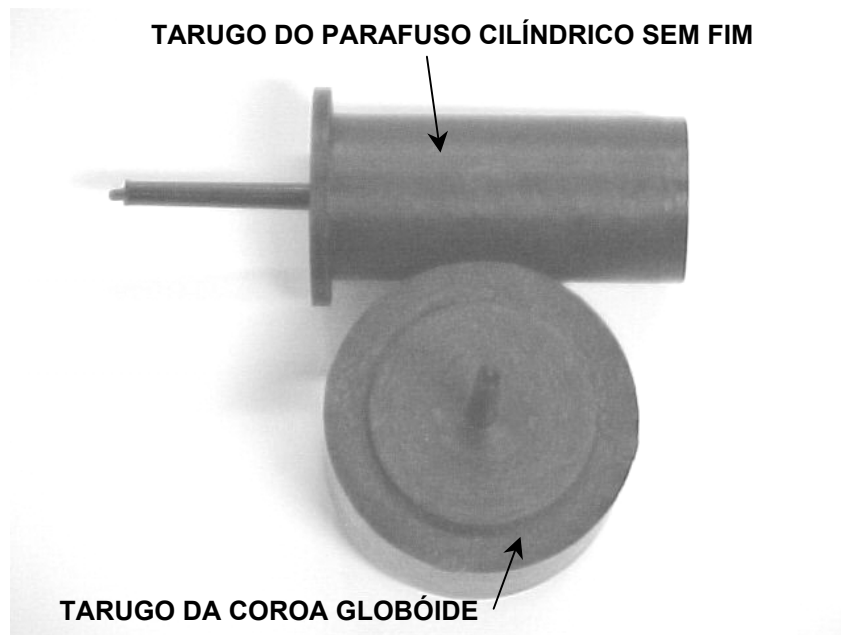


Figura 4.1: Tarugos usados para usinagem do par de engrenagens parafuso sem fim

4.7 Geometria da engrenagem parafuso sem fim

O par de engrenagens utilizado no presente trabalho é do tipo parafuso cilíndrico sem fim e coroa globóide. O projeto foi desenvolvido pela empresa Jost Brasil. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram os dados geométricos do parafuso sem fim e da coroa, respectivamente.

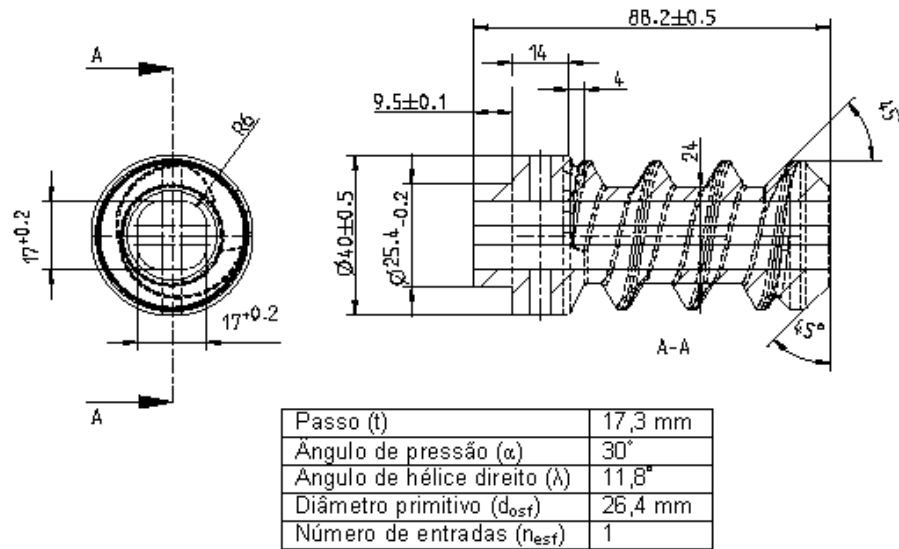


Figura 4.2: Dimensões do parafuso sem fim

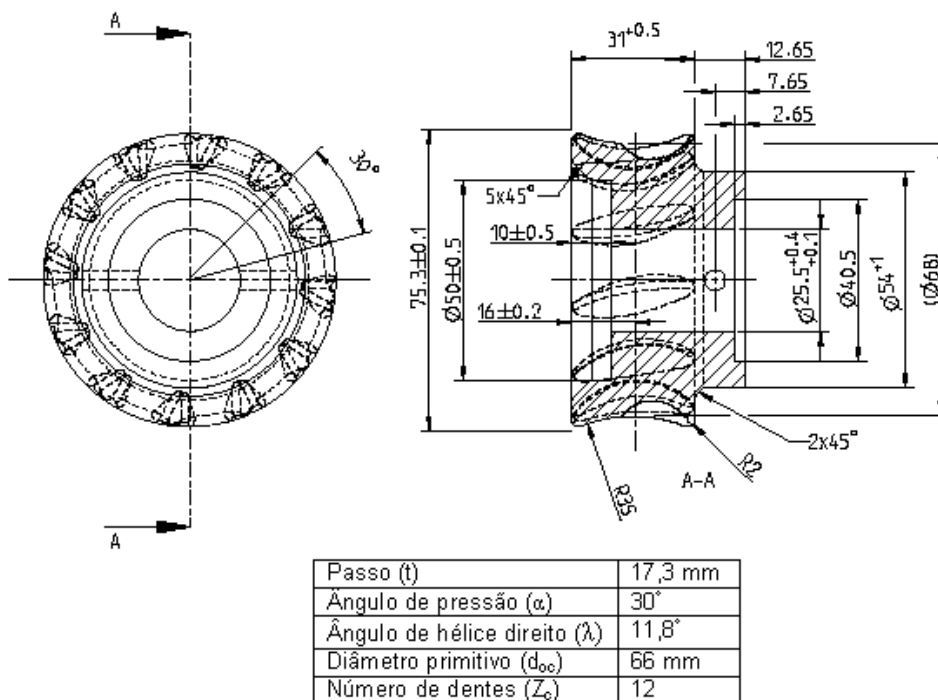


Figura 4.3: Dimensões da coroa

4.8 Usinagem da engrenagem protótipo

A usinagem do parafuso sem fim foi executada através de um centro de usinagem com comando numérico da Mazak modelo VTC200b, ver Figura 4.4 (a), enquanto que para a usinagem da coroa foi utilizado um pinhão de aço como ferramenta de corte na máquina geradora de engrenagem mecânica Donini, conforme mostra a Figura 4.4 (b).

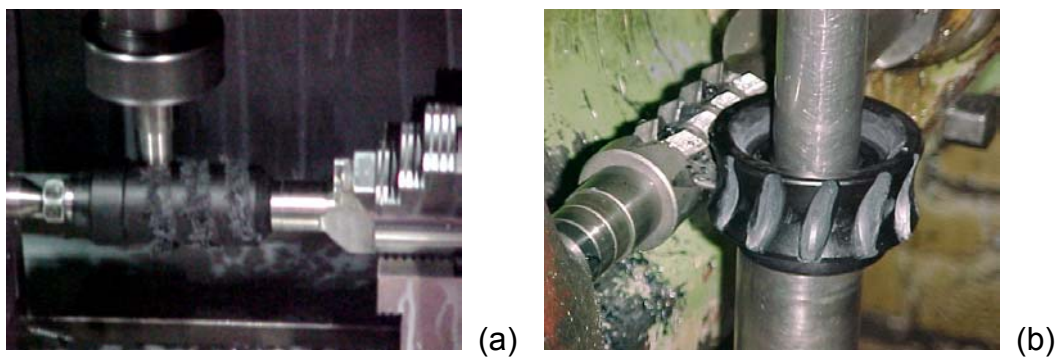


Figura 4.4: Usinagem do parafuso sem fim (a) e da coroa (b)

O par de engrenagens foi usinado de maneira a obedecer às dimensões e tolerâncias, conforme projeto da empresa Jost Brasil, ver Figuras 4.2 e 4.3. A Figura 4.5 mostra o formato final do par de engrenagens produzido neste trabalho.



Figura 4.5: Par de engrenagens parafuso sem fim

4.9 Ensaio em bancada de teste do porta-estepe

Os ensaios em bancada foram executados utilizando-se uma bancada de teste do porta-estepe, de modo a repetir os movimentos necessários para a troca de estepe com peso aproximado de 1320 N. A Figura 4.6 (a) mostra a foto do porta-estepe montado na bancada, e a Figura 4.6 (b), a foto da bancada com identificação dos seus componentes.

O estepe deve ser baixado e erguido até o porta-estepe. O operador e a alavanca do porta-estepe foram substituídos por um motor elétrico trifásico com potência nominal de 1119 W e 1700 rpm. Esse está acoplado a um redutor que transmite a rotação de 29 rpm para o eixo do porta-estepe que baixa o estepe por meio de uma corda até a distância de 370 mm. Nesse ponto, existe um sensor que é ativado, invertendo-se a rotação do motor elétrico que eleva o estepe na posição inicial onde há outro sensor que volta a inverter a rotação do motor elétrico para novamente descer o estepe. O tempo do ciclo de operação é de aproximadamente 134 s, ver Figura 4.6.

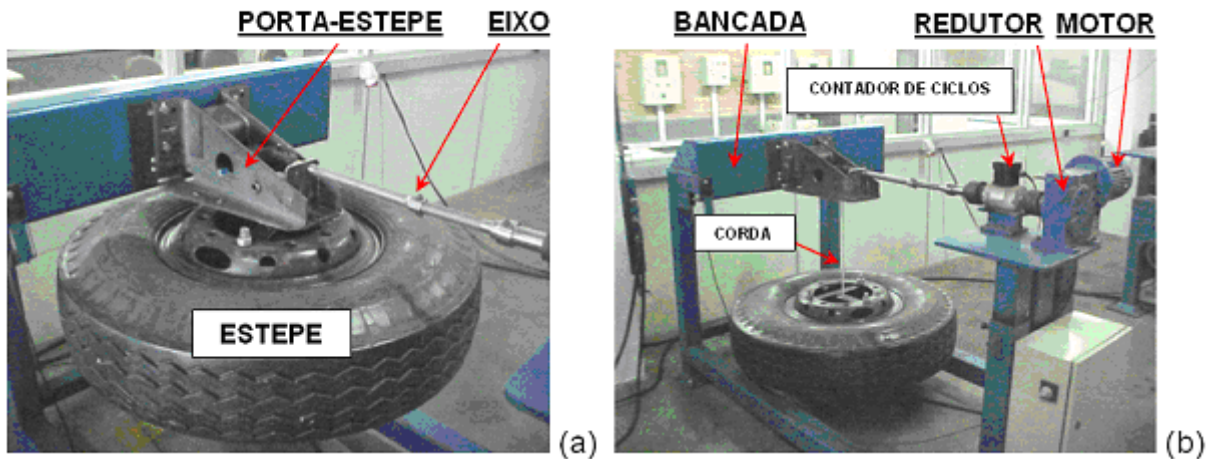


Figura 4.6: Fotos do porta-estepe montado na bancada (a) e da bancada que ilustra seus componentes (b)

A Figura 4.7 mostra a disposição do par de engrenagens no porta-estepe para acionamento do mecanismo ou da operação desejada na troca do estepe.

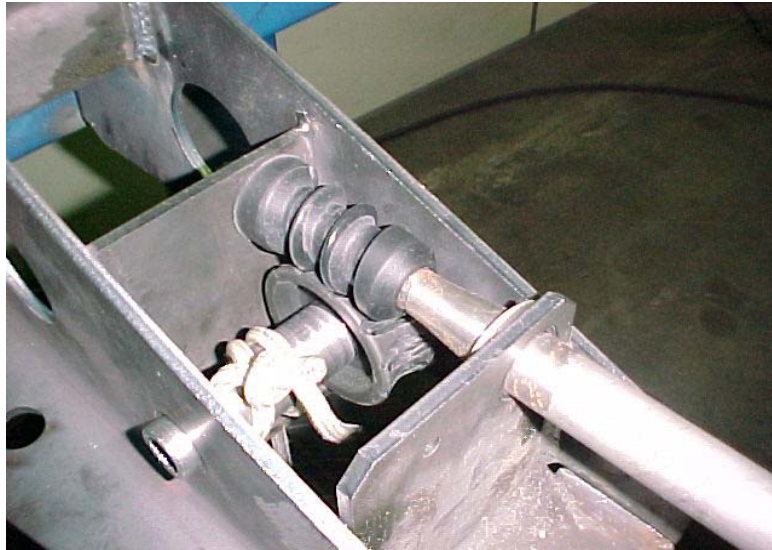


Figura 4.7: Foto do par de engrenagens no mecanismo do porta-estepe

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A engrenagem parafuso sem fim foi escolhida para a aplicação no mecanismo do porta-estepe de caminhão, por transmitir torque em eixos perpendiculares, e por apresentar maior capacidade de carga que as engrenagens helicoidais de eixos cruzados^[14]. A reversão do movimento é também um fator importante na engrenagem parafuso sem fim, uma vez que é indesejável que ocorra no mecanismo do porta-estepe. O ângulo de hélice (λ) é menor que o ângulo de pressão (α); portanto, não ocorre a reversão do movimento^[13], ver Figuras 4.2 e 4.3. Ou seja, se o pneu está subindo e o torque é cessado, não ocorrerá o movimento contrário, no sentido do pneu descer ou cair e, porventura, ferir o operador.

Os nove materiais termoplásticos selecionados apresentam propriedades de interesse para a fabricação do par de engrenagens. A alta resistência ao impacto e à abrasão do polipropileno, e a alta resistência à tração e à flexão das poliamidas 6 e 66, as quais são intensificadas pelo uso de fibra de vidro, e cujo o aumento da proporção desta, no composto, comprometem a sua resistência ao impacto e à abrasão. A amostra de PP, selecionada nesse trabalho, tem aplicações, como exemplo, em buchas de eixos de mancais, enquanto que as poliamidas e os poliésteres líquido cristalinos são aplicáveis em polias e engrenagens.

A absorção de umidade das poliamidas aumenta a sua tenacidade e melhora sua resistência ao impacto, pois flexibiliza as moléculas misturadas com fibra de vidro. Por outro lado, a umidade diminui a resistência à tração e à flexão, comparando-se a uma poliamida com menor umidade absorvida.

O poliéster de cristal líquido possui facilidade de cristalização, devido ao alinhamento das suas moléculas, o que garante uma alta resistência mecânica à tração e à flexão, intensificadas pela adição de grafite; no entanto, devido à estrutura rígida e altamente cristalizada do poliéster e ao grafite, situado entre suas moléculas alinhadas, apresenta baixa resistência à abrasão e ao impacto, como observado para o LCP *Vectra* A625 com 25% de grafite. O conhecimento da relação entre a propriedade e a estrutura do material mostra as vantagens e as desvantagens de uma família de polímeros com propriedades relevantes no processo de seleção.

Na primeira etapa desse trabalho foram realizados ensaios de maneira a expor as propriedades dos materiais, como a resistência à tração e à flexão, os módulos de elasticidade, a resistência ao impacto e à abrasão, com e sem intemperismo e o seu comportamento dinâmico-mecânico.

A flexão no dente do pinhão representa um ponto crítico, pois apresenta similaridade a uma viga engastada numa das extremidades e livre na outra, enquanto que os dentes da coroa estão cercados de massa termoplástica por todos os lados, funcionando como uma cavidade, como pode ser visto na Figura 4.5. A flexão resulta em tração e compressão nas faces e flancos opostos do dente do pinhão, o que pode ocasionar tensões suficientes para deformar elástica ou plasticamente, levando a deformações permanentes ou até a quebra do dente na raiz, local de maior momento fletor. A ocorrência de desgaste seja por deformação permanente ou por abrasão, tanto no dente do pinhão quanto no dente da coroa, prejudica o engrenamento, a vida útil e a eficiência do par de engrenagens diminuem. Sabe-se que as intempéries têm o efeito de despolimerizar as cadeias enfraquecendo e até quebrando as ligações inter e intramoleculares, o que aumenta a abrasão. As amostras, portanto, foram analisadas antes e após estarem sujeitas às intempéries.

A transição de sólido rígido para sólido dúctil, como um elastômero, ocorre pelo aumento da temperatura e na temperatura de transição vítrea do material. A T_g determinada pelo pico no gráfico da tangente delta está relacionada com o módulo de perda, responsável pelas características viscosas, e o módulo de armazenamento diz respeito às características elásticas do polímero. Quanto maior o módulo de armazenamento maior a rigidez do polímero, aumentando sua resistência mecânica à tração e à flexão. No entanto, a parte viscosa do material, analisada pelo módulo de perda, torna o material mais resistente ao impacto. Dos nove polímeros selecionados os três polímeros que apresentaram os maiores valores em mais propriedades foram classificados para a segunda etapa do trabalho.

O processo de fabricação é de suma importância, pois afeta diretamente a produtividade e a vida útil do equipamento, a máquina injetora de termoplásticos. Na segunda etapa foram selecionados dois dos três polímeros classificados na etapa anterior em função das suas características reológicas serem mais adequadas na injeção em molde metálico, do par de engrenagens.

A produtividade é melhorada quando não é necessário interromper o ciclo de injeção para retirar excesso de material fundido do bico de injeção. Esse tipo de problema pode ser acarretado pelo excesso de fluidez ou pela baixa viscosidade do material, sendo necessário utilizar um bico de injeção especial, quando não houver alternativa de material para a fabricação da peça injetada. O desgaste da rosca da máquina injetora é uma consequência da alta viscosidade do material, sendo necessário aumentar a pressão de injeção para completar a cavidade do molde, a fim de que a peça seja injetada sem defeitos devido à falta de material.

A partir dos dois polímeros selecionados na última etapa, foram feitas três combinações de pares de engrenagens. A última etapa do trabalho foi selecionar o material com melhor desempenho como engrenagem de porta-estepe de caminhão, sendo essa avaliada em bancada de testes. Foi observado a olho nu quando ocorriam desgastes, deformações permanentes ou rupturas tanto no pinhão quanto na coroa da engrenagem. O ensaio em bancada era interrompido, quando o funcionamento do porta-estepe fosse comprometido, registrando-se, então, o número de ciclos e os defeitos apresentados na coroa ou no pinhão.

A Figura 5.1 mostra o fluxograma para produção das peças técnicas envolvendo as três etapas descritas, nas quais os testes necessários e suficientes foram executados com o objetivo de se selecionar o material termoplástico mais adequado para a fabricação do par de engrenagens.

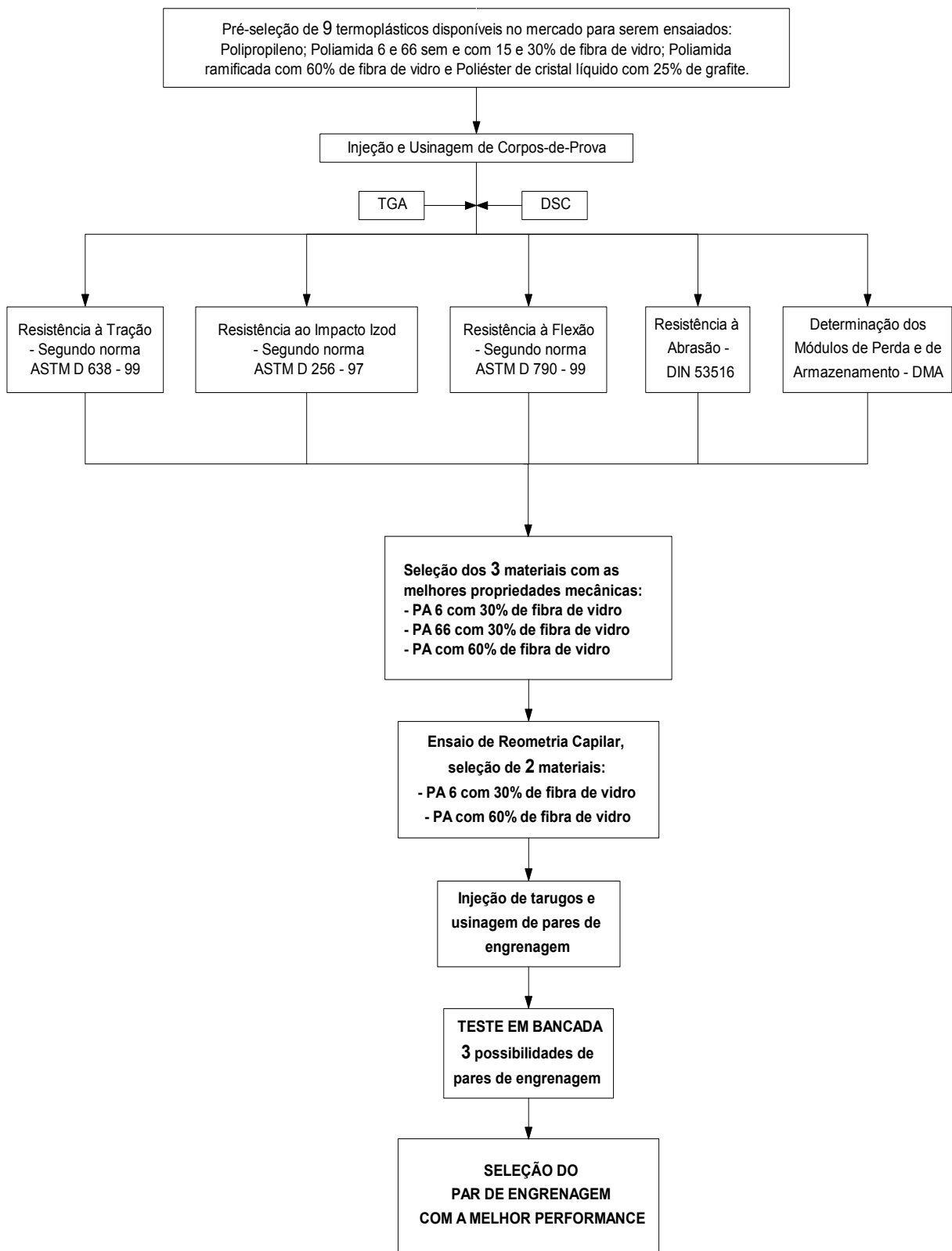


Figura 5.1: Fluxograma das etapas do desenvolvimento do trabalho

5.1 Avaliação das características térmicas dos polímeros

A Figura 5.2 mostra o termograma de DSC da amostra de PA 6 sem fibra de vidro, no qual se observa o pico endotérmico correspondente à temperatura de fusão do polímero em 218,75°C e o pico exotérmico correspondente à temperatura de cristalização em 190,29°C.

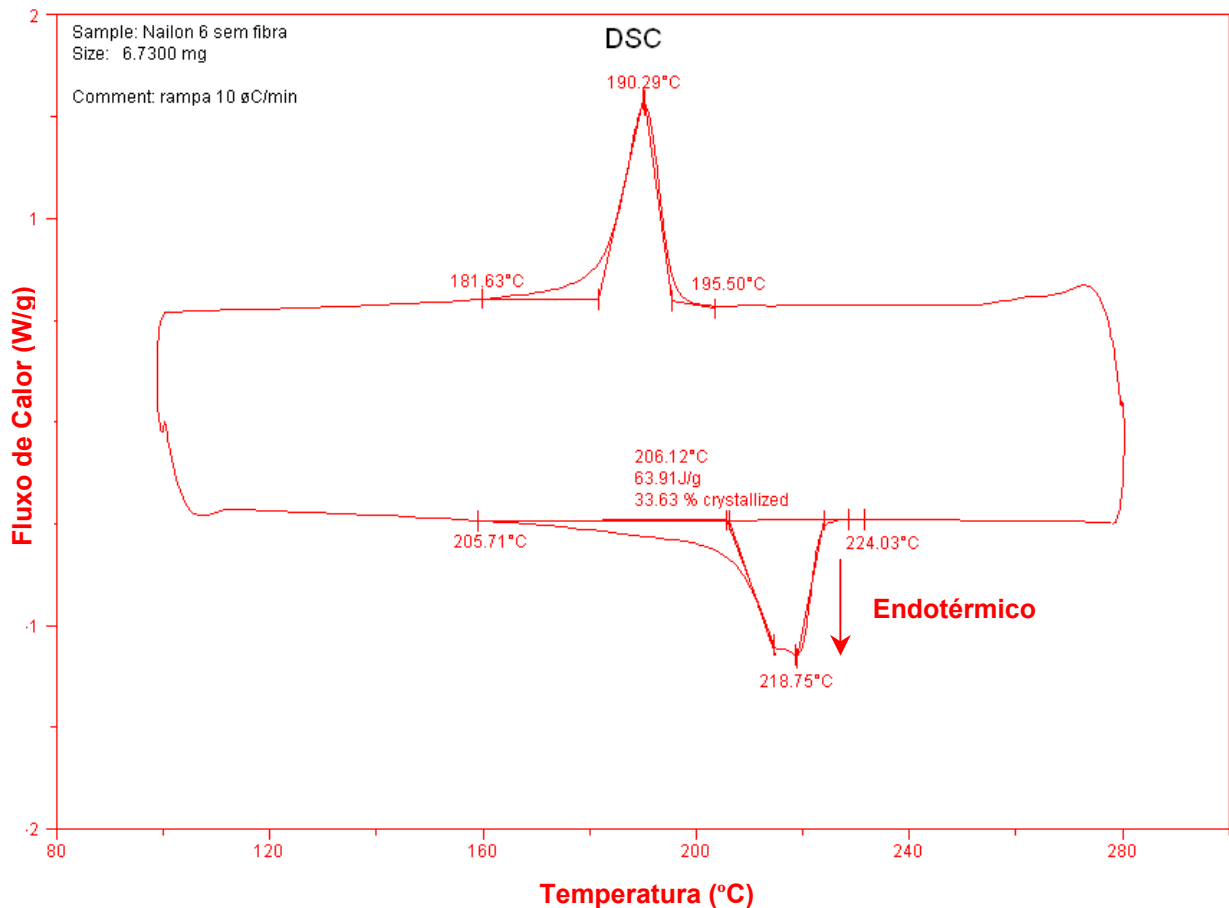


Figura 5.2: Termograma de DSC da amostra de PA 6 sem fibra de vidro

As temperaturas de fusão e de cristalização e suas respectivas faixas, bem como as cristalinidades dos materiais termoplásticos pré-selecionados estão relacionadas na Tabela 5.1, as quais foram obtidas através de DSC, cujos termogramas se encontram no Anexo 1. O poliéster *Vectra* apresentou picos de fusão e cristalização no termograma, porém não foi determinado o percentual de cristalinidade, devido ao seu estado nemático não apresentar uma transição sólida líquida bem definida, conforme mostra sua curva endotérmica no Anexo 1.8.

As poliamidas apresentaram uma temperatura de fusão superior a 215°C, não se observando o efeito da fibra de vidro no valor desta, e uma temperatura de cristalização em torno de 190°C para as PA 6 e 230°C para as PA 66, não sendo influenciada pela variação da porcentagem de fibra de vidro.

A faixa de temperatura de fusão indica o intervalo acima do qual o polímero deve ser processado. A faixa de temperatura de cristalização é importante, pois é nessa faixa que o polímero cristaliza e é abaixo desta que a peça plástica deve ser extraída através da abertura do molde de injeção. Por exemplo, uma peça de PA 66 sem carga deverá ser extraída do molde a uma temperatura inferior à faixa de cristalização de 227°C a 236°C. Esses intervalos de temperatura estão mostrados na Tabela 5.1.

A presença da fibra não tem influência na porcentagem de cristalinidade das amostras, conforme mostram os valores da Tabela 5.1. Os valores de cristalinidade apresentados nessa tabela foram calculados a partir dos termogramas do Anexo 1. Os valores mostrados nos gráficos do Anexo 1 foram arredondados, conservando-se os dígitos significativos, considerando-se a incerteza dos resultados mostrados na Tabela 5.1 de $\pm 2,5\%$, de acordo com o fabricante do equipamento.

Tabela 5.1 – Temperatura de fusão e cristalização, e respectivas faixas e percentual de cristalinidade dos materiais termoplásticos pré-selecionados

Parâmetros:	Material:								
	PP	PA 6	PA 6 15%FV	PA 6 30%FV	PA 66	PA 66 15%FV	PA 66 30%FV	PA 60%FV*	Vectra A625**
Temperatura de Fusão (°C)	163	219	219	216	262	262	262	217	278
Faixa de Fusão (°C)	157	207	205	209	245	245	247	201	273
	- 171	- 225	- 224	- 225	- 268	- 266	- 265	- 220	- 282
Temperatura de Cristalização (°C)	114	190	190	192	232	232	232	178	235
Faixa de Cristalização (°C)	108	182	183	186	227	227	228	172	226
	- 119	- 196	- 193	- 196	- 236	- 235	- 235	- 184	- 240
Cristalinidade (%)	37	35	38	38	37	37	39	35	-

* Poliamida ramificada marca *Technylstar SX218 V60* com 60% de fibra de vidro

** Poliéster de Cristal Líquido marca *Vectra A625* com 25% de grafite

O processamento dos polímeros deve ser sempre em temperaturas inferiores àquela de sua decomposição, ou da faixa de degradação do polímero. A Figura 5.3 mostra o termograma de TGA da PA 6 com 15% de fibra de vidro, com temperatura de decomposição máxima em 465,93°C, com 3,34% de negro de fumo e resíduo de 18,63% referente à fibra de vidro.

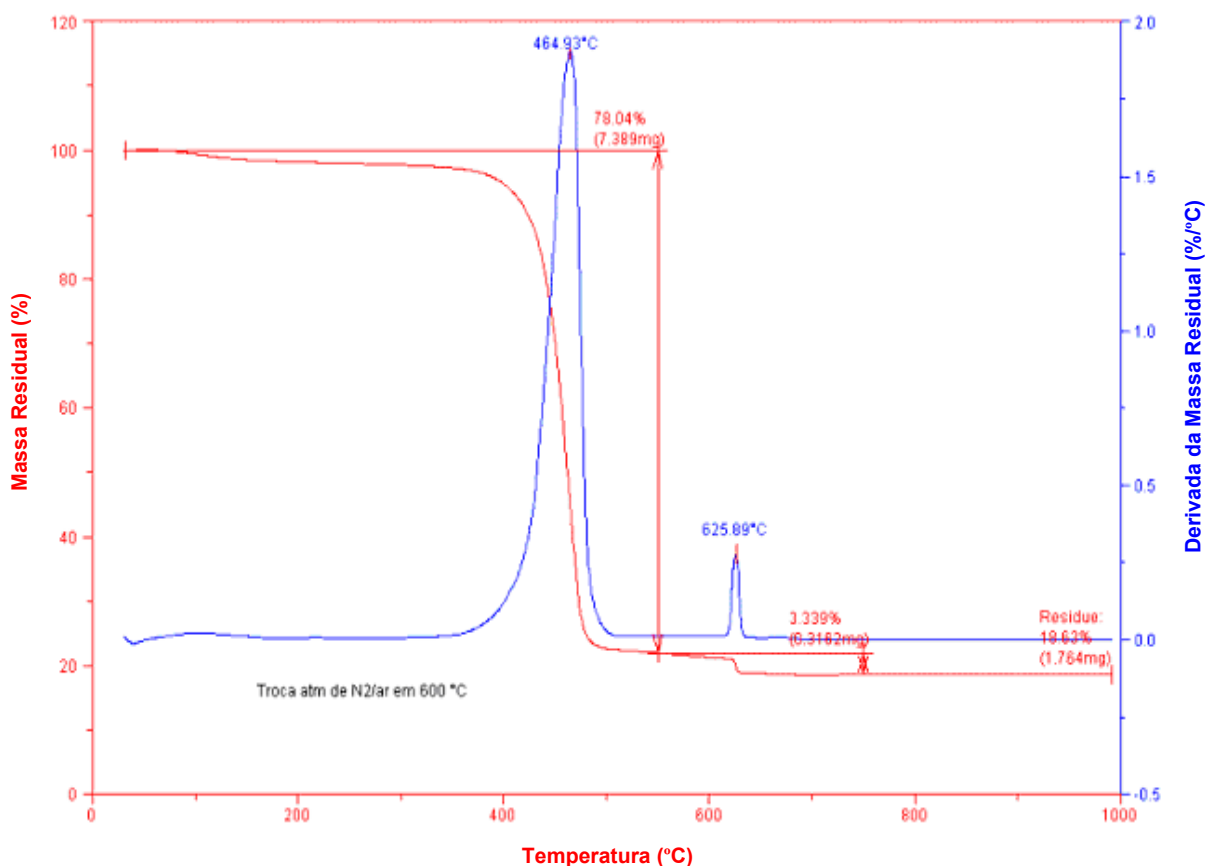


Figura 5.3: Termograma de TGA da amostra de PA 6 com 15% fibra de vidro

A Tabela 5.2 mostra a faixa da temperatura de decomposição, a temperatura de decomposição máxima e o percentual de massa dos materiais termoplásticos, cujos termogramas de TGA encontram-se no Anexo 2. As maiores variações de resíduo em relação ao especificado foram observadas para o material PA 6 15% FV com 18,63% de resíduo, e para a PA 66 30% FV com resíduo de 27,75%. Essa variação foi devido à necessidade de se misturar polímeros com diferentes porcentagens de fibra em laboratório, para se obterem as PA 6 com 15% e a PA 66 com 30% de fibra de vidro. A PA *Technylstar* com 60% de fibra de vidro foi utilizada conforme fornecida pelo fabricante, apresentando nas condições de análise valor nominal de 58,79% de resíduo. O poliéster de cristal líquido *Vectra* apresentou

19,17% de grafite e 2,06% de cinza, esse funde na faixa de 273°C a 282°C, e deve ser processado no seu estado fundido, porém sempre abaixo da faixa de degradação de 455°C a 708°C.

Os valores mostrados nos gráficos do Anexo 2 foram arredondados, conservando-se os dígitos significativos, considerando-se a incerteza dos resultados mostrados na Tabela 5.2 de $\pm 0,1\%$, de acordo com o fabricante do equipamento.

Tabela 5.2 – Temperatura de decomposição, perda de massa e resíduo dos polímeros pré-selecionados

Parâmetros:	Material:						
	PA 6	PA 6 15%FV	PA 6 30%FV	PA 66 15%FV	PA 66 30%FV	PA 60%FV*	Vectra A625**
Temperatura máxima de degradação (°C)	467	465	469	452	454	475	524
Faixa de degradação (°C)	352	350	350	352	352	345	455
	- 518	- 518	- 518	- 518	- 518	- 518	- 708
Perda de massa (%)	97,24	78,04	69,21	83,12	68,65	38,72	78,78
Negro de fumo (%)	2,62	3,34	2,65	3,20	3,60	2,44	19,17 (grafite)
Resíduo (%) (Fibra de vidro)	0,28	18,63	28,18	13,68	27,75	58,79	2,06 (cinzas)

* Poliamida ramificada marca *Technylstar SX218 V60* com 60% de fibra de vidro;

** Poliéster de Cristal Líquido marca *Vectra A625* com 25% de grafite.

5.2 Avaliação do comportamento mecânico das amostras

O comportamento mecânico das amostras foi avaliado de modo a comparar a resistência mecânica dos materiais sob as mesmas condições de ensaio, conforme as respectivas normas ASTM^[31-34,36] e DIN^[37] especificam, sendo que as poliamidas foram avaliadas duplamente, sem e com tratamento térmico em água em ebulição. As propriedades mecânicas foram avaliadas considerando-se os esforços presentes no engrenamento dos dentes do par de engrenagens, ou seja, a flexão nos dentes resulta em tração. Um torque instantâneo no par de engrenagens resulta em impacto no dentado, e o desgaste por perda de massa dos dentes é determinado pela sua resistência à abrasão. Finalmente os módulos de perda e armazenamento determinam o comportamento viscoelástico fundamental na avaliação das deformações dos dentes da engrenagem.

5.2.1 Resistência à tração

Esse ensaio se caracteriza pela medição da tensão de tração quando o corpo-de-prova é deformado a uma taxa constante. O gráfico obtido de tensão *versus* deformação fornece a tensão máxima ou o limite de resistência à tração e sua respectiva deformação e o módulo de elasticidade. Nessa dissertação foram analisados cinco corpos-de-prova de cada amostra. A Figura 5.4 mostra as curvas de tensão *versus* deformação da poliamida 6 com 30% de fibra de vidro sem tratamento.

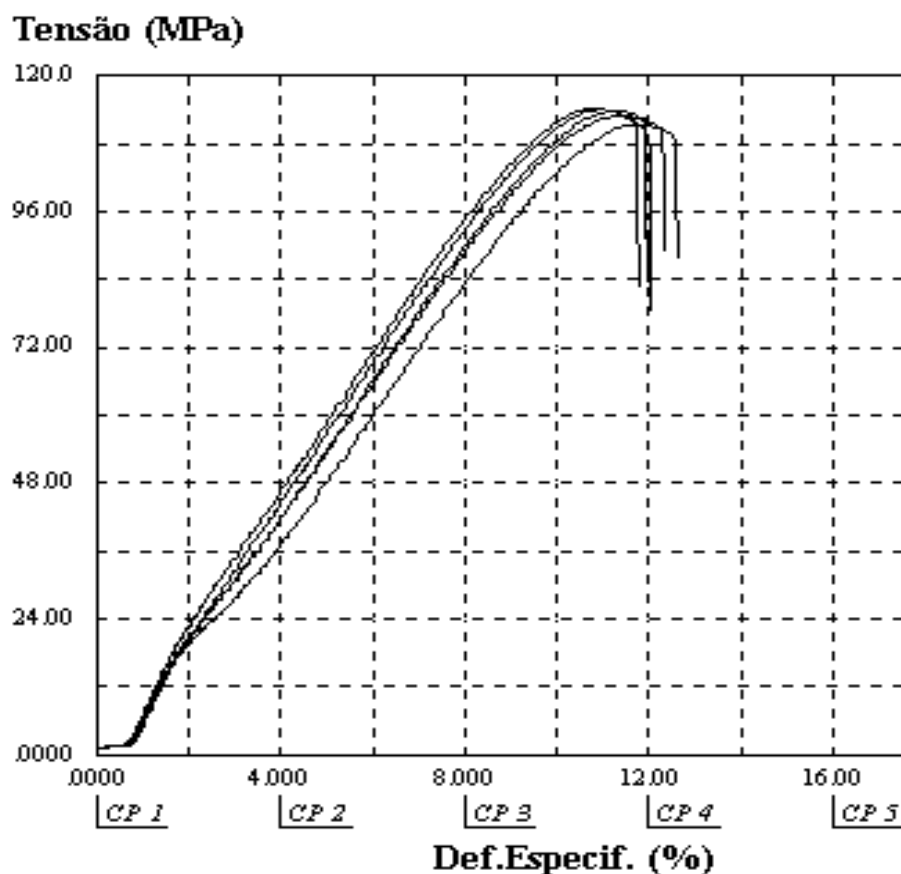


Figura 5.4: Tensão de tração *versus* deformação da amostra PA 6 com 30% de FV sem tratamento (05 corpos-de-prova)

A Tabela 5.3 mostra os valores de tensão, deformação, módulo e energia correspondentes às curvas de tensão-deformação dos cinco corpos-de-prova da PA 6 com 30% de FV sem tratamento, bem como os valores médios tomados como representativos da amostra e os respectivos desvios-padrão. As curvas de tensão

deformação e as respectivas tabelas com os valores das propriedades dos demais polímeros se encontram no Anexo 3. A Tabela 5.4 mostra comparativamente os valores de limite de resistência à tração e módulo de elasticidade de todas as amostras pré-selecionadas e os respectivos desvios-padrão.

Tabela 5.3 – Valores de tensão, deformação, módulo e energia dos cinco corpos-de-prova da PA 6 com 30% de FV sem tratamento, para o ensaio de tração

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Tensão Ruptura (MPa)	Def.Especif. Ruptura (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Ruptura (J)
CP 1	33.26	111.4	11.67	110.7	12.20	1146	12.30
CP 2	33.29	112.9	11.31	111.9	11.93	1128	12.53
CP 3	33.13	114.3	10.78	109.6	12.02	1167	13.39
CP 4	33.16	113.8	11.18	109.5	12.51	1048	13.64
CP 5	33.19	114.1	10.92	111.8	11.71	1058	12.55
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	33.21	113.3	11.17	110.7	12.07	1109	12.88
Mediana	33.19	113.8	11.18	110.7	12.02	1128	12.55
Desv.Padrão	.06802	1.184	.3471	1.129	.2987	53.57	.5922
Coef.Var.(%)	.2048	1.045	3.107	1.020	2.474	4.829	4.598
Mínimo	33.13	111.4	10.78	109.5	11.71	1048	12.30
Máximo	33.29	114.3	11.67	111.9	12.51	1167	13.64

Tabela 5.4 – Limites de resistência à tração e módulo de elasticidade por amostra

Material:	Limite de Resistência à Tração (MPa):	Desvio-Padrão:	Módulo de Elasticidade à Tração (MPa):	Desvio-Padrão:
PP	21,39	0,20	407,10	8,67
PA 6 (ST)	45,53	0,42	702,20	42,88
PA 6 (CT)	31,00	22,54	208,00	22,71
PA 6 15%FV (ST)	75,38	1,14	608,20	32,94
PA 6 15%FV (CT)	47,77	2,69	659,00	225,60
PA 6 30%FV (ST)	113,30	1,18	1109,00	53,57
PA 6 30%FV (CT)	95,75	1,13	1053,00	262,6
PA 66 (ST)	62,90	0,49	897,50	35,61
PA 66 (CT)	50,46	0,59	495,90	126,50
PA 66 15%FV (ST)	76,20	2,17	1322,00 (3°)	105,00
PA 66 15%FV (CT)	66,35	1,70	539,60	247,60
PA 66 30%FV (ST)	147,00 (2°)	2,32	1160,00	286,70
PA 66 30%FV (CT)	121,50	1,94	989,70	161,90
PA 60%FV* (ST)	217,70 (1°)	3,31	1979,00 (2°)	267,30
PA 60%FV* (CT)	172,10	1,55	1476,00	153,50
Vectra A625**	122,30 (3°)	2,46	2392,00 (1°)	55,58

* Poliamida ramificada marca *Technylstar SX218 V60* com 60% de fibra de vidro

** Poliéster de Cristal Líquido marca *Vectra A625* com 25% de grafite

(CT) - Com Tratamento; (ST) - Sem Tratamento

O trabalho de Qu et al^[40] avaliou as propriedades mecânicas do PP, obtendo resultados de limite de resistência à tração de 34,0 MPa e de cristalinidade de 40,2%. Comparando-se com os resultados das Tabelas 5.4 e 5.1: limite de resistência à tração de 21,39 MPa e cristalinidade de 37%, respectivamente, verifica-se que um sutil aumento da cristalinidade pode aumentar a resistência a tração.

A seleção dos polímeros nessa etapa foi feita considerando os três polímeros com os maiores limites de resistência à tração em negrito nas tabelas, observando-se que o critério de seleção não é o tratamento térmico, mas o material dos corpos-de-prova. Por isso, a PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV não foi escolhida duas vezes. O mesmo critério se aplica aos módulos de elasticidade à tração.

Os polímeros que apresentaram os maiores limites de resistência à tração em ordem decrescente foram a PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV, a PA linear 66 com 30% de FV, e o *Vectra A625*. As poliamidas sem tratamento apresentaram valores de resistência à tração superiores àqueles valores dos mesmos polímeros com tratamento térmico. A cristalinidade também influencia a resistência à tração, uma vez que une as regiões amorfas. A maior contribuição da cristalinidade é na rigidez do material, tendo, portanto, maior influência no módulo de elasticidade. A presença de fibra de vidro no polímero, por ser um material de alto módulo afeta ambos: a resistência à tração e o módulo do material. Desse modo, polímeros com carga ou com alto teor de FV tendem a ser mais resistentes e apresentar maior módulo. No entanto, deve-se considerar que a presença de FV no polímero dificulta a sua processabilidade, devendo-se encontrar um equilíbrio entre composição adequada e boa processabilidade. Os polímeros que apresentaram maior módulo de elasticidade em ordem decrescente foram o LCP *Vectra* com 25% de grafite, a PA ramificada *Technylstar* com 60% de fibra de vidro e a PA linear 66 com 15% de FV, ambas sem tratamento térmico. Os anéis aromáticos na cadeia e a alta Tg do poliéster de cristal líquido são responsáveis pelo maior módulo de elasticidade do *Vectra*.

Os melhores polímeros selecionados nesse ensaio foram a PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV, o LCP *Vectra* com 25% de grafite e as PA 66 de cadeia linear com 15 e 30% de FV. O PP e a PA 6 sem carga, devido aos baixos valores de propriedades, foram descartados nessa etapa.

5.2.2 Resistência à flexão

O ensaio normalizado de resistência à flexão, tipo viga bi-apoiada, com aplicação de carga no centro do corpo-de-prova e com taxa de deformação constante, cuja curva de tensão-deformação da PA 6 com 30% de FV sem tratamento, mostrada na Figura 5.5, permite obter dados de tensão máxima, deformação e módulo de elasticidade. As curvas e tabelas relativas ao ensaio de flexão das demais amostras se encontram no Anexo 4.

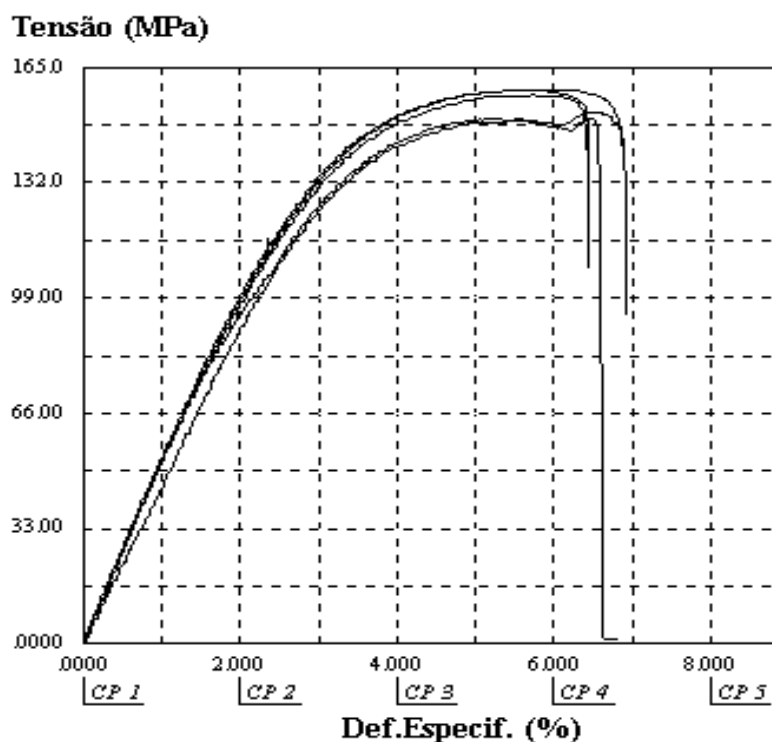


Figura 5.5: Tensão de flexão versus deformação da amostra PA 6 com 30% de FV sem tratamento (05 corpos-de-prova)

A Tabela 5.6 mostra os valores de limite de resistência à flexão e o módulo de elasticidade dos polímeros pré-selecionados e os respectivos desvios-padrão. As amostras com maior limite de resistência à flexão, em ordem decrescente, foram a PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV sem tratamento térmico, a PA 66 e a PA

6 ambas com 30% de FV sem tratamento térmico. As amostras com maior módulo de elasticidade à flexão em ordem decrescente foram a PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV sem tratamento térmico, o LCP *Vectra A625* com 25% de grafite e, finalmente, as poliamidas 6 e 66, ambas com 30% de fibra de vidro sem tratamento.

As propriedades das quatro amostras com os maiores valores de propriedades quanto ao teste de flexão, no que diz respeito à tensão máxima de flexão e ao módulo de elasticidade, são uma consequência dos entrelaçamentos na região amorfa, cristalinidade e presença de fibras no material, como já observado no ensaio de tração.

Tabela 5.5 – Valores de tensão, deformação, módulo e energia de flexão dos cinco corpos-de-prova da PA 6 com 30% de FV sem tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.748	157.4	5.733	5171	1525
CP 2	1.750	158.8	5.971	5453	1647
CP 3	1.751	150.2	5.511	4622	1358
CP 4	1.758	151.9	6.413	5270	1737
CP 5	1.745	158.5	5.353	5541	1392
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.750	155.3	5.796	5211	1532
Mediana	1.750	157.4	5.733	5270	1525
Desv.Padrão	.004827	4.032	.4162	360.4	162.3
Coef.Var.(%)	.2758	2.596	7.181	6.916	10.60
Mínimo	1.745	150.2	5.353	4622	1358
Máximo	1.758	158.8	6.413	5541	1737

A partir do teste de flexão, a seleção dos polímeros foi feita com base naqueles três polímeros com os maiores limites de resistência à flexão, observando-se que o critério de seleção não é o tratamento térmico, mas o material dos corpos-de-prova. O mesmo critério se aplica aos módulos de elasticidade à flexão.

Os melhores polímeros selecionados nesse ensaio foram a PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV, o LCP *Vectra* com 25% de grafite e as poliamidas 6 e 66 de cadeia linear ambas com 30% de FV, conforme mostra a Tabela 5.6. O PP e o PA 6 sem carga, devido aos baixos valores de suas propriedades em relação às demais amostras, apresentaram-se como materiais inadequados para a aplicação almejada, ou seja, o par de engrenagem tipo parafuso sem fim.

Tabela 5.6 – Limites de resistência à flexão e módulo de elasticidade por amostra

Material:	Limite de Resistência à Flexão (MPa):	Desvio-Padrão:	Módulo de Elasticidade à Flexão (MPa):	Desvio-Padrão:
PP	24,43	0,17	786,40	19,71
PA 6 (ST)	37,53	0,97	812,70	89,48
PA 6 (CT)	28,43	1,45	639,50	58,95
PA 6 15%FV (ST)	103,60	1,84	2764,00	259,10
PA 6 15%FV (CT)	51,05	0,74	1230,00	18,01
PA 6 30%FV (ST)	155,30 (3°)	4,03	5211,00	360,40
PA 6 30%FV (CT)	130,70	2,48	3927,00	309,30
PA 66 (ST)	68,59	0,84	1670,00	142,50
PA 66 (CT)	48,68	3,67	1182,00	76,46
PA 66 15%FV (ST)	120,40	1,50	3123,00	74,23
PA 66 15%FV (CT)	96,02	6,48	2347,00	127,10
PA 66 30%FV (ST)	194,00 (2°)	1,45	5632,00 (3°)	166,00
PA 66 30%FV (CT)	167,10	1,91	4829,00	177,30
PA 60%FV* (ST)	313,00 (1°)	0,81	14750,00 (1°)	178,80
PA 60%FV* (CT)	210,20	3,84	8869,00	2033,00
Vectra A625**	123,30	1,40	8338,00 (2°)	266,90

* Poliamida ramificada marca *Technylstar SX218 V60* com 60% de fibra de vidro

** Poliéster de Cristal Líquido marca *Vectra A625* com 25% de grafite

(CT) - Com Tratamento; (ST) - Sem Tratamento

5.2.3 Resistência ao impacto

Os testes de impacto se caracterizam como testes de fratura de alta velocidade de impacto, que medem a energia necessária para romper um corpo-de-prova com entalhe em forma de “V”.

Foram ensaiados dez corpos-de-prova para cada tipo de amostra; para as poliamidas foram executados dez ensaios com corpos-de-prova sem tratamento (ST) e dez com corpos-de-prova com tratamento térmico (CT) com água em ebulição.

A Tabela 5.7 mostra os valores médios e os respectivos desvios padrão de energia absorvida e de resistência ao impacto das amostras em testes executados à 22°C, sendo a resistência ao impacto, a energia absorvida pela área da seção transversal do corpo-de-prova na região do entalhe. Os números em negrito na Tabela 5.7 destacam os maiores valores por material obtidos no ensaio de impacto Izod.

Tabela 5.7 – Energia absorvida e resistência ao impacto por material

Material:	Energia Absorvida (J):	Desvio-Padrão:	Resistência ao Impacto (kJ/m ²):	Desvio-Padrão:
PP	1,544	0,086	47,130 (1º)	1,880
PA 6 (ST)	0,155	0,049	4,640	1,560
PA 6 (CT)	0,415	0,027	12,110	0,930
PA 6 15%FV (ST)	0,110	0,010	3,230	0,310
PA 6 15%FV (CT)	0,254	0,027	7,610	0,810
PA 6 30%FV (ST)	0,221	0,009	6,460	0,260
PA 6 30%FV (CT)	0,252	0,012	7,340	0,360
PA 66 (ST)	0,040	0,000	1,190	0,020
PA 66 (CT)	0,079	0,011	2,330	0,350
PA 66 15%FV (ST)	0,126	0,005	3,710	0,140
PA 66 15%FV (CT)	0,165	0,013	4,910	0,370
PA 66 30%FV (ST)	0,304	0,022	9,040	0,610
PA 66 30%FV (CT)	0,340	0,016	9,870 (3º)	0,470
PA 60%FV* (ST)	0,506	0,048	14,910	1,370
PA 60%FV* (CT)	0,596	0,040	17,650 (2º)	1,380
<i>Vectra A625**</i>	0,146	0,014	4,280	0,430

* Poliamida ramificada marca *Technylstar SX218 V60* com 60% de fibra de vidro

** Poliéster de Cristal Líquido marca *Vectra A625* com 25% de grafite

(CT) - Com Tratamento; (ST) - Sem Tratamento

Os polímeros com maior resistência ao impacto foram o polipropileno e as poliamidas com tratamento térmico ramificada *Technylstar* com 60% de FV e linear 66 com 30% de FV. A energia necessária para romper não somente ligações primárias e secundárias, mas para também deformar o material durante o ensaio foi consideravelmente maior para o PP do que para o restante dos polímeros. A flexibilização das moléculas dissipa energia do impacto absorvido também sob a forma de calor e, quanto maior for essa energia absorvida, maior será a energia requerida para quebrar o corpo-de-prova. O tratamento térmico dado às poliamidas com 60% e 30% de fibra de vidro favorece uma reorganização da região amorfa flexível com diminuição de pontos de tensão elevando sua resistência ao impacto.

5.2.4 Resistência à abrasão e às intempéries

A abrasão é caracterizada pela perda progressiva de partes ou partículas de uma substância pela ação mecânica da fricção de uma superfície contra outra a uma velocidade e pressão de contato constantes. Nesse ensaio foram coletados os dados de porcentagem de perda de massa relativa em duas situações distintas de condicionamento das amostras. Numa cinco dos dez corpos-de-prova por amostra foram ensaiados sem exposição à câmara de envelhecimento acelerado, noutra os

cinco corpos-de-prova restantes foram expostos aos raios UVB e à condensação de água. A Tabela 5.8 mostra os resultados do ensaio de abrasão, através da porcentagem de perda de massa relativa, com os respectivos desvios-padrão.

Os resultados do ensaio de resistência à abrasão são relativos à massa ou ao volume inicial. Considerando-se que as densidades das respectivas amostras são constantes do início ao fim do ensaio e, sabendo-se que a massa é diretamente proporcional ao volume, a porcentagem de perda de massa relativa à massa inicial é igual à porcentagem de perda volumétrica relativa ao volume inicial. Portanto, foram avaliados os desgastes por abrasão em relação a um volume inicial constante, definido pela norma DIN 53516^[37]. Analogamente, é o que ocorre com o par de engrenagens, pois as dimensões estão pré-definidas no projeto (ver Figuras 4.2 e 4.3). O que se deseja é descobrir o material com a melhor performance e não o dimensional com a menor resistência à abrasão.

Tabela 5.8 – Perda de massa relativa (%) por material

Material:	Perda de massa relativa (%):			
	Sem exposição aos raios UVB e à condensação:	Desvio-padrão:	Com exposição aos raios UVB e à condensação:	Desvio-padrão:
PP	6,02	0,68	15,02	0,86
PA 6 (ST)	3,53	0,32	2,92	0,12
PA 6 (CT)	4,45	0,16	3,72	0,65
PA 6 15%FV (ST)	5,39	0,11	7,82	0,37
PA 6 15%FV (CT)	4,48	0,11	7,14	0,34
PA 6 30%FV (ST)	8,42	0,36	8,71	0,61
PA 6 30%FV (CT)	8,37	0,38	9,33	0,43
PA 66 (ST)	3,76	0,38	2,81	0,08
PA 66 (CT)	3,75	0,13	3,11	0,07
PA 66 15%FV (ST)	5,23	0,37	5,17	0,36
PA 66 15%FV (CT)	5,59	0,28	5,47	0,41
PA 66 30%FV (ST)	7,35	0,27	7,71	0,48
PA 66 30%FV (CT)	7,65	0,12	8,40	0,15
PA 60%FV (ST)*	12,43	0,27	10,73	0,33
PA 60%FV (CT)*	12,60	0,24	11,26	0,47
Vectra A625**	21,69	0,39	23,01	0,57

* Poliamida ramificada marca *Technylstar* SX218 V60 com 60% de fibra de vidro

** Poliéster de Cristal Líquido marca *Vectra* A625 com 25% de grafite

(CT) - Com Tratamento; (ST) - Sem Tratamento

A Figura 5.6 mostra a perda de massa relativa média por amostra no teste de abrasão. Os polímeros com exposição aos raios UVB e à condensação de água com as maiores porcentagens de perda de massa relativa, ou menores resistências à abrasão, foram o poliéster de cristal líquido *Vectra* com 25% de grafite com 23,01%, seguido do polipropileno com 15,02% e pela PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV com tratamento térmico com 11,26%. Os materiais com as menores perdas de massa relativas, ou as maiores resistências à abrasão foram as poliamidas sem fibra de vidro PA 66 com 2,81%, seguidas pela PA 6 com 2,92%, ambas sem tratamento térmico, seguidas da PA 66 com tratamento térmico com 3,11%.

O polipropileno avaliado não possui pigmentação; por esse motivo permite uma maior penetração dos raios UVB na sua estrutura, esses raios agem de modo a enfraquecer as ligações inter e intramoleculares, diminuindo a energia necessária para rompê-las e, conseqüentemente, diminuindo significativamente sua resistência à abrasão. As poliamidas 6 e o *Technylstar* com pigmentação preta e o *Vectra* com pigmentação cinza devido à presença de negro de fumo apresentam resistência à penetração dos raios UVB. A poliamida 66 sem pigmentação, como o polipropileno, sofreu maior penetração desses raios em sua estrutura; porém, as pontes de hidrogênio formadas entre as moléculas da poliamida 66 aumentaram sua resistência à abrasão, mesmo sob a ação de intempéries, tornando pouco significativo o efeito dos raios UVB em nível molecular na oxidação do polímero, nas condições do teste. Logo, a maior variação da perda de massa relativa, observada na Figura 5.6, ocorreu com o PP, de 6,02% sem a exposição aos raios UVB e a condensação, para 15,02% com exposição às intempéries.

Os materiais que não foram expostos aos raios UVB e à condensação de água com as menores resistências à abrasão foram o LCP *Vectra* com 25% de grafite, com 21,69%, seguido pela PA *Technylstar* com 60% de FV com tratamento, com 12,60% e a PA 6 com 30% de FV sem tratamento, com 8,42%. Os materiais com as maiores resistências à abrasão foram a PA 6 sem FV e com tratamento, com 3,53% seguida pela PA 66 com tratamento, com 3,75%, e em terceiro lugar a PA 66 com 15% de FV sem tratamento, com 5,23%, conforme mostra a Figura 5.6.

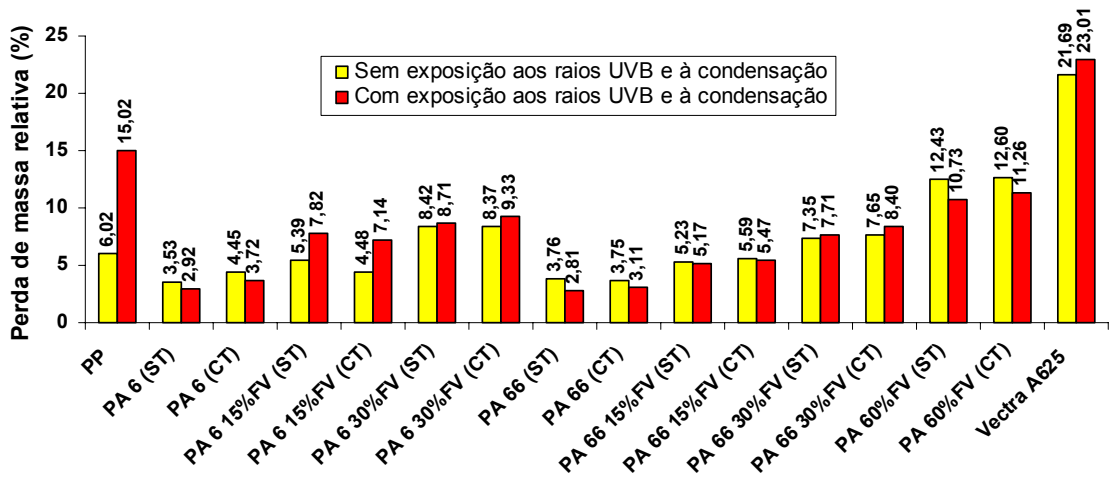


Figura 5.6: Perda de massa relativa (%) das amostras sem e após exposição aos raios UVB e à condensação

As Figuras 5.7 e 5.8 permitem verificar que a variação da perda de massa não foi significativa para as amostras sem e com tratamento térmico em água em ebulição expostas ou não à câmara de envelhecimento acelerado. A partir dos resultados, observa-se que o tratamento térmico tem pouca influência na resistência à abrasão das amostras não expostas à câmara de envelhecimento acelerado, conforme pode ser verificado na Figura 5.7. As amostras sem e com tratamento térmico, expostas à radiação UVB e à condensação de água, também não apresentaram diferenças significativas, conforme mostra a Figura 5.8.

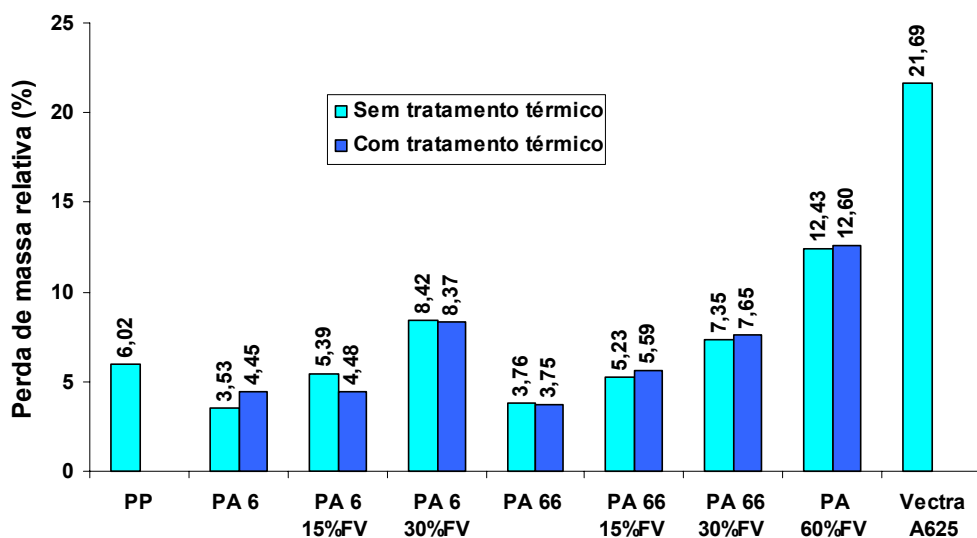


Figura 5.7: Resistência à abrasão das amostras sem e com tratamento térmico

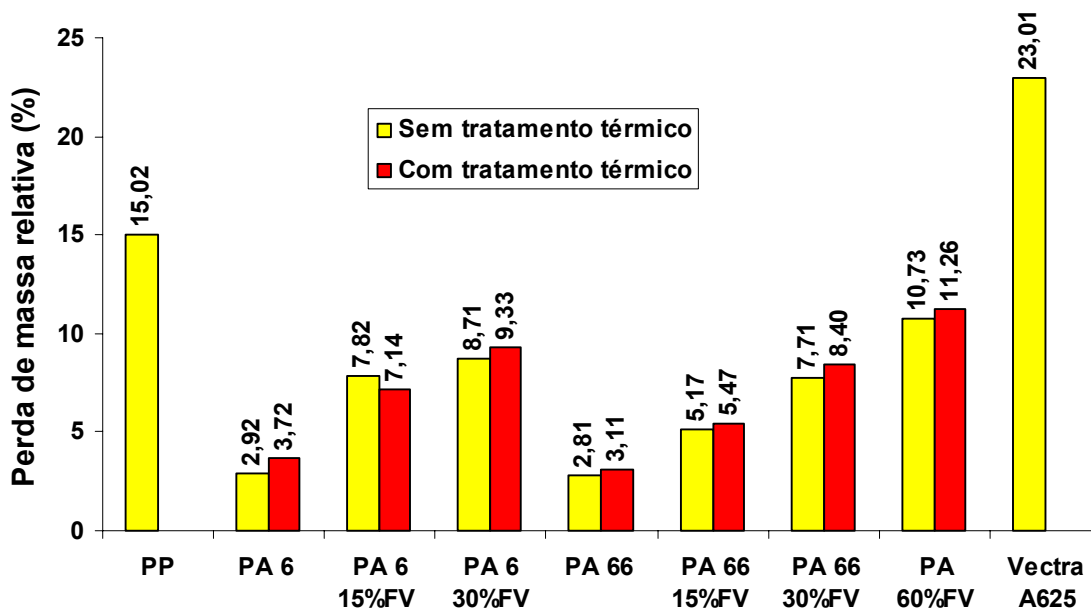


Figura 5.8: Resistência à abrasão das amostras sem e com tratamento térmico expostas aos raios UVB e à condensação de água

A força de atrito é definida pelo produto do coeficiente de atrito do material pela força normal, mantendo-se a força normal constante. Através da aplicação de igual peso nas amostras, a uma velocidade constante, a força de atrito dependerá somente do coeficiente de atrito da amostra, que está relacionado com a estrutura de cada material. A ruptura do material ocorrerá sob a forma de partículas, se a força de atrito exceder às forças intramoleculares quebrando as ligações primárias. Porém, se houver forças secundárias ou intermoleculares suficientemente fortes para suportar a força de atrito, ocorrerá deformação do material pela deformação das cadeias moleculares, sem ruptura das ligações primárias.

O poliéster de cristal líquido *Vectra* com 25% de grafite apresentou a maior porcentagem de perda de massa de todos os polímeros ensaiados. A sua alta rigidez e a presença de 25% em massa de grafite são fatores que aumentam o coeficiente de atrito do material diminuindo sua resistência à abrasão.

A poliamida *Technylstar* com 60% de fibra de vidro possui cadeia molecular ramificada formando maior número de entrelaçamentos que a PA linear; por isso, tem maior dificuldade de empacotamento necessário para a formação de regiões

cristalinas. Um maior número de entrelaçamentos nas regiões amorfas aumenta a resistência à abrasão, pois permite maior deformação do material até a ruptura; por outro lado, a fibra de vidro aumenta a resistência mecânica, apesar de aumentar o coeficiente de atrito e a rigidez do material.

Os testes de abrasão e de resistência às intempéries permitiram observar a melhor e pior resistência das amostras ensaiadas, servindo de critério de desempate entre o LCP *Vectra* com 25% de grafite e a PA 6 com 30% de FV. O material *Vectra* obteve a menor resistência à abrasão de todas as amostras, tendo apresentado o dobro de perda de massa que a poliamida 6 com 30% de fibra de vidro. O LCP foi descartado como possível material a ser utilizado, uma vez que o par de engrenagens poderia sofrer um desgaste prematuro, devido à baixa resistência à abrasão desse material.

5.3 Avaliação do comportamento mecânico-dinâmico das amostras

As propriedades avaliadas nesse ensaio foram o módulo de perda ou viscoso e o módulo de armazenamento ou elástico. A relação entre os componentes de energia viscosa e elástica expressa pela tangente delta ou pelo ângulo de perda permite, através da curva da tangente delta, determinar a temperatura de transição vítrea do polímero. A incerteza dos resultados dos módulos de armazenamento e de perda é de $\pm 1\%$, segundo informações do fabricante do equipamento.

O módulo de armazenamento e o módulo viscoso de um polímero sofrem variação significativa na região de transição vítrea quando o polímero passa do estado sólido rígido para o estado sólido borrachoso. O módulo viscoso passa a ser muito maior que o elástico e então se registra um pico na curva da tangente delta correspondente à temperatura de transição vítrea do polímero. Nesse ensaio o material é submetido a uma carga dinâmica com amplitude de deslocamento e frequência constantes, porém com variação de temperatura. O sistema de aplicação do carregamento, bem como o modo como é apoiado o corpo-de-prova influenciam os resultados do ensaio de DMA. Assim, foi escolhido o sistema *single cantilever*, onde a amostra é engastada numa das extremidades, enquanto que na outra extremidade era aplicado o carregamento, pois o dente de uma engrenagem é

similar a uma viga engastada numa das extremidades e solicitada por carregamento na outra. O procedimento adotado avaliou o mais próximo possível das exigências mecânicas que as amostras deverão atender na aplicação de par de engrenagens.

O maior módulo de armazenamento observado para os polímeros sem tratamento térmico foi o da PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV, seguido pelo LCP *Vectra* com 25% de grafite e pela PA 66 com 30% de fibra de vidro, na faixa de temperatura de -50 a 100°C. O aumento da temperatura diminui o módulo de armazenamento, devido à diminuição da rigidez dos polímeros, conforme pode ser visto na Figura 5.9 para todas as amostras sem tratamento térmico e na Figura 5.10 para as amostras de PA com tratamento. Aí a PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV apresentou maior módulo de armazenamento em toda a faixa de temperatura avaliada. As PA, devido à absorção de água em sua estrutura, após tratamento térmico, apresentaram maior módulo de armazenamento abaixo da temperatura de solidificação d'água, conforme pode ser visto na Figura 5.10, pelo deslocamento das curvas para valores superiores de módulo.

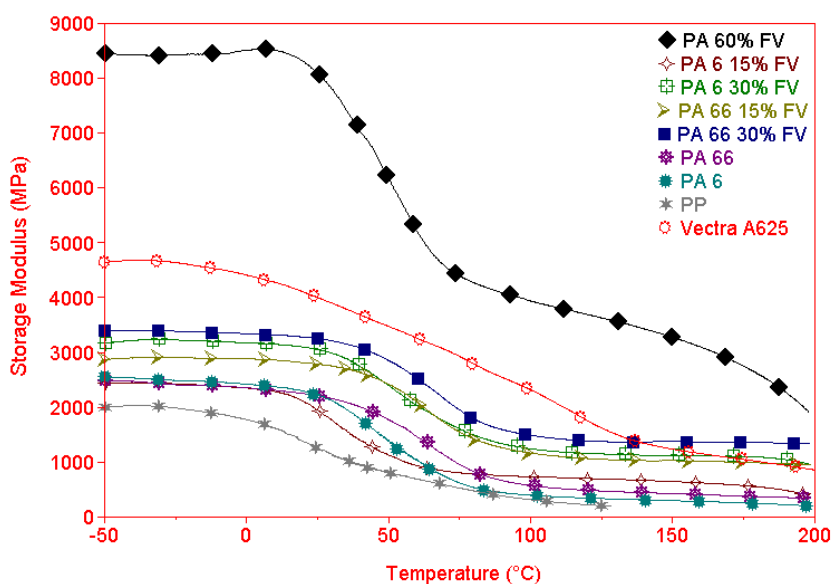


Figura 5.9: Módulo de armazenamento dos polímeros sem tratamento térmico versus temperatura (modo *single cantilever*)

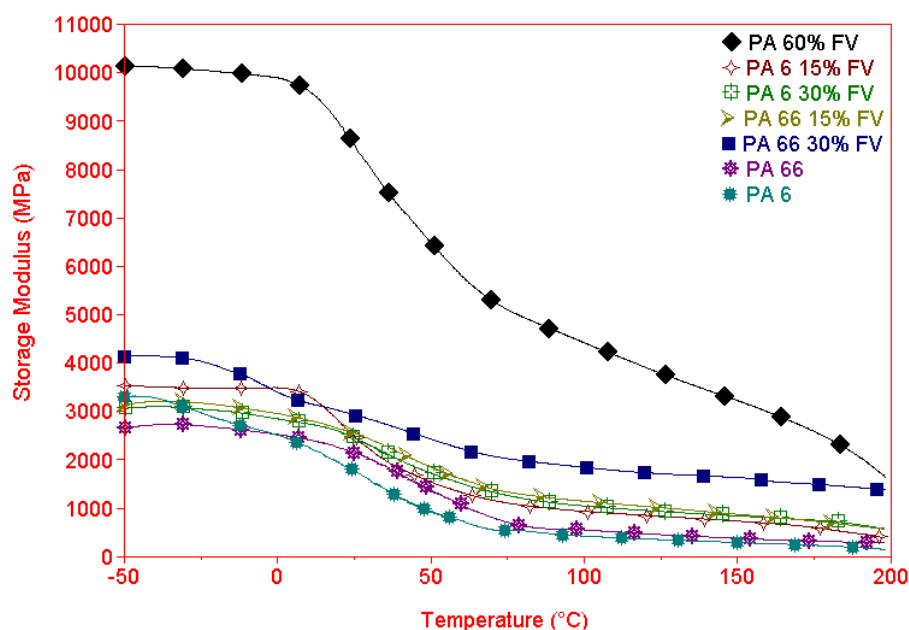


Figura 5.10: Módulo de armazenamento dos polímeros com tratamento térmico *versus* temperatura (modo *single cantilever*)

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram a variação do módulo de perda com a temperatura das amostras antes e após o tratamento térmico, respectivamente. Observa-se que os valores do módulo de perda são inferiores aos de armazenamento, caracterizando maior rigidez elástica do que viscosa dos polímeros em análise. Os picos das curvas do módulo de perda dos polímeros, com tratamento térmico, em comparação às curvas daqueles sem tratamento, mostram o efeito plastificante da água. Observa-se que as curvas dos polímeros com tratamento térmico foram deslocadas para a esquerda nas abscissas em relação aos sem tratamento, conforme mostram as Figuras 5.12 e 5.11, respectivamente. A PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV sem e com tratamento térmico apresentou distintamente os maiores valores de módulo elástico e viscoso.

A fibra de vidro presente nas poliamidas aumenta a rigidez e diminui a influência da umidade, uma vez que reduz a quantidade de polímero na amostra. Ao aumentar a temperatura, a água absorvida pela poliamida se desprende da matriz polimérica, deixando de ser um fator significante nos módulos de armazenamento e de perda.

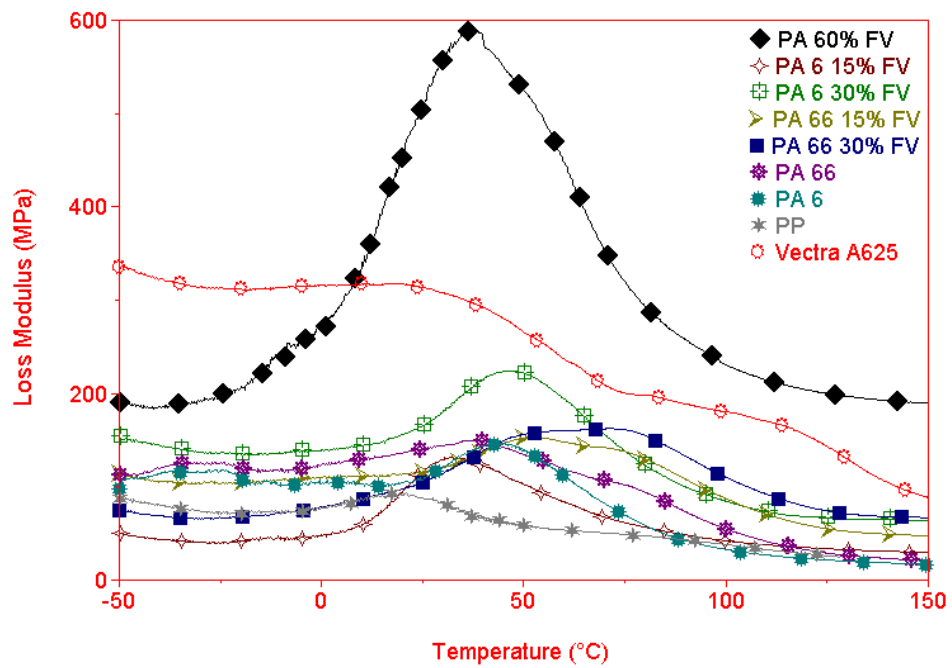


Figura 5.11: Módulo de perda dos polímeros sem tratamento térmico *versus* temperatura (modo *single cantilever*)

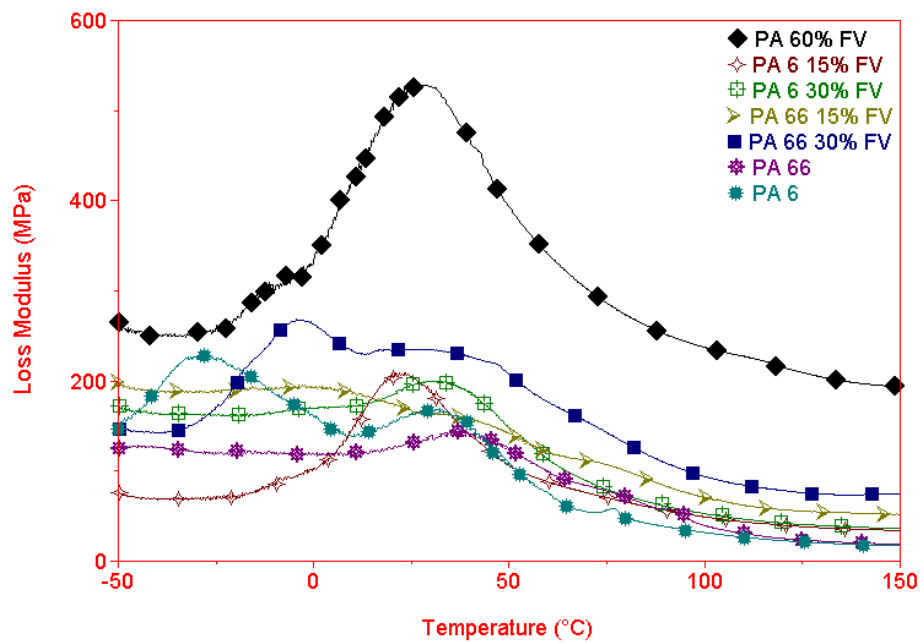


Figura 5.12: Módulo de perda dos polímeros com tratamento térmico *versus* temperatura (modo *single cantilever*)

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram as curvas de $\text{Tan } \delta$ versus temperatura das amostras de polímeros antes e após tratamento térmico, respectivamente.

A tangente delta das amostras sem tratamento térmico apresentou, em geral, para cada polímero um pico de maior magnitude em relação a outros presentes na curva relativa à transição vítrea do polímero. O Vectra apresentou o único pico acima de 100°C , indicando ser o polímero de maior T_g . As amostras com tratamento térmico apresentaram vários picos significativos ao longo das respectivas curvas, em valores de temperatura inferiores as das amostras sem tratamento, mostrando o efeito plastificante da água absorvida pelos polímeros, sob a forma de pontes de hidrogênio.

Observa-se que a poliamida ramificada *Technylstar* com 60% de FV apresenta transição vítrea na região das PA 6. Verifica-se também que, apesar de apresentar um módulo de perda e armazenamento significativamente maior que os demais polímeros, o *Technylstar* apresenta uma variação superior de módulo de perda na faixa de temperatura, em relação aos demais polímeros, indicando uma maior tenacidade do material em ampla faixa de temperatura.

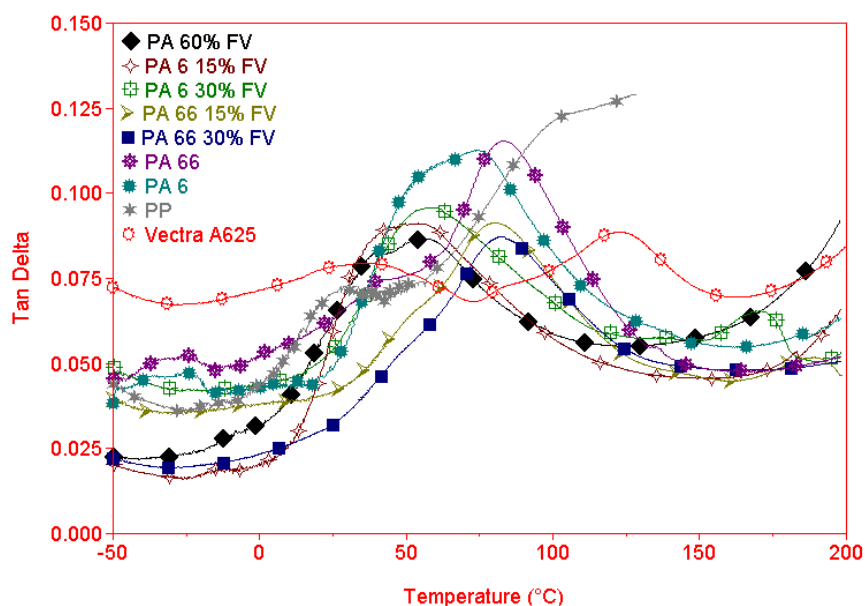


Figura 5.13: Tangente delta dos polímeros sem tratamento térmico versus temperatura (modo *single cantilever*)

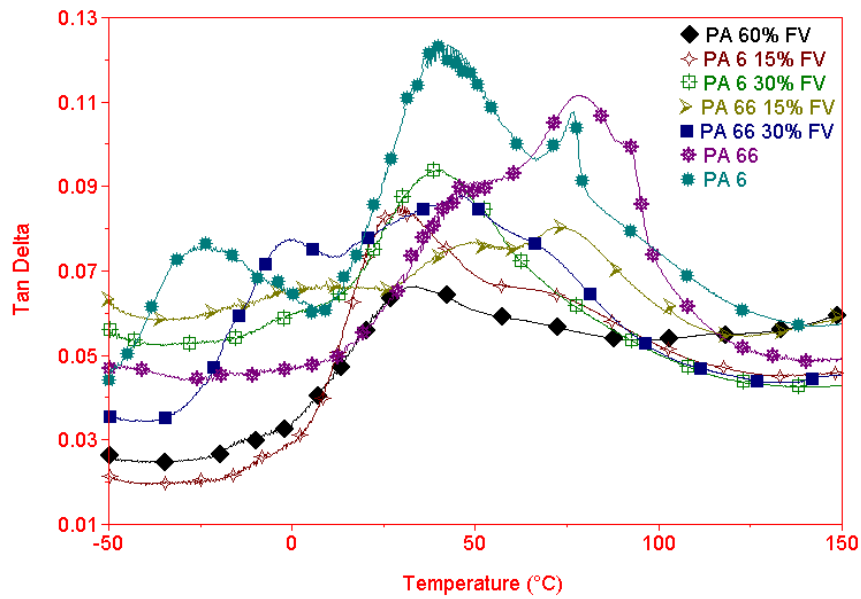


Figura 5.14: Tangente delta dos polímeros com tratamento térmico *versus* temperatura (modo *single cantilever*)

Guo et al^[41] obteve o pico da Tg da PA 6 pura nos 38,4°C, com o objetivo de estudar a compatibilidade dessa poliamida com o PS e as propriedades mecânicas da blenda. A Figura 5.13 apresenta o pico da Tg da PA 6 nos 75°C, enquanto que a Figura 5.14 nos 37°C, aproximadamente.

5.4 Avaliação do comportamento reológico dos polímeros

Na injeção de material termoplástico, o polímero fundido circula através de canais produzindo tensões de cisalhamento que variam à medida que esse sofre deformações durante o trajeto até a cavidade do molde. A viscosidade aparente (η) está relacionada com a tensão de cisalhamento (τ) e com a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), através da Equação Reológica de Estado $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$. O melhor desempenho do material avaliado, quanto à maior produtividade e à menor manutenção da máquina injetora, foi decisivo na escolha de dois dos três materiais analisados nessa etapa.

O erro da análise reológica foi determinado pelos valores de R-quadrado (R^2), sendo esses superiores a 0,9001, ver Figura 5.15. O valor de R-quadrado, também conhecido como coeficiente de determinação, é um indicador que varia de 0 a 1 e revela a proximidade dos valores estimados da linha de tendência em correspondência com os pontos do ensaio. Uma linha de tendência é mais confiável quanto mais próximo de 1 for o valor de R-quadrado. A Figura 5.15 mostra as linhas de tendência e as respectivas equações para as curvas interpoladas de cada material, e os respectivos valores de R-quadrado.

As viscosidades aparentes foram comparadas no estado fundido das PA lineares 6 e 66, ambas com 30% de fibra de vidro, e a PA ramificada com 60% de fibra de vidro, em condição isotérmica. A partir dos valores da temperatura de fusão, obtidos do ensaio de DSC, decidiu-se realizar o ensaio de reometria capilar, a 15°C acima da temperatura de fusão de cada material, conforme mostrado na Tabela 5.8, para garantir a homogeneidade do polímero fundido. A Figura 5.15 mostra a variação da viscosidade aparente com a taxa de cisalhamento das poliamidas avaliadas a partir dos valores da Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Viscosidade de cisalhamento das amostras de PA 6 e 66 e PA *Technylstar* com FV

Material:	PA 6 30%FV	PA 60%FV*	PA 66 30%FV
Temperatura de Ensaio (°C):	230	230	275
Taxa de Cisalhamento (s⁻¹):	Viscosidade Aparente (Pa.s):		
18,20	3223,55	1367,85	841,80
48,60	1772,00	972,10	726,40
97,30	1277,00	807,10	618,80
249,30	777,60	589,30	443,35
498,60	579,20	447,90	296,25
747,90	460,50	370,25	251,65
997,20	374,55	324,00	211,00
1100,60	373,75	309,10	201,50

* Poliamida ramificada marca *Technylstar* SX218 V60 com 60% de fibra de vidro

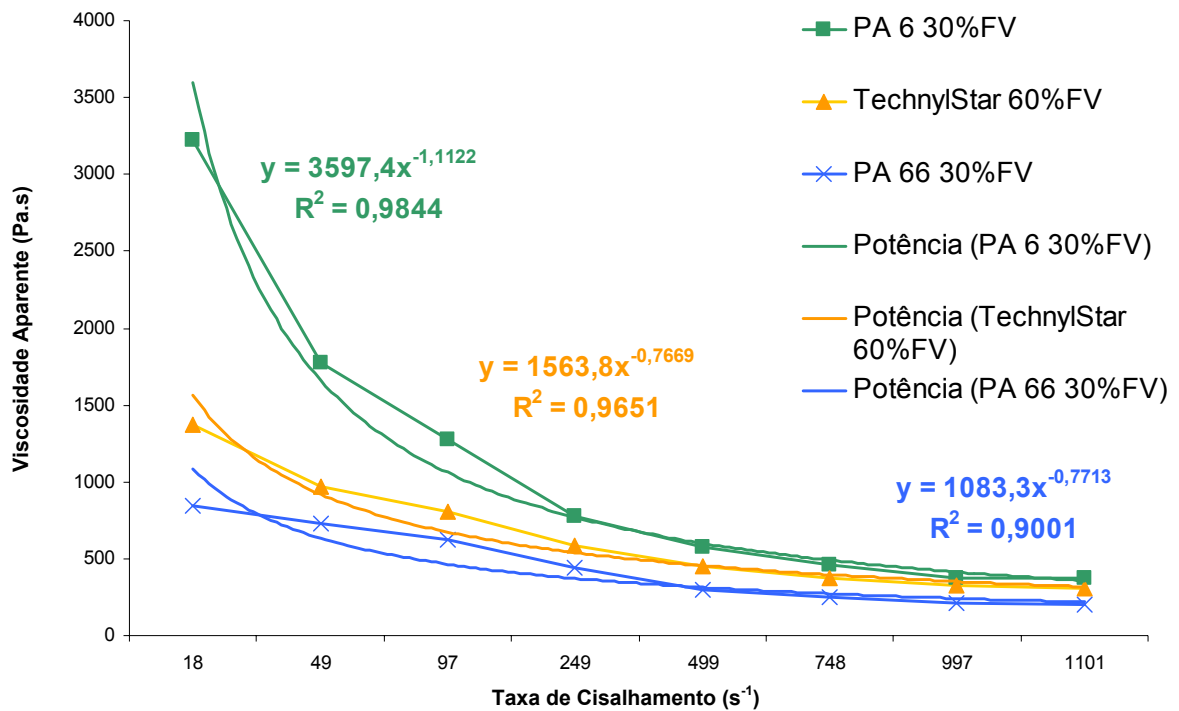


Figura 5.15: Variação da taxa de cisalhamento em função da viscosidade aparente

Verificou-se que a PA 6 com 30% de fibra de vidro apresentou a maior variação da viscosidade aparente, na faixa de taxa de cisalhamento de 18,20 a 1100,30 s⁻¹, seguida da PA com 60% de fibra de vidro e, finalmente, da PA 66 com 30% de fibra de vidro. A PA com 60% de fibra de vidro apresentou valores intermediários às demais. A maior variação da viscosidade aparente ocorreu no intervalo de taxa de deformação de 18,20 a 249,30 s⁻¹, onde a PA 6 com 30% de fibra de vidro apresentou os maiores valores de viscosidade aparente e a PA 66 com 30% de fibra de vidro apresentou os menores. Em taxas de deformação a partir de 249 s⁻¹, as três PA apresentaram viscosidades aparentes próximas, conforme pode ser visto nas curvas reológicas destas. Em altas taxas de cisalhamento, todas apresentam igual comportamento reológico.

Ao cessarem a pressão e o fluxo fornecidos pela máquina injetora, para preencher o molde com material fundido, o material com a menor viscosidade sairá do bico de injeção em maior quantidade, devido à inércia resultante da velocidade de injeção. Como o bico estará recuado e desconectado do molde, o material ficará exposto ao ambiente externo, esfriando sobre o bico de injeção. No próximo ciclo, o

bico de injeção estará obstruído, sendo necessário parar o ciclo programado para executar a limpeza do mesmo. Esse processo de interrupção de ciclo é minimizado se o material termoplástico possuir viscosidade suficiente para anular a inércia proveniente da velocidade de injeção, quando o polímero está sujeito a uma baixa taxa de deformação, a que se observa no bico de injeção após recuo do mesmo.

A PA 6 com 30% de fibra de vidro foi escolhida; portanto, em detrimento da PA 66 com 30% de fibra de vidro, de modo a minimizar a interrupção do ciclo, com a finalidade de limpar o bico de injeção. Além disso, a temperatura de fusão da PA 6 com 30% de fibra de vidro sendo menor que a PA 66 com 30% de fibra de vidro possibilita redução do custo de energia elétrica para o aquecimento por resistência elétrica, a fim de fundir o material termoplástico. Para minimizar esse problema de processo, foram selecionadas, através desse ensaio reológico, as PA 6 com 30% de FV e a PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV, com viscosidades aparentes superiores à PA 66 com 30% de FV em baixas taxas de cisalhamento.

5.5 Avaliação da performance da engrenagem

O teste de desempenho do sistema de acionamento por par de engrenagens tipo coroa globóide e parafuso cilíndrico sem fim foi executado com o objetivo de determinar o número de ciclos que o par de engrenagens suporta sem sofrer danos que comprometam a performance do equipamento porta-estepe erguendo e baixando um estepe de 132 kg.

A frequência de uso do porta-estepe de caminhão é diretamente proporcional à quantidade de vezes que se trocam os pneus do caminhão. De acordo com o fabricante, a utilização do porta-estepe fica estimada em três ciclos por mês, tendo o equipamento duração em torno de cinco anos e estando sujeito, portanto, ao total de 180 ciclos durante sua vida útil.

Na primeira combinação, utilizou-se a PA 6 com 30% de FV no pinhão e na coroa. Após 623 ciclos houve falha do par de engrenagens com deformação permanente e ruptura do dente do pinhão, conforme pode ser verificado na Figura 5.16. Apesar da ruptura do pinhão, essa combinação de par de engrenagens do mecanismo do porta-estepe superou o tempo de vida médio estimado para o produto.



Figura 5.16: Par de engrenagens em PA 6 com 30% de fibra de vidro, após 623 ciclos

O contato entre as engrenagens ambas com a poliamida *Technylstar* com 60% de fibra de vidro apresentou grande atrito, com aquecimento das superfícies, principalmente no processo de subida do estepe, provocando elevado desgaste por abrasão e deformação permanente nos dentes do pinhão e da coroa, conforme pode ser visto na Figura 5.17. Esse sistema perdeu sua funcionalidade com 161 ciclos, ficando abaixo do tempo de vida estimado para o par de engrenagens de 180 ciclos.

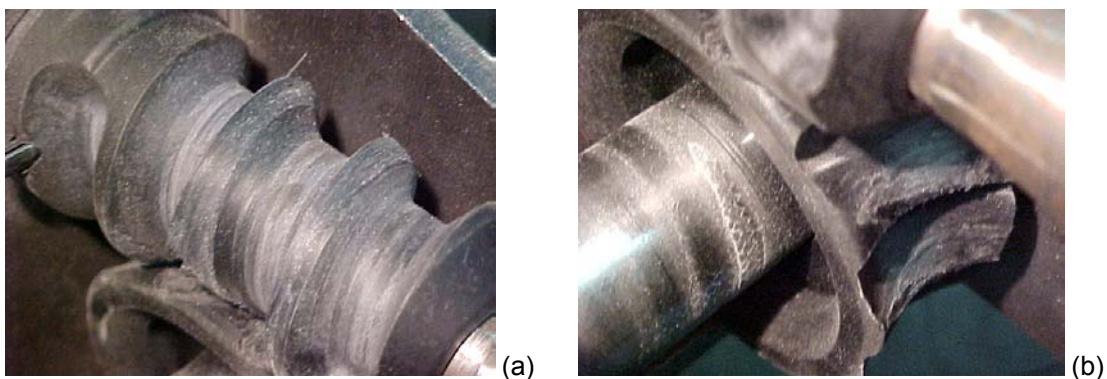


Figura 5.17: Par de engrenagens em PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV, desgaste do dente do pinhão (a) e desgaste da cavidade dos dentes da coroa (b), após 161 ciclos

O último ensaio consistiu em utilizar como material para a coroa o náilon 6 com 30% de fibra de vidro, por ser o de maior resistência à abrasão e com boa resistência ao impacto, propriedade importante devido à cavidade do dente ser similar a um entalhe na coroa. Para a fabricação do pinhão foi selecionada a poliamida *Technylstar* com 60% de fibra de vidro, uma vez que esse material apresentou as maiores resistências à flexão e à tração e também os maiores módulos de elasticidade, respectivamente. Com essa poliamida pôde-se então evitar que o dente do pinhão desgastasse por deformação permanente e, em seguida, deformasse as cavidades dos dentes da coroa. O par de engrenagens feito pela combinação das duas poliamidas suportou até 1200 ciclos em bancada, sem apresentar perda da funcionalidade do produto por deformação permanente ou por ruptura do pinhão ou da coroa, conforme pode ser visto na Figura 5.18.



Figura 5.18: Par de engrenagens do porta-estepe de caminhão com pinhão em *Technylstar* com 60% de FV e coroa em náilon 6 com 30% de FV, após 1200 ciclos

5.6 Considerações finais

A PA 6 com 30% de fibra de vidro e o *Vectra* com 25% de grafite geraram um impasse na etapa de seleção dos três polímeros para ensaio de reometria capilar, pois ambos apresentaram aproximadamente o mesmo número de propriedades situadas abaixo das propriedades das poliamidas *Technylstar* com 60% de fibra de vidro e PA 66 com 30% de fibra de vidro. O *Vectra* apresentou a menor resistência à abrasão de todas as amostras ensaiadas e menor resistência à tração e à flexão que o náilon 6 com 30% de fibra de vidro. O *Vectra*, apesar de apresentar o maior módulo de elasticidade à tração e o segundo à flexão, foi rejeitado, sendo escolhida a PA 6 com 30% de FV.

Os ensaios realizados para a determinação das melhores propriedades mecânicas permitiram a escolha dos materiais para o ensaio em bancada. O teste em bancada focou as propriedades de maior evidência para a escolha final. Nela foi verificada a grande importância do módulo de elasticidade e da resistência à flexão. A diminuição das deformações dos dentes do pinhão, provenientes do torque dado no sistema, foi o motivo da escolha do material para a engrenagem parafuso sem fim com o maior módulo de elasticidade, a PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV. A propriedade de maior relevância para a coroa foi a resistência à abrasão, em função do par de engrenagens em PA ramificada *Technylstar* com 60% de FV apresentar elevado desgaste durante o ensaio em bancada, tanto no pinhão quanto na coroa. Concluindo, devido à PA 6 com 30% de FV possuir menor desgaste, segundo ensaio de abrasão, foi escolhido como material para a coroa.

6 CONCLUSÕES

O par de engrenagens feito em poliamida *Technylstar* com 60% de fibra de vidro, para o parafuso cilíndrico sem fim e em náilon 6 com 30% de fibra de vidro para a coroa globóide, foi o que apresentou o melhor desempenho, ou vida útil, na ordem de 1200 ciclos.

A seleção dos polímeros para ensaio em bancada, a partir dos valores das propriedades dos ensaios preliminares, permitiu determinar as propriedades necessárias e suficientes, como o módulo de elasticidade e a resistência à flexão para o pinhão e as resistências à abrasão e ao impacto para a coroa, de modo a selecionar o polímero termoplástico mais adequado para a fabricação da coroa e do parafuso sem fim do par de engrenagens automotiva.

As resistências à tração e à flexão das poliamidas foram dependentes principalmente da porcentagem de fibra de vidro, ou seja, verificou-se um ganho de resistência mecânica com o aumento da quantidade de fibra de vidro no polímero. A estrutura molecular das poliamidas teve influência nessas propriedades, devido à presença de forças intermoleculares tipo pontes de hidrogênio e, portanto, pela absorção d'água através de tratamento térmico.

A resistência à abrasão diminui com o aumento da porcentagem de fibra de vidro e com o aumento da rigidez ou do módulo de elasticidade do polímero, não sendo desejável para a aplicação prevista do material.

A resistência ao impacto foi melhorada com o aumento do teor de fibra de vidro nas poliamidas 6 e 66 de 15 para 30%; porém, esse comportamento não se repete quando se adiciona 15% de fibra de vidro no material virgem.

Os limites de resistência à tração e à flexão e seus respectivos módulos de elasticidades diminuem ao se aplicar tratamento térmico ou se favorecer a absorção de umidade pelas poliamidas, porém a resistência ao impacto aumenta, em função da flexibilização das cadeias devido à diminuição das pontes de hidrogênio intermoleculares.

Os polímeros com as melhores características reológicas não necessariamente apresentaram a menor viscosidade, devido à dependência da viscosidade aparente da taxa de deformação. A avaliação deve ser feita em cada estágio de injeção, de modo a não ocorrer contato de material com baixa viscosidade, a baixa taxa de deformação, com o ambiente externo ao bico de injeção, esfriando nesse local e obstruindo a saída de material fundido no próximo ciclo de injeção.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Mudança do *design* do par de engrenagens avaliadas em função das propriedades mecânicas, podendo-se variar desde o tamanho do dente até a quantidade dos mesmos.

Utilização de outros polímeros de engenharia, como o poliacetal (POM), poli-éter-éter-cetona (PEEK), poliamida-imida (PAI), poli-éter-imida (PEI), frente às propriedades necessárias de um par de engrenagens.

Análise de falha através da mecânica da fratura, como exemplo o trabalho de Yao et al^[42], que determinou, através do estudo de um furo circular em placa de compósito de polímero com fibra de vidro, a tenacidade à fratura de corpos-de-prova com e sem entalhe. Verificação da influência de defeitos como bolhas de umidade no material das engrenagens, e levantar a curva de fadiga dos materiais, correlacionando com o tipo de estrutura do polímero.

Análise de tensões através do método de elementos finitos, conforme já estudado por Kikusima et al^[43], avaliando-se engrenagens com reforço de fibra de vidro e de carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R. **Mechanical engineering design**. 5.ed. New York: McGraw-Hill, p.527-626, 1989. 779p.
- [2] **Revista Plástico Moderno**, 344. edição, junho de 2003.
- [3] **Revista Plástico Moderno**, 336. edição, outubro de 2002.
- [4] SHULER, S.; TRAPPE, A. Pedestrian energy absorber for automotive vehicles. **United States Patent**, (Provisional application number 60/405,793), 2002.
- [5] ULRICH, Henry **Introduction to industrial polymer**. 2.ed. Munich: Hanser, p.59, 131, 161, 1993. 188p.
- [6] THOMASON, J. L. The influence of fibre properties on the performance of glass-fibre-reinforced polyamide 6,6. **Composites Science and Technology**, 59, 2315-2328, 1999.
- [7] HASSAN, A.; HORNSBY, P. R.; FOLKES, M. J. Structure-property relationship of injection-molded carbon fibre-reinforced polyamide 6,6 composites: the effect of compounding routes. **Polymer Testing**, 22, 185-189, 2003.
- [8] TICONA, **Catálogo de produto - Vectra A625**, 2002.
- [9] KUKUREKA, S.N.; WRIGHT, N. A. Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears. **Wear**, 251, 1567-1578, 2001.
- [10] KUROKAWA, M.; UCHIYAMA, Y.; NAGAI, S. Performance of plastic gear made of carbon fibre reinforced PEEK. **Tribology International**, 32, 491-497, 1999.
- [11] KUROKAWA, M.; UCHIYAMA, Y.; NAGAI, S. Performance of plastic gear made of carbon fibre reinforced PEEK: Part 2. **Tribology International**, 33, 715-721, 2000.

- [12] DRAPINSKI, Janusz **Manual de manutenção mecânica**. São Paulo: McGraw-Hill, p.51-69, 1973. 239p.
- [13] MELCONIAN, Sarkis **Elementos de máquinas**. 4.ed. São Paulo: Érica, p.75-160, 2003. 358p.
- [14] DUDLEY, D.W. **Handbook of practical gear design**. Lancaster: Technomic, p.1.26-1.51 e p.2.34-2.35, 1994. 628p.
- [15] SHIGLEY, J. E. **Elementos de máquinas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, p.513-517, 1984. 700p.
- [16] WEBER, A. L. **Desenho de máquinas**. Caxias do Sul: Educs, p.E-47, 2001.
- [17] NIEMANN, G. **Elementos de máquinas**, 6.ed. São Paulo: Edgard Blücher, p.21-22, 1996, v.III.
- [18] MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, p.63-110, 1991. 197p.
- [19] USBERCO, J.; SALVADOR, E. **Química Orgânica**. 6.ed. São Paulo: Saraiva, p.452-465, 2002. 527p.
- [20] PROGELHOF, R. C.; THRONE, J. L. **Polymer engineering principles**. Munich: Hanser, p.140, 1993. 918p.
- [21] MOORE JÚNIOR, E. P. **Polypropylene handbook**. Munich: Hanser, p.1-10, 113-170, 261-262 and 349-379, 1996. 419p.
- [22] KOHAN, M. I. **Nylon plastics handbook**. New York: Hanser, p.107-149, 293-345, 1995. 631p.

[23] ARAKAWA, S.; OGAWA, T. Polyamide resin composition for part of engine cooling water system and part comprising the same. **Japan Patent**, (nº. 309242), 2002.

[24] **Revista Plástico Moderno**, 332. edição, junho de 2002.

[25] GRUENWALD, G. **Plastics how structure determines properties**. Munich: Hanser, p.167-170, 228-230, 1993. 357p.

[26] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Materials selection and design**. 2001. v.20.

[27] SHACKELFORD, J. F. Introduction to materials science for engineers. 5.ed. New York: Prentice Hall, p.748-759, 2000. 877p.

[28] ZHANG, Z. et al. Wear of PEEK composites related to their mechanical performances. **Tribology International**, 37, 271-277, 2004.

[29] FREITAS, L. **Injeção de plásticos**. Centro de Tecnologia Industrial Pedro Ribeiro: SENAI, 2001. 122p.

[30] BECKER, M. R. **Preparação e avaliação das propriedades de misturas de polietileno de baixa densidade com polietileno linear de baixa densidade**. Porto Alegre, 2002. 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)– Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS.

[31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Plásticos – atmosferas padrão para condicionamento e ensaio: NBR 7452**. 1982. 5p.

[32] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test method for water absorption of plastics: ASTM D 570 – 98**. p.32-34, v.08.01, 1998.

[33] BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E. H.; **Polymer handbook**. 3.ed. New York: John Wiley, p.v/112, v/28, 1999.

[34] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test method for tensile properties of plastics**: ASTM D 638 – 99. p.46-58, v.08.01, 1999.

[35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials**: ASTM D 790 – 99. p.150-158, v.08.01, 1999.

[36] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics**: ASTM D 256 – 97, p.1-20, v.08.01, 1997.

[37] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Bestimmung des Abriebs**: DIN 53516. Berlin, 1987. 6p.

[38] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard practice for exposing nonmetallic materials in accelerated test devices that use laboratory light sources**: ASTM G151 – 00, v.14.04, 2000.

[39] GRASSI, V. G.; FORTE, M. M. C.; DAL PIZZOL, M. F. Aspectos morfológicos e relação estrutura-propriedades de poliestireno de alto impacto. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.11, n.3, p.158-168, 2001.

[40] QU, B.; WANG, W.; TANG, L. Mechanical properties and morphological structures of short glass fiber reinforced PP/EPDM composite. **European Polymer Journal**, 39, 2129-2134, 2003.

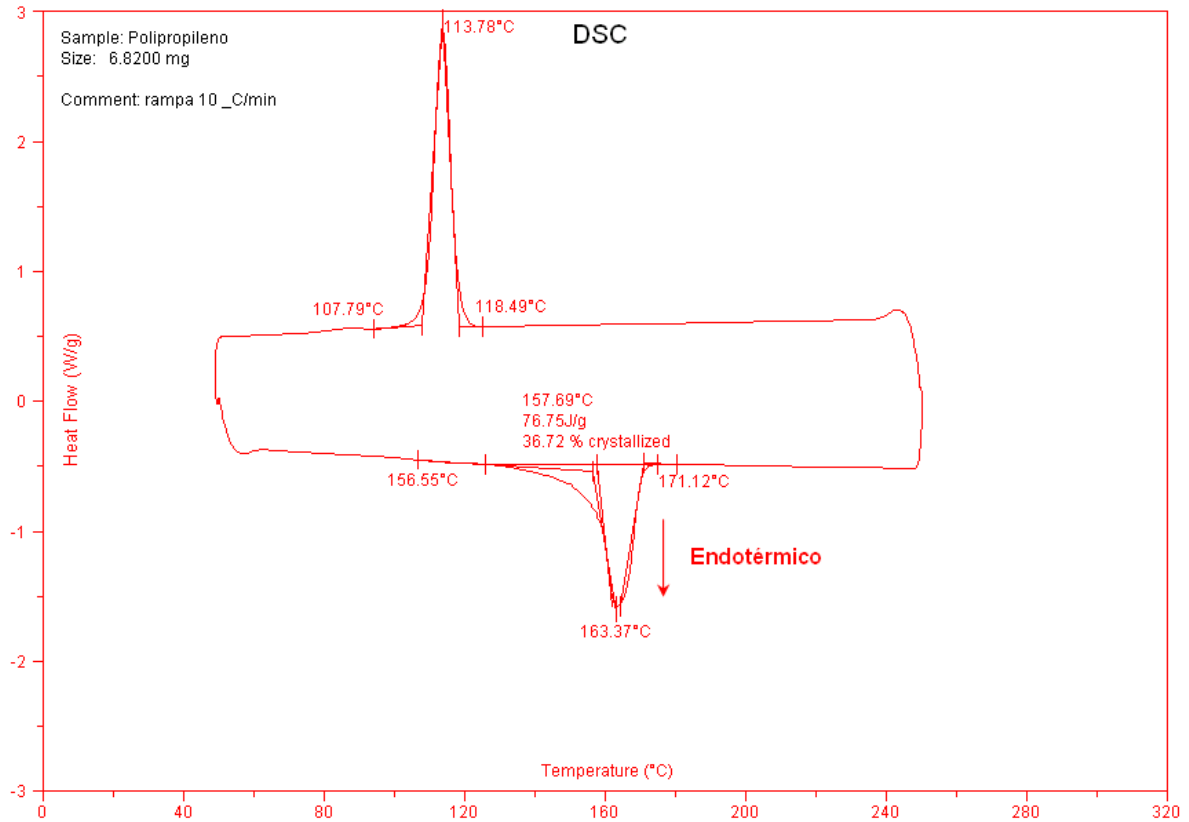
[41] GUO, T. Y. et al. Compatibility and mechanical properties of polyamide - 6 / polystyrene / diblock poly(styrene-b-ethylene oxide) copolymer blends. **European Polymer Journal**, 37, 241-246, 2001.

[42] YAO, X. F. et al. Tensile strength and fracture of glass fiber-reinforced plastic (GFRP) plate with an eccentrically located circular hole. **Polymer Testing**, 22, 955-963, 2003.

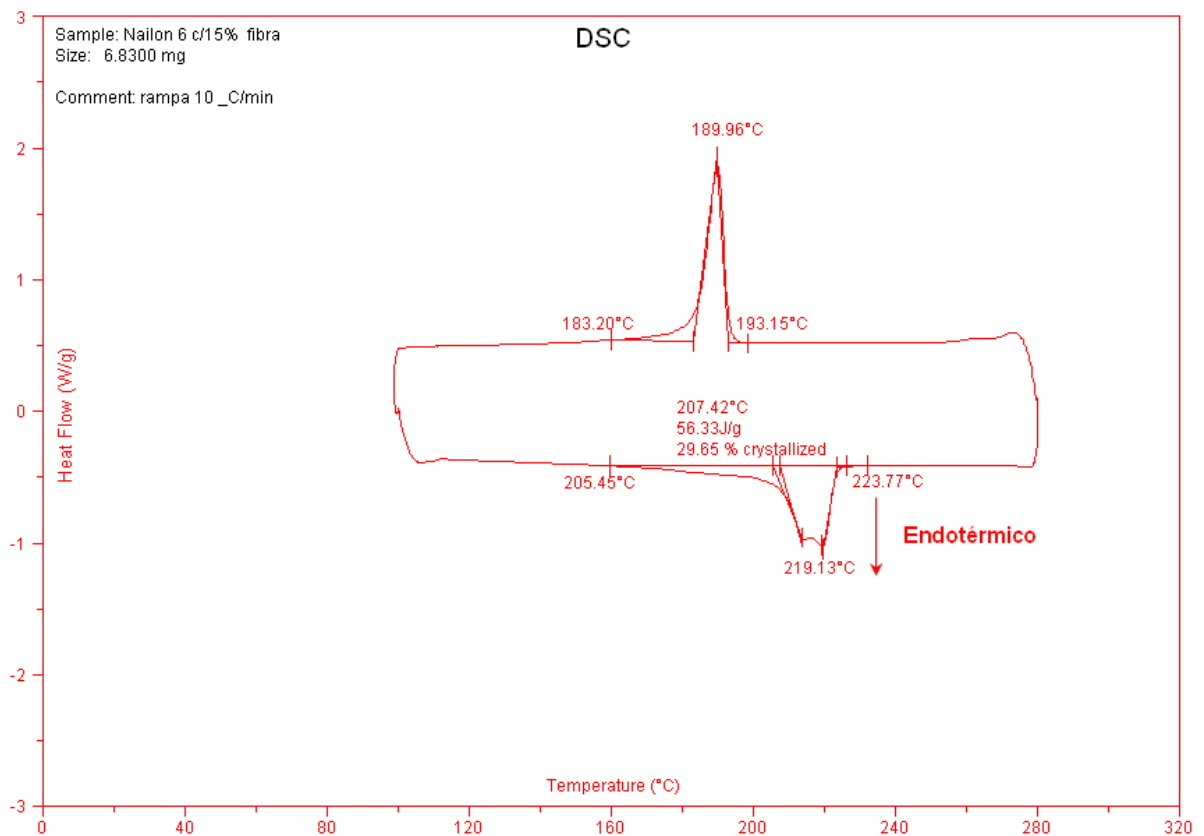
[43] KOZO, I.; KIKUSHIMA, K.; SHIRATORI, E. Effects of material constitutions on strength of fiber reinforced plastic gears. **Composites Science and Technology**, 27, 43-61, 1986.

ANEXO 1 – Termogramas de DSC

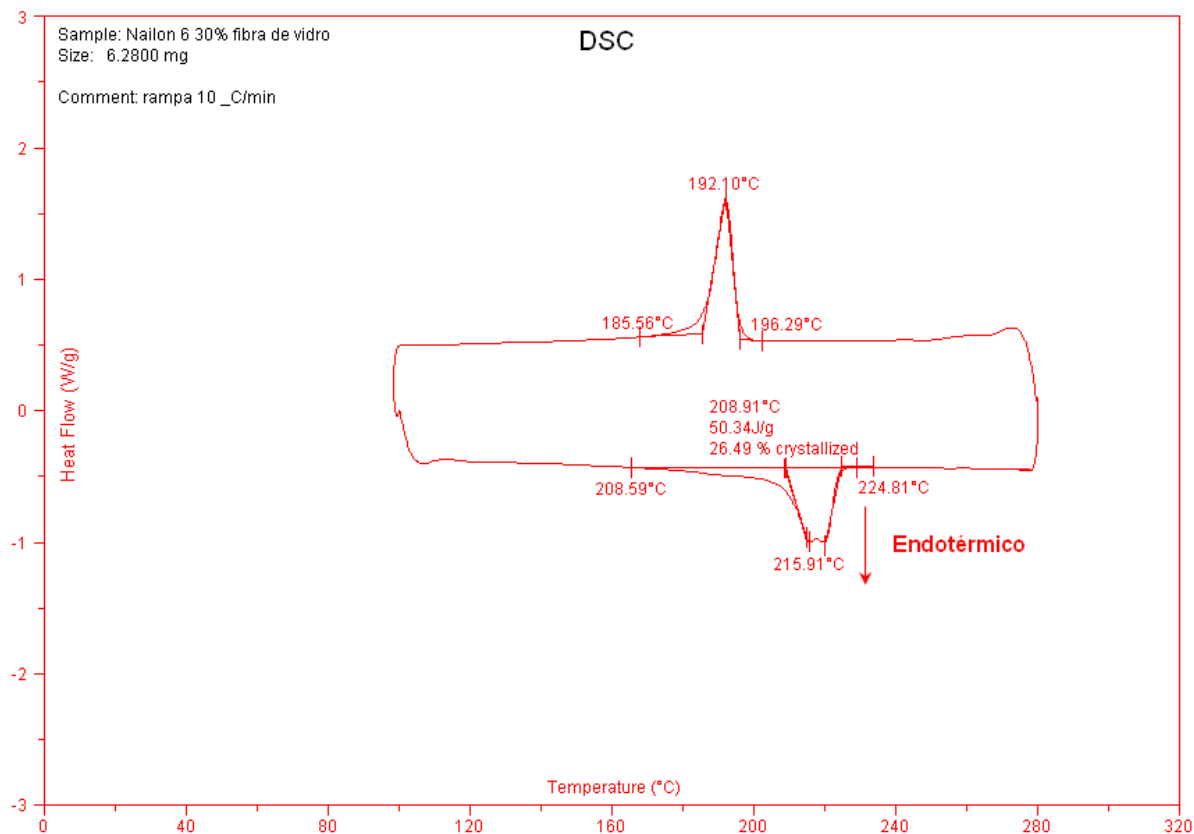
Anexo 1.1 – Termograma do Polipropileno



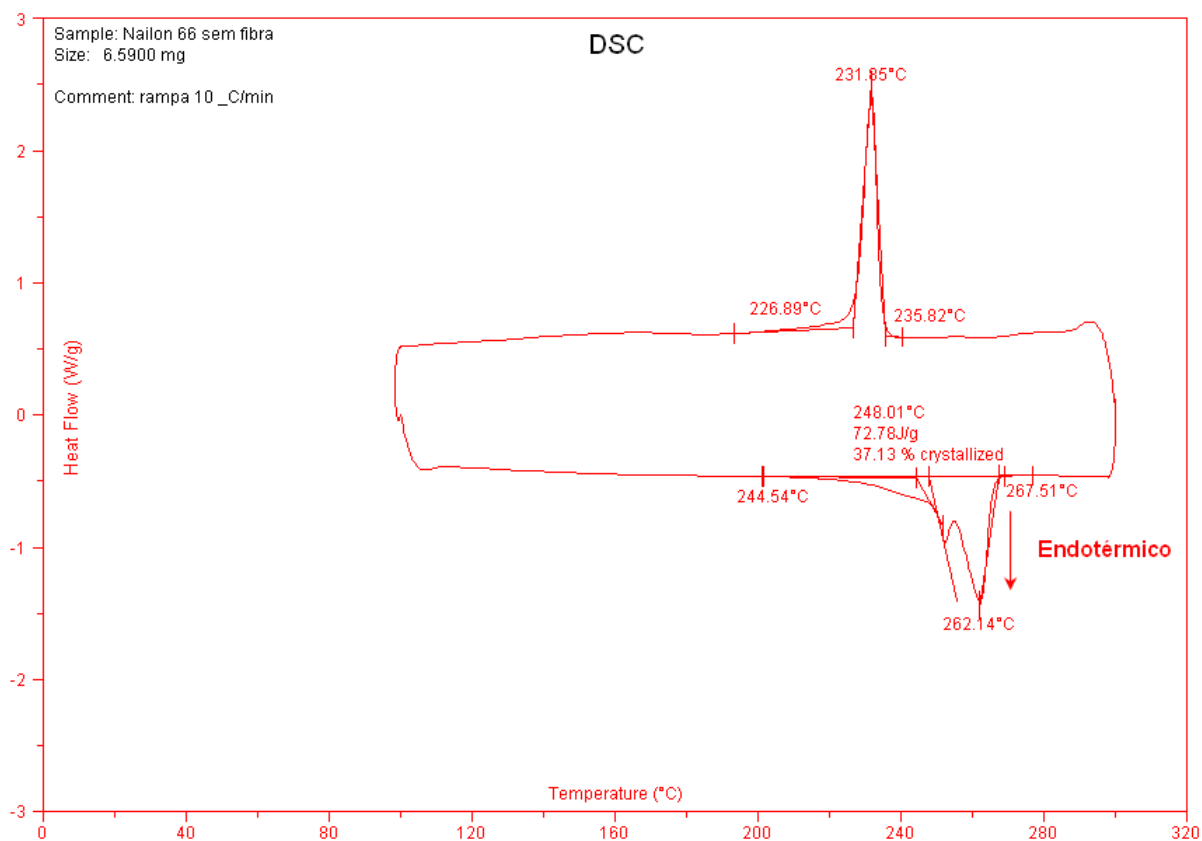
Anexo 1.2 – Termograma da PA 6 com 15% de FV



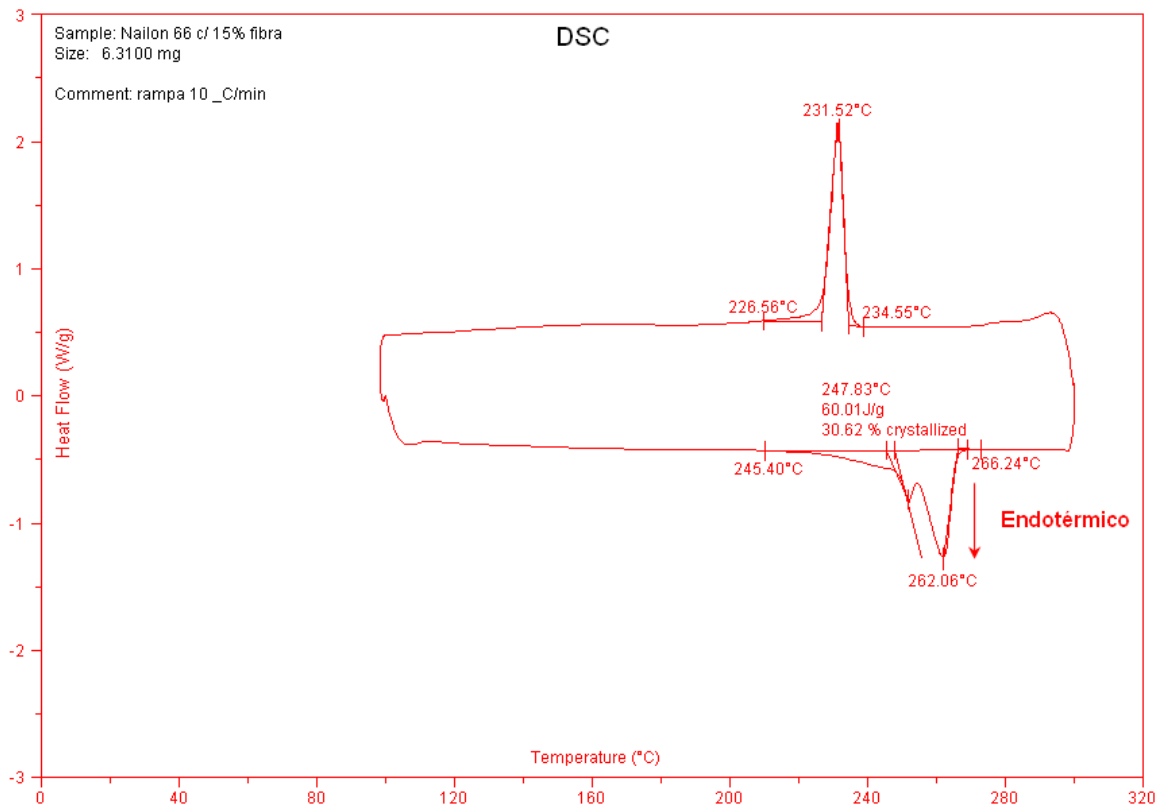
Anexo 1.3 – Termograma da PA 6 com 30% de FV



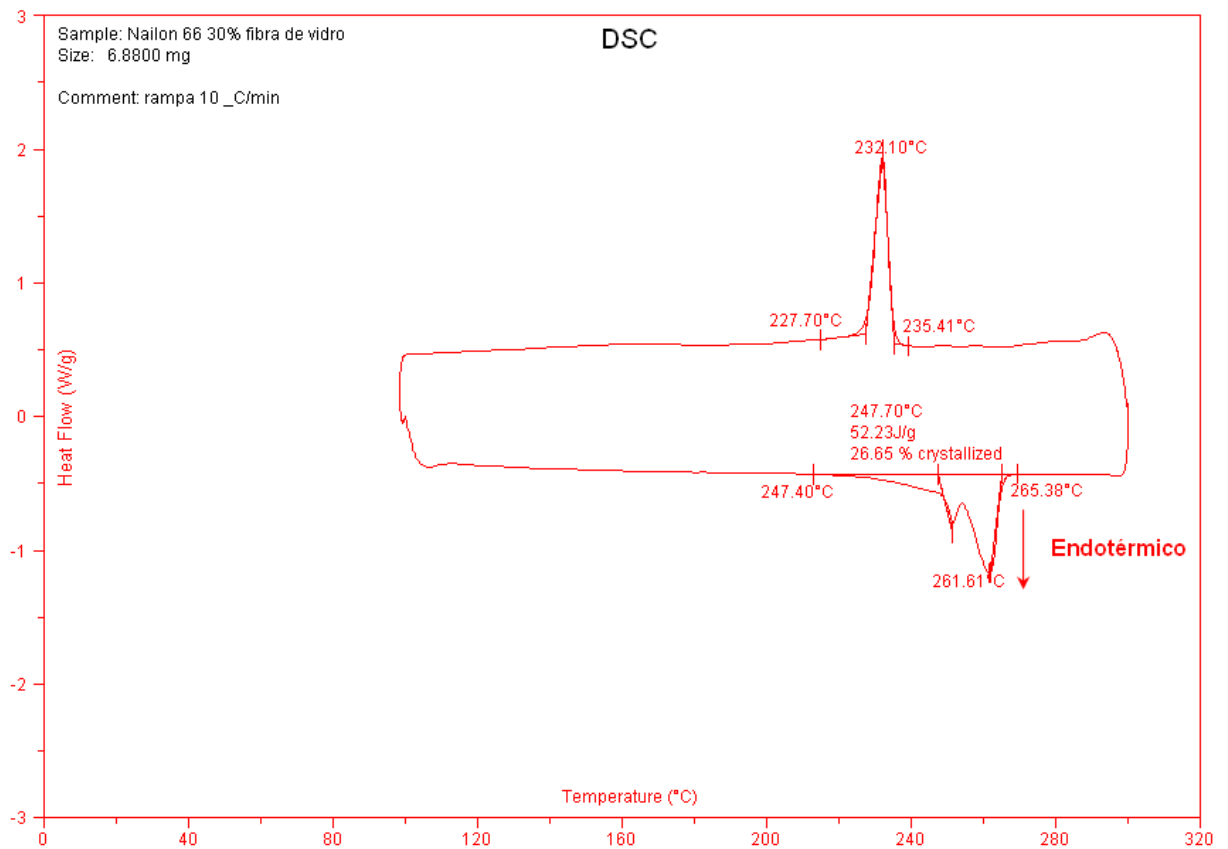
Anexo 1.4 – Termograma da PA 66 sem fibra



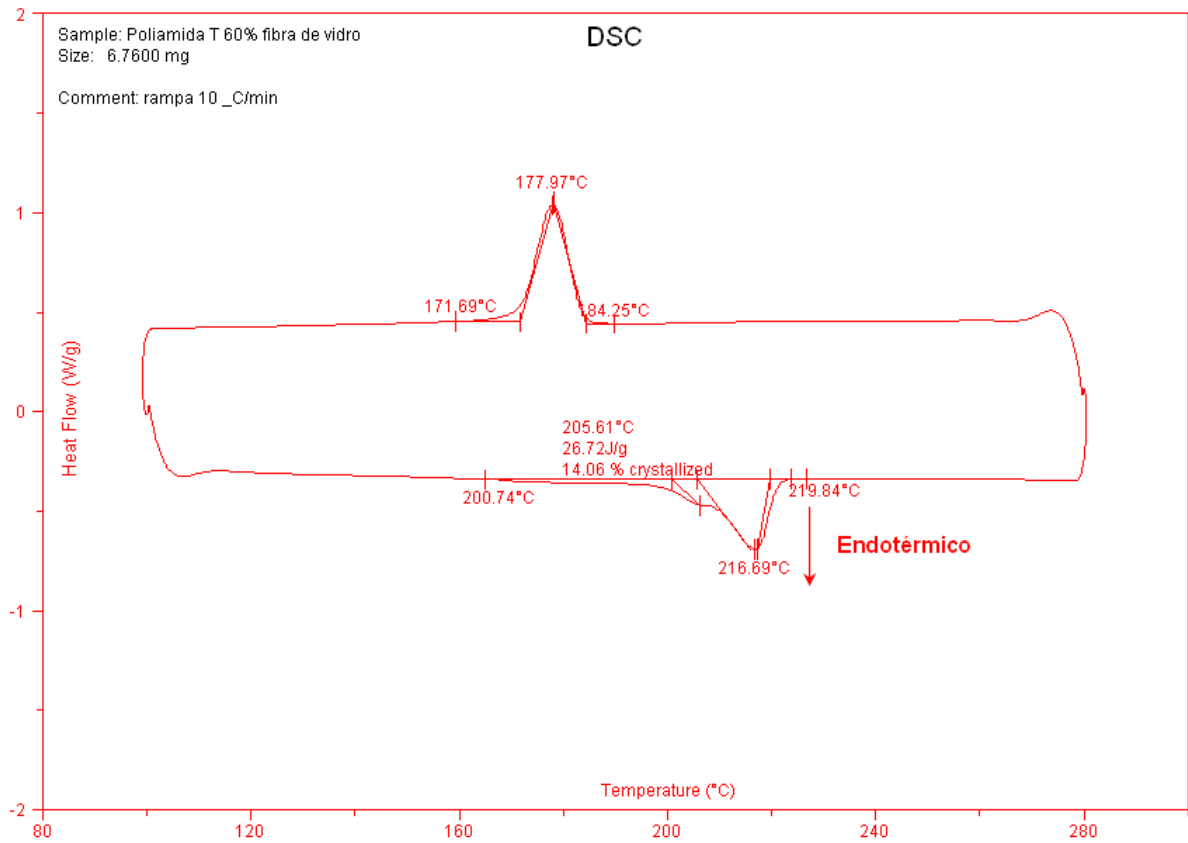
Anexo 1.5 – Termograma da PA 66 com 15% de FV



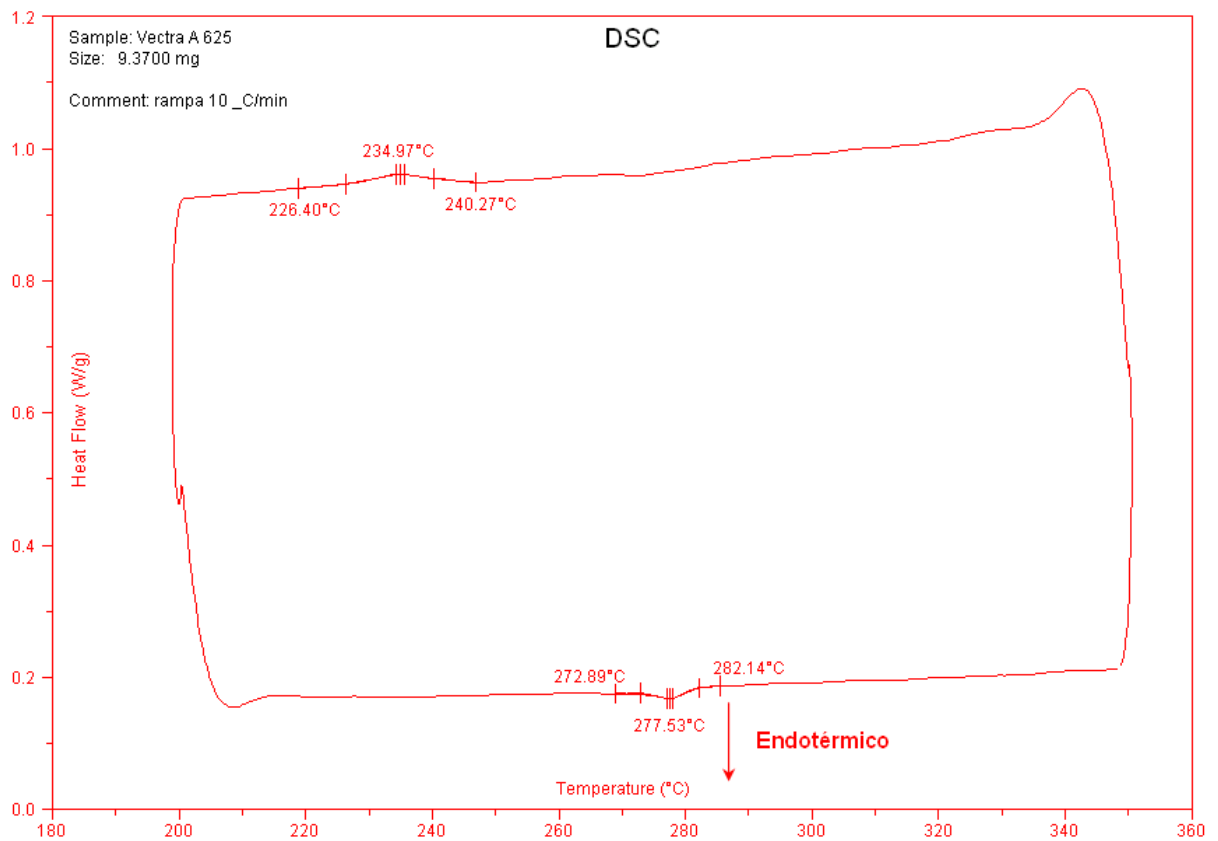
Anexo 1.6 – Termograma da PA 66 com 30% de FV



Anexo 1.7 – Termograma da PA *Technylstar* com 60% de FV

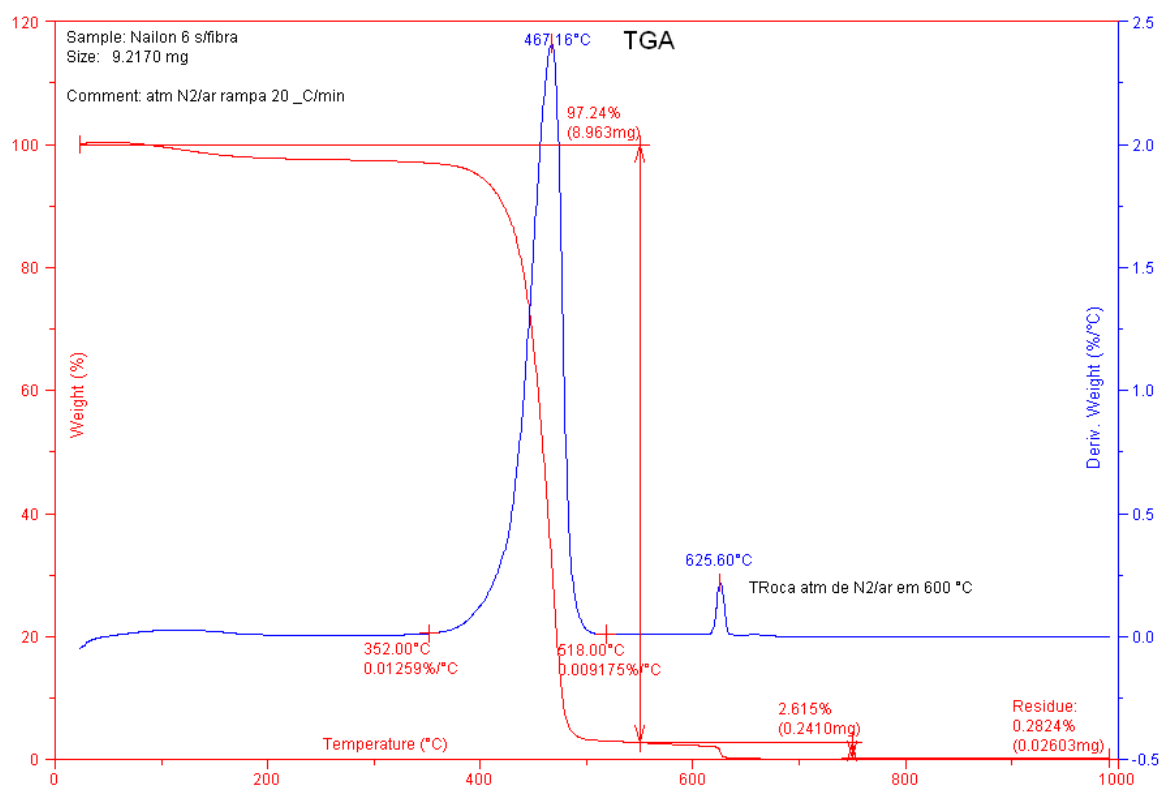


Anexo 1.8 – Termograma do LCP *Vectra* com 25% de grafite

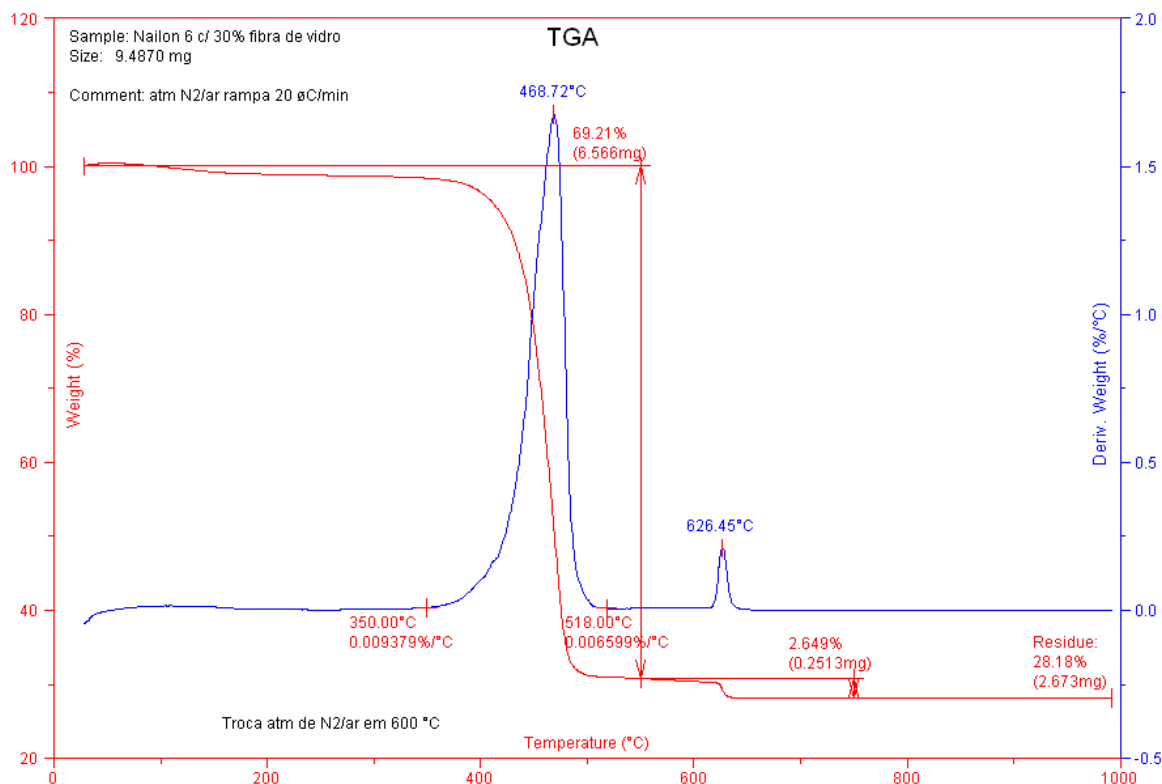


ANEXO 2 – Termogramas de TGA

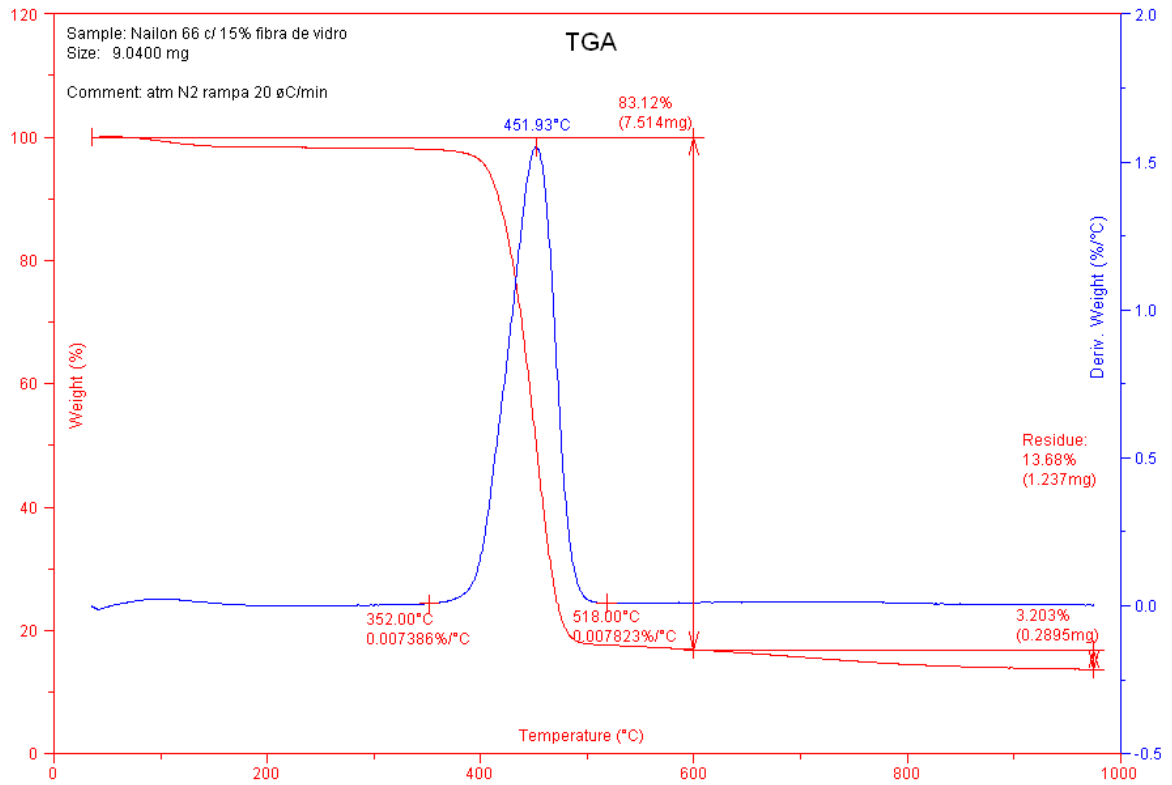
Anexo 2.1 – Termograma da PA 6 sem fibra



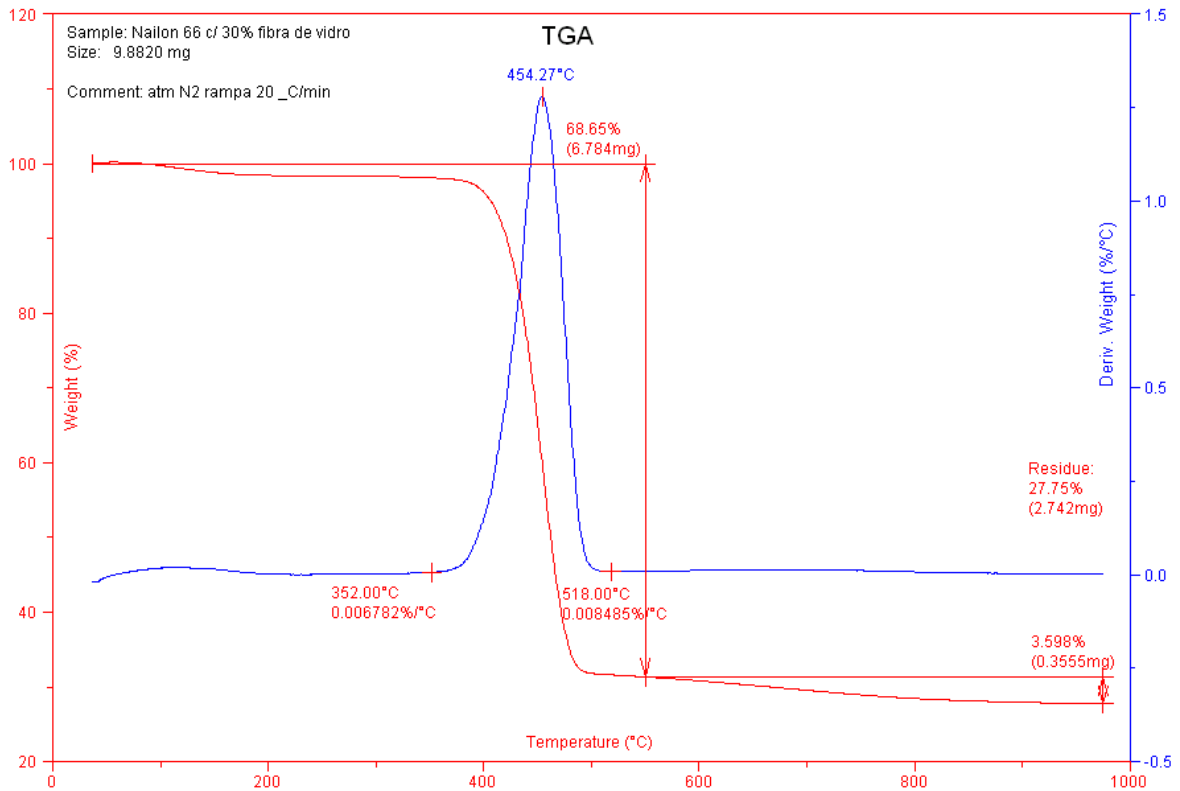
Anexo 2.2 – Termograma da PA 6 com 30% de fibra de vidro



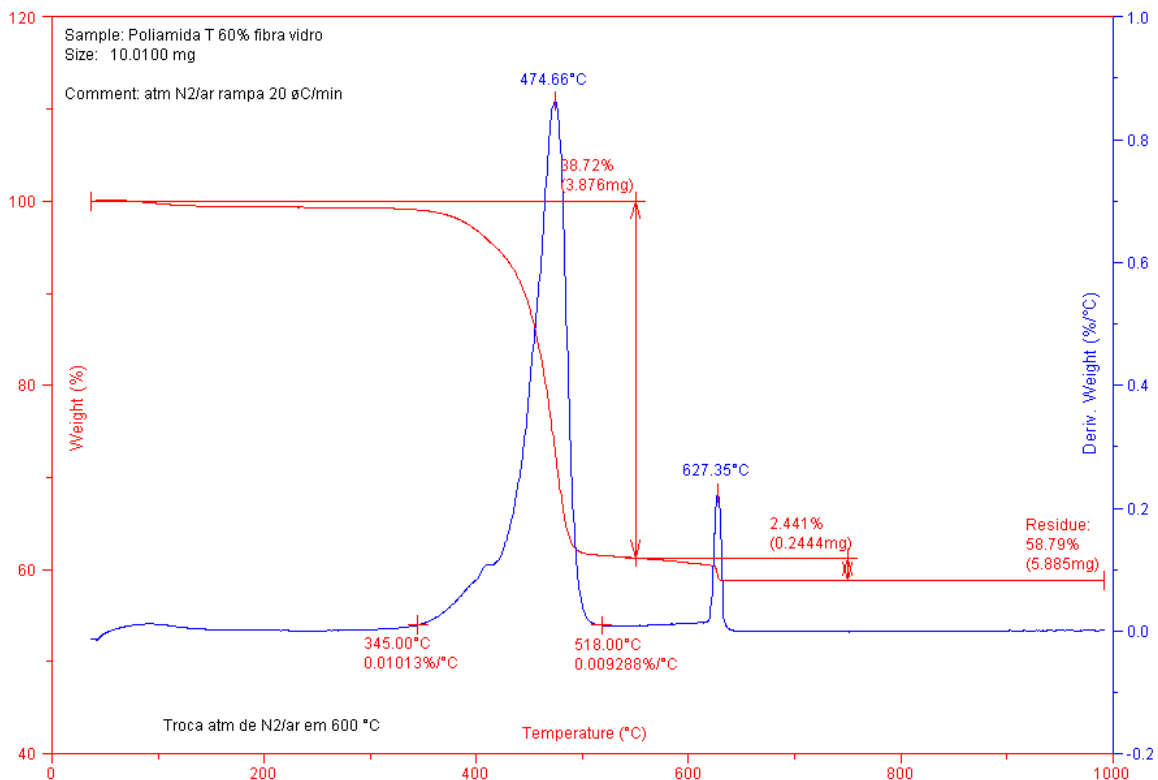
Anexo 2.3 – Termograma da PA 66 com 15% de fibra de vidro



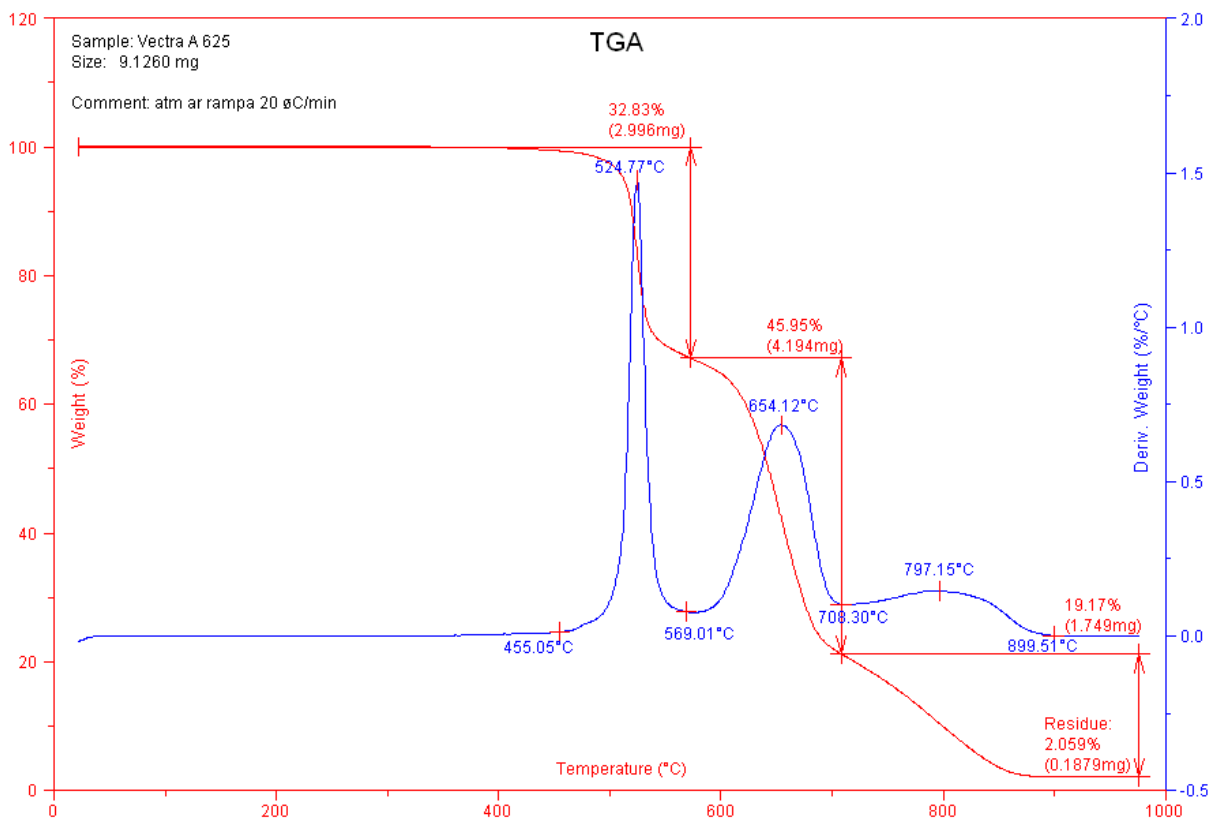
Anexo 2.4 – Termograma da PA 66 com 30% de fibra de vidro



Anexo 2.5 – Termograma da PA *Technylstar* com 60% de fibra de vidro



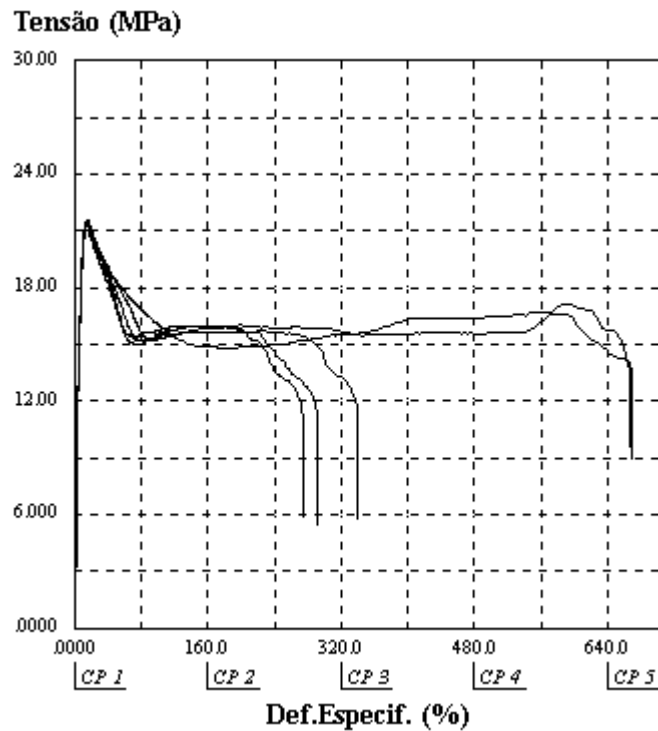
Anexo 2.6 – Termograma do LCP *Vectra* com 25% de grafite



ANEXO 3 – Tabelas e Curvas dos Ensaios de Tração

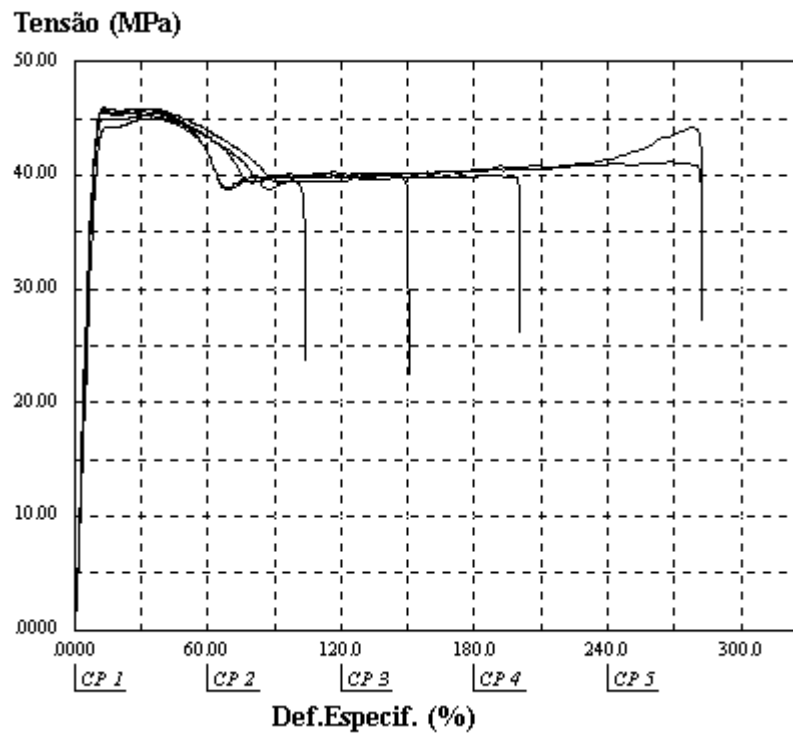
Anexo 3.1 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do polipropileno

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Tensão Ruptura (MPa)	Def.Especif. Ruptura (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Ruptura (J)
CP 1	34.20	21.43	14.72	9.711	275.1	397.4	74.10
CP 2	34.17	21.59	14.49	13.29	666.2	406.1	182.9
CP 3	34.17	21.31	14.76	9.621	292.2	413.9	78.56
CP 4	34.27	21.53	14.98	12.41	670.6	417.7	183.6
CP 5	34.34	21.09	14.76	9.911	340.1	400.2	91.01
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.23	21.39	14.74	10.99	448.8	407.1	122.0
Mediana	34.20	21.43	14.76	9.911	340.1	406.1	91.01
Desv.Padrão	.07364	.1987	.1729	1.730	201.8	8.672	56.22
Coef.Var.(%)	.2151	.9288	1.173	15.74	44.97	2.130	46.07
Mínimo	34.17	21.09	14.49	9.621	275.1	397.4	74.10
Máximo	34.34	21.59	14.98	13.29	670.6	417.7	183.6



Anexo 3.2 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 sem tratamento

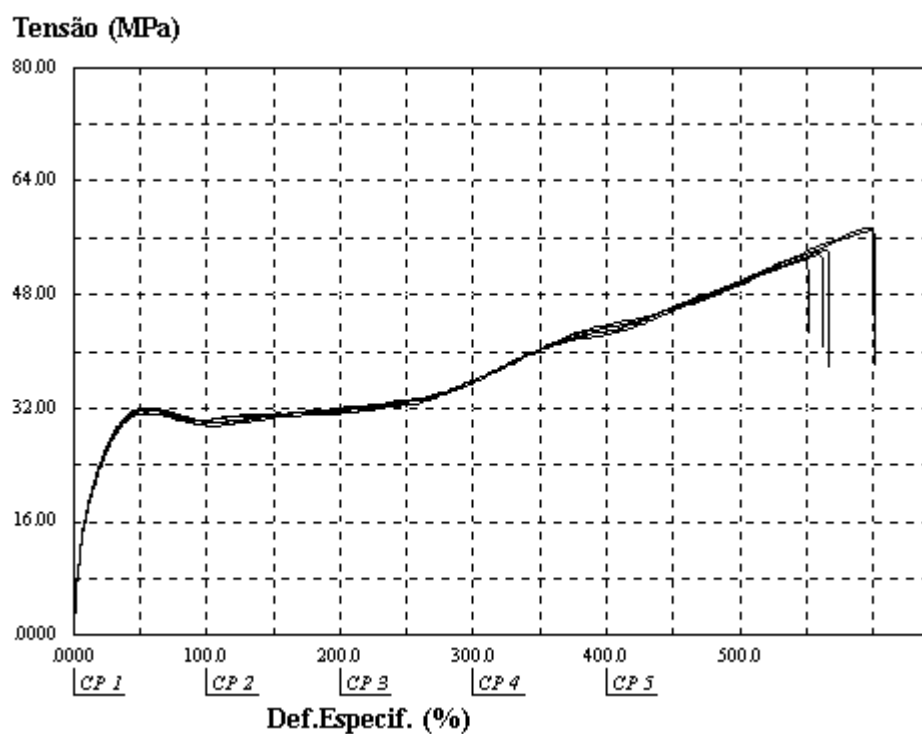
Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm2)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1	33.83	45.87	27.27	41.44	282.5	749.6	197.1
CP 2	34.30	45.63	12.42	35.08	150.3	716.8	105.1
CP 3	34.34	45.27	28.64	34.41	103.8	705.2	72.90
CP 4	34.37	45.94	12.86	38.81	282.5	707.0	197.1
CP 5	34.10	44.95	30.62	38.48	200.7	632.4	136.6
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.19	45.53	22.36	37.65	204.0	702.2	141.7
Mediana	34.30	45.63	27.27	38.48	200.7	707.0	136.6
Desv.Padrão	.2261	.4189	8.956	2.896	79.46	42.88	55.32
Coef.Var.(%)	.6615	.9201	40.05	7.693	38.96	6.107	39.03
Mínimo	33.83	44.95	12.42	34.41	103.8	632.4	72.90
Máximo	34.37	45.94	30.62	41.44	282.5	749.6	197.1



Anexo 3.3 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 com tratamento

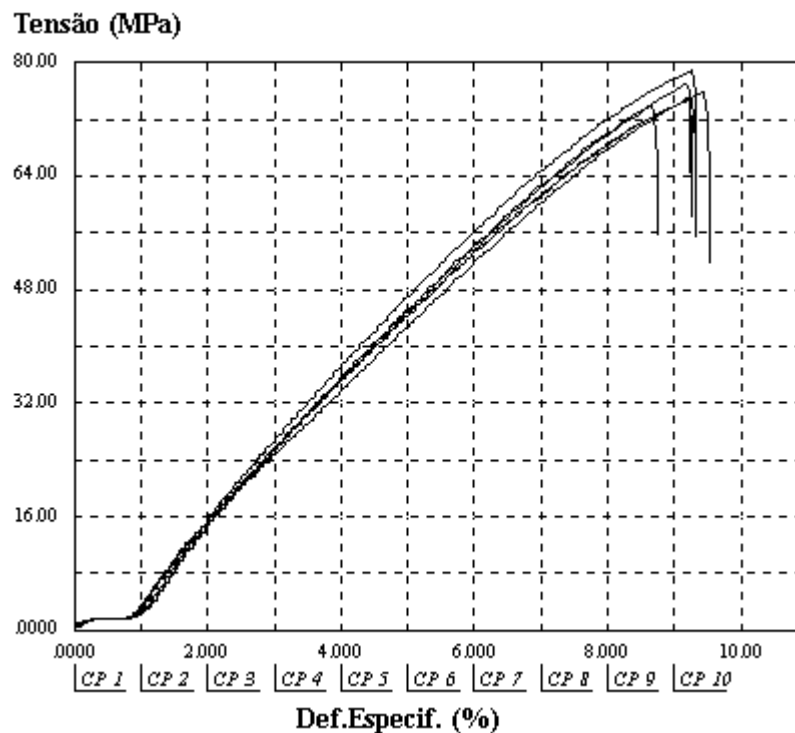
Parâmetro >>	Tensão	Def.Especif.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia	Tensão
Evento >>	Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura	Ponto PT1
Unidade >>	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[J]	[MPa]
CP 1	57.48	599.0	57.48	599.0	208.2	404.6	32.09
CP 2	53.67	550.6	53.52	546.4	199.8	354.0	31.91
CP 3	53.69	559.7	53.30	562.5	208.6	369.5	31.37
CP 4	54.27	564.6	53.88	566.8	205.2	373.8	31.93
CP 5	57.08	597.8	56.61	601.6	227.0	405.4	31.74
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	55.24	574.3	54.96	575.3	209.8	381.5	31.81
Mediana	54.27	564.6	53.88	566.8	208.2	373.8	31.91
Desv.Padrão	1.885	22.54	1.942	24.09	10.26	22.71	.2736
Coef.Var.(%)	3.412	3.925	3.533	4.188	4.890	5.954	.8603
Mínimo	53.67	550.6	53.30	546.4	199.8	354.0	31.37
Máximo	57.48	599.0	57.48	601.6	227.0	405.4	32.09

Legenda >>> Ponto PT1: Def.Especif. 56.00 %



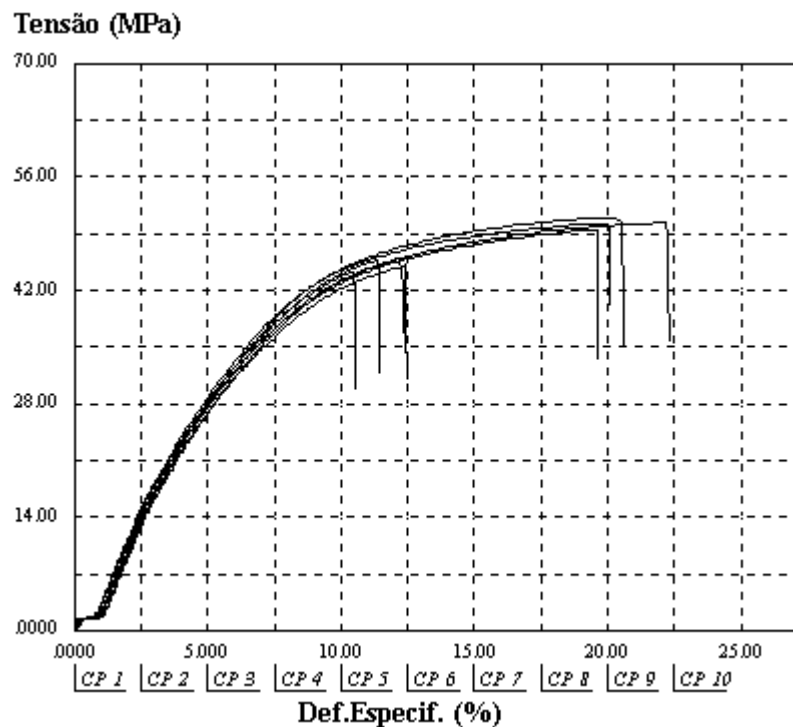
Anexo 3.4 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 com 15% de fibra de vidro sem tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def. Especif.	Tensão	Def. Especif.	Mod. Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1 (R)	34.23	78.97	9.280	78.97	9.280	1357	6.570
CP 2	34.27	76.98	9.192	76.98	9.192	552.6	6.230
CP 3	34.30	75.96	9.457	75.96	9.457	638.9	6.373
CP 4	34.30	73.97	8.661	73.97	8.661	618.4	5.564
CP 5	34.30	75.16	9.280	74.93	9.192	622.5	6.149
CP 6	34.23	74.83	9.236	74.51	9.147	608.4	6.096
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.28	75.38	9.165	75.27	9.130	608.2	6.083
Mediana	34.30	75.16	9.236	74.93	9.192	618.4	6.149
Desv. Padrão	.02978	1.144	.2991	1.202	.2891	32.94	.3080
Coef. Var. (%)	.08689	1.517	3.263	1.597	3.167	5.417	5.064
Mínimo	34.23	73.97	8.661	73.97	8.661	552.6	5.564
Máximo	34.30	76.98	9.457	76.98	9.457	638.9	6.373



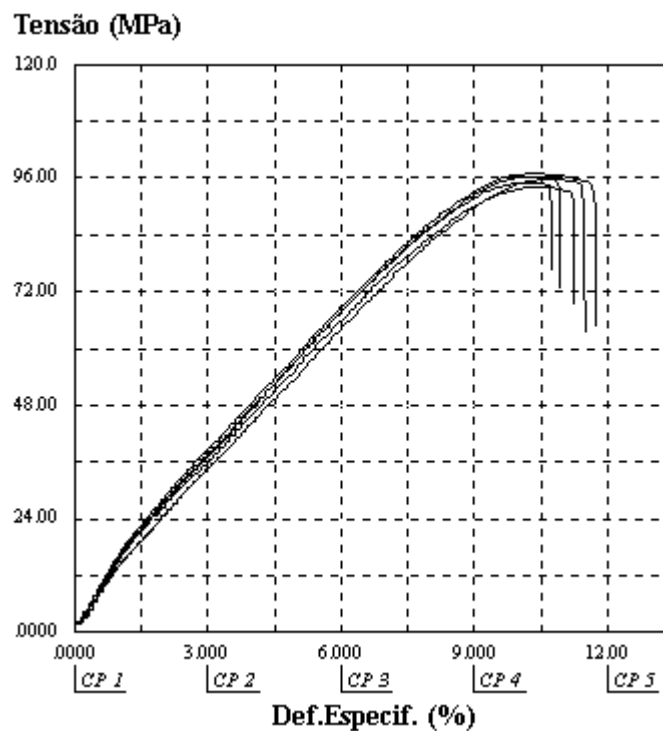
Anexo 3.5 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 com 15% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Tensão Ruptura (MPa)	Def.Especif. Ruptura (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Ruptura (J)
CP 1	34.81	50.91	19.31	50.36	20.55	841.1	13.40
CP 2	34.85	45.78	11.40	45.78	11.40	791.6	5.586
CP 3	34.88	44.39	10.47	44.39	10.47	372.0	4.836
CP 4	34.85	50.13	18.91	49.98	19.97	422.3	12.95
CP 5	34.88	50.32	21.74	50.32	22.18	838.5	14.56
CP 6	34.78	46.01	12.24	45.93	12.15	802.0	5.911
CP 7	34.88	49.54	19.53	49.54	19.62	369.8	12.28
CP 8	34.88	45.09	12.46	45.09	12.46	834.6	6.114
Número CPs	8	8	8	8	8	8	8
Média	34.85	47.77	15.76	47.67	16.10	659.0	9.455
Mediana	34.86	47.77	15.69	47.73	16.04	796.8	9.197
Desv.Padrão	.03855	2.692	4.516	2.594	4.881	225.6	4.172
Coef.Var.(%)	.1106	5.636	28.66	5.441	30.31	34.23	44.13
Mínimo	34.78	44.39	10.47	44.39	10.47	369.8	4.836
Máximo	34.88	50.91	21.74	50.36	22.18	841.1	14.56



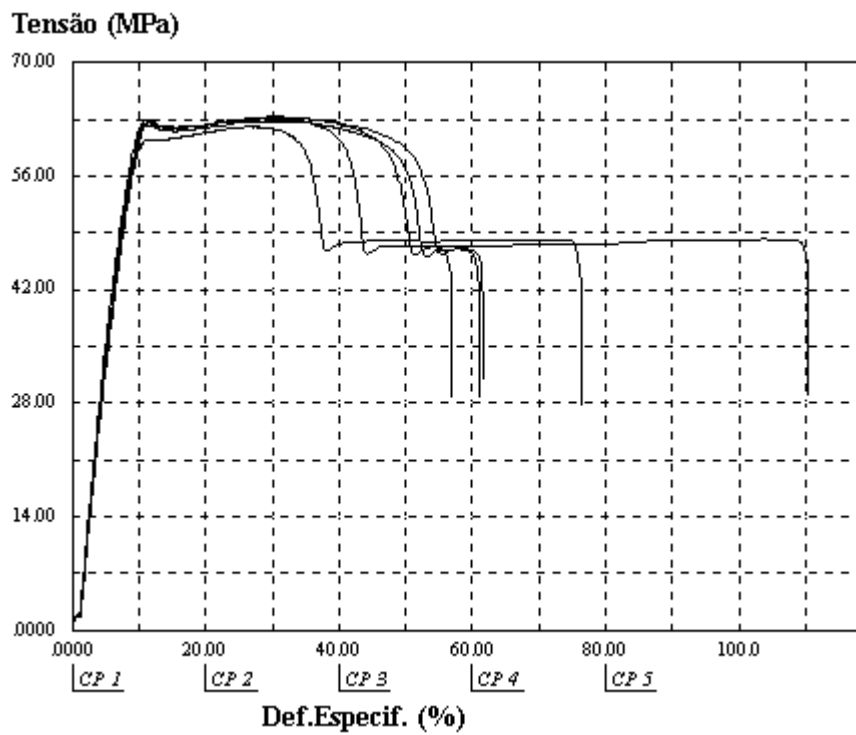
Anexo 3.6 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 6 com 30% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def. Especif.	Tensão	Def. Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1	33.19	95.87	10.63	94.81	11.42	1007	11.12
CP 2	33.06	96.42	10.32	95.84	10.85	1016	10.65
CP 3	33.60	94.16	10.31	93.10	11.18	846.0	11.09
CP 4	33.06	95.18	10.15	94.85	10.59	1512	10.16
CP 5	33.36	97.10	10.27	94.57	11.67	915.1	12.23
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	33.26	95.75	10.34	94.64	11.14	1059	11.05
Mediana	33.19	95.87	10.31	94.81	11.18	1007	11.09
Desv.Padrão	.2271	1.134	.1793	.9856	.4343	262.6	.7655
Coef.Var.(%)	.6828	1.185	1.735	1.041	3.897	24.79	6.928
Mínimo	33.06	94.16	10.15	93.10	10.59	846.0	10.16
Máximo	33.60	97.10	10.63	95.84	11.67	1512	12.23



Anexo 3.7 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 sem tratamento

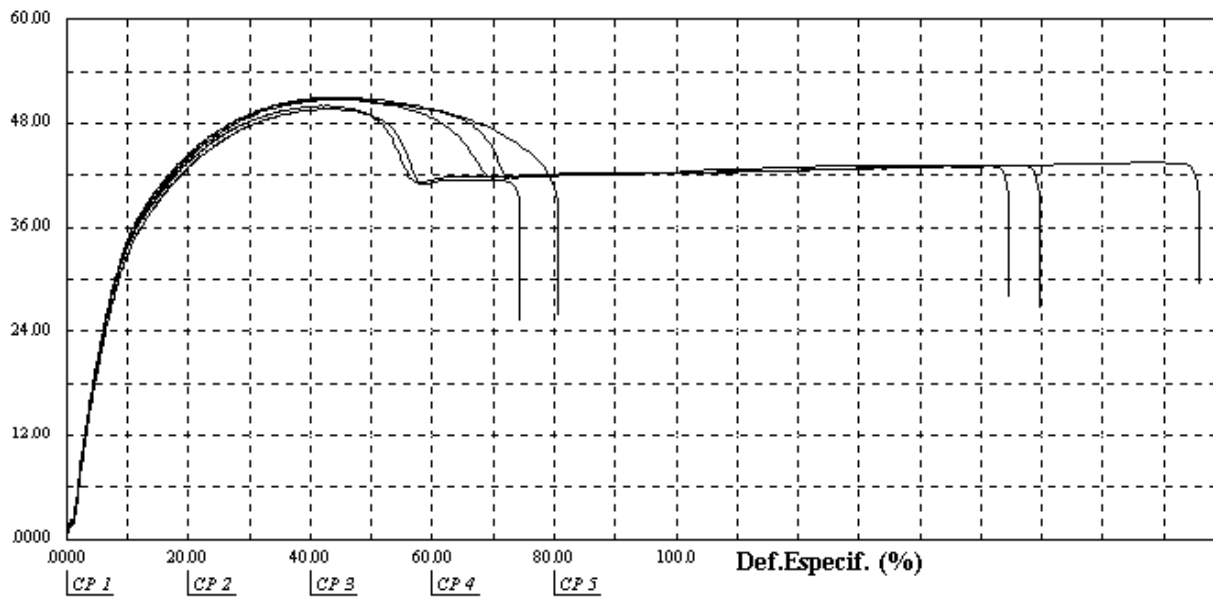
Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def. Especif.	Tensão	Def. Especif.	Mod. Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1	34.20	63.12	27.80	41.23	56.79	936.5	51.59
CP 2	34.20	63.29	29.34	44.26	110.3	883.2	96.98
CP 3	34.47	62.79	27.80	42.42	61.56	908.7	57.65
CP 4	34.37	63.21	27.44	40.48	61.03	915.5	58.10
CP 5	33.76	62.09	25.85	42.01	76.32	843.6	64.80
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.20	62.90	27.65	42.08	73.21	897.5	65.82
Mediana	34.20	63.12	27.80	42.01	61.56	908.7	58.10
Desv. Padrão	.2704	.4909	1.243	1.428	22.04	35.61	18.03
Coef. Var. (%)	.7906	.7804	4.498	3.394	30.10	3.968	27.40
Mínimo	33.76	62.09	25.85	40.48	56.79	843.6	51.59
Máximo	34.47	63.29	29.34	44.26	110.3	936.5	96.98



Anexo 3.8 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com tratamento

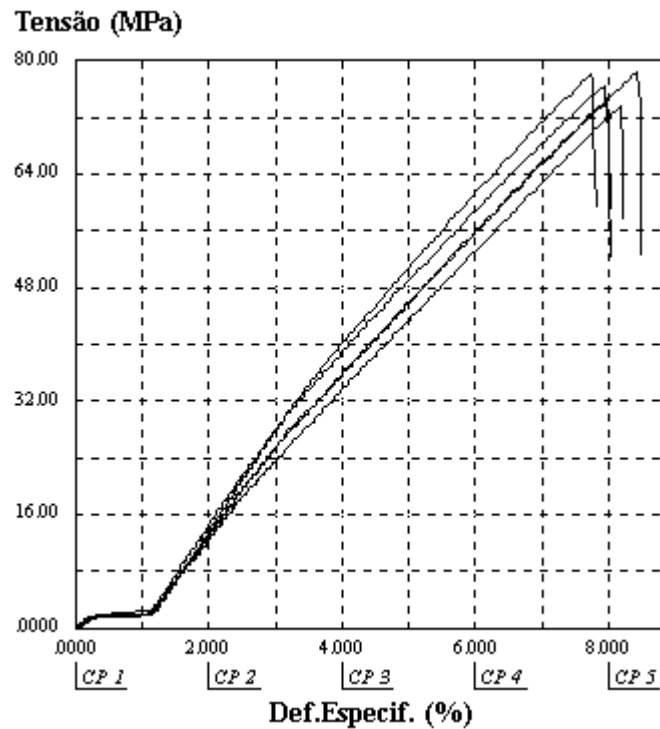
Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm2)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1	34.81	49.64	41.14	38.61	74.28	271.4	53.03
CP 2	34.64	50.04	41.41	39.75	185.8	533.1	136.0
CP 3	34.74	51.00	41.89	38.46	80.56	563.7	61.37
CP 4	34.84	50.86	43.22	38.91	159.7	572.1	119.1
CP 5	34.74	50.78	42.95	40.12	154.4	539.2	115.2
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.75	50.46	42.12	39.17	131.0	495.9	96.94
Mediana	34.74	50.78	41.89	38.91	154.4	539.2	115.2
Desv.Padrão	.07844	.5901	.9245	.7279	50.34	126.5	37.23
Coef.Var.(%)	.2257	1.169	2.195	1.858	38.44	25.52	38.40
Mínimo	34.64	49.64	41.14	38.46	74.28	271.4	53.03
Máximo	34.84	51.00	43.22	40.12	185.8	572.1	136.0

Tensão (MPa)



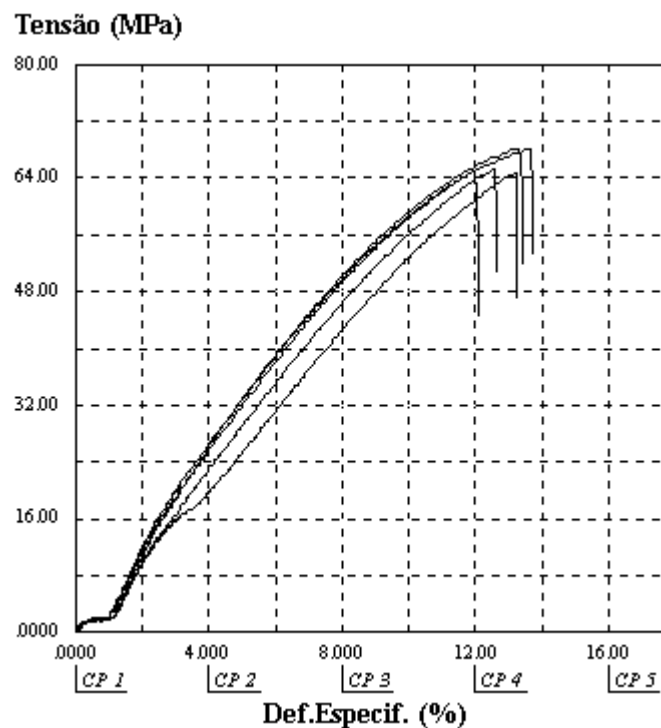
Anexo 3.9 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com 15% de fibra de vidro sem tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1	34.20	73.63	8.175	73.07	8.131	1196	4.731
CP 2	34.23	74.28	7.954	74.28	7.954	1303	4.739
CP 3	34.17	78.33	8.440	78.33	8.440	1254	5.388
CP 4	34.23	78.17	7.733	78.17	7.733	1419	4.896
CP 5	34.23	76.58	7.954	76.03	7.866	1439	4.933
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.21	76.20	8.052	75.97	8.025	1322	4.938
Mediana	34.23	76.58	7.954	76.03	7.954	1303	4.896
Desv.Padrão	.02978	2.171	.2677	2.327	.2735	105.0	.2678
Coef.Var.(%)	.08706	2.849	3.325	3.062	3.408	7.939	5.424
Mínimo	34.17	73.63	7.733	73.07	7.733	1196	4.731
Máximo	34.23	78.33	8.440	78.33	8.440	1439	5.388



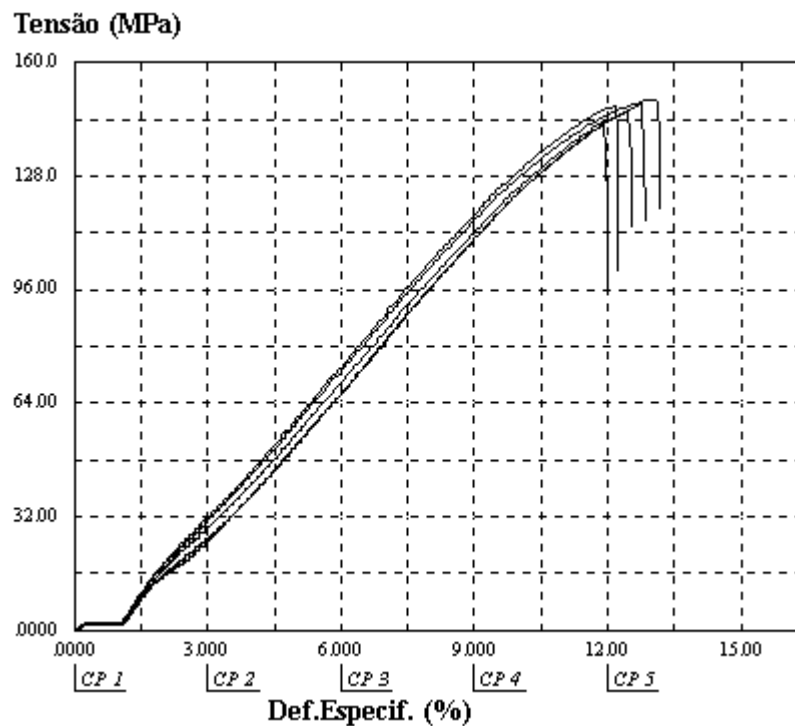
Anexo 3.10 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com 15% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1	34.71	68.22	13.30	68.22	13.30	979.5	9.126
CP 2	34.57	68.19	13.70	68.11	13.61	479.2	9.284
CP 3	34.85	65.16	12.02	65.16	12.02	423.0	7.561
CP 4	34.81	65.38	12.55	65.14	12.46	413.8	7.538
CP 5	34.95	64.81	13.21	64.81	13.21	402.7	7.840
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.78	66.35	12.96	66.29	12.92	539.6	8.270
Mediana	34.81	65.38	13.21	65.16	13.21	423.0	7.840
Desv.Padrão	.1427	1.704	.6668	1.720	.6574	247.6	.8638
Coef.Var.(%)	.4105	2.569	5.147	2.594	5.088	45.89	10.45
Mínimo	34.57	64.81	12.02	64.81	12.02	402.7	7.538
Máximo	34.95	68.22	13.70	68.22	13.61	979.5	9.284



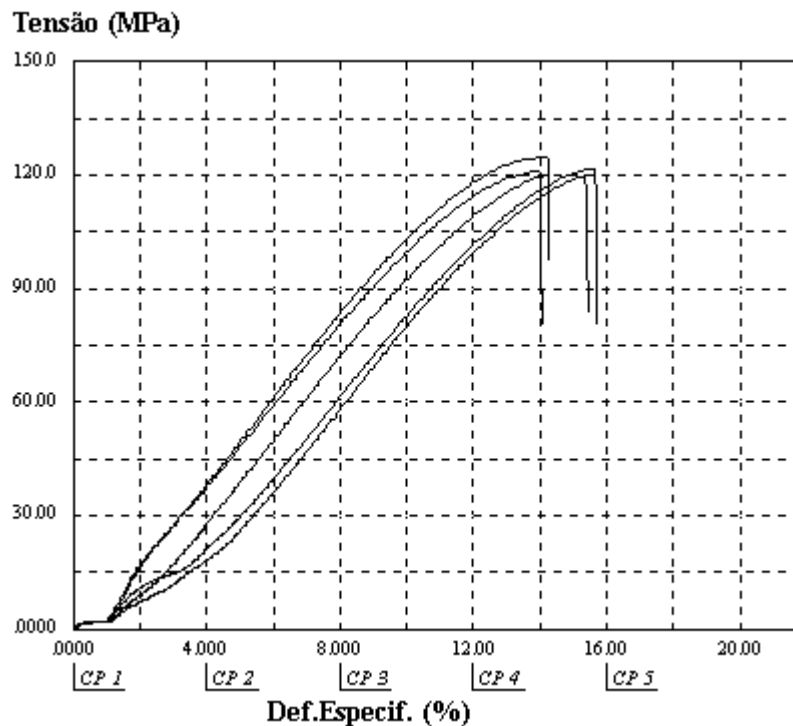
Anexo 3.11 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com 30% de fibra de vidro sem tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1	34.68	143.4	11.93	143.4	11.93	906.2	14.46
CP 2	34.54	146.1	12.46	145.6	12.37	1470	15.06
CP 3	34.61	148.1	12.77	147.8	12.68	1475	15.87
CP 4	34.51	148.0	12.20	148.0	12.20	961.5	15.77
CP 5	34.20	149.3	12.95	149.3	13.04	987.4	17.53
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.50	147.0	12.46	146.8	12.44	1160	15.74
Mediana	34.54	148.0	12.46	147.8	12.37	987.4	15.77
Desv.Padrão	.1829	2.320	.4134	2.337	.4291	286.7	1.153
Coef.Var.(%)	.5300	1.579	3.317	1.592	3.448	24.72	7.325
Mínimo	34.20	143.4	11.93	143.4	11.93	906.2	14.46
Máximo	34.68	149.3	12.95	149.3	13.04	1475	17.53



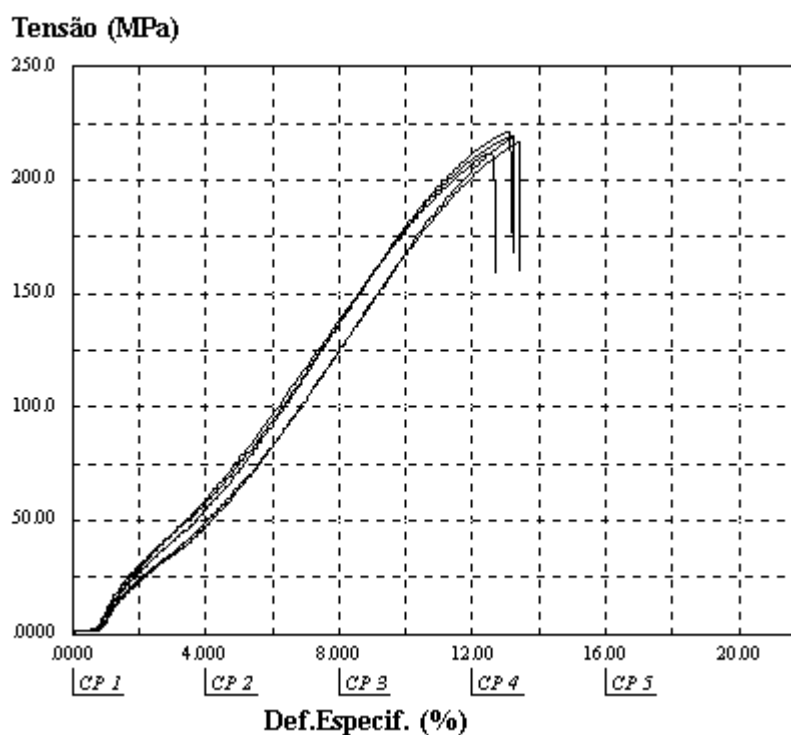
Anexo 3.12 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do náilon 66 com 30% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1	34.51	122.0	15.64	122.0	15.64	1101	16.31
CP 2	34.37	120.2	14.23	120.0	14.14	1109	14.73
CP 3	34.64	119.8	15.38	119.8	15.38	1114	15.11
CP 4	34.34	124.6	13.96	124.6	14.14	805.5	16.85
CP 5	34.51	120.9	13.74	120.7	14.01	819.5	16.16
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.47	121.5	14.59	121.4	14.66	989.7	15.83
Mediana	34.51	120.9	14.23	120.7	14.14	1101	16.16
Desv.Padrão	.1228	1.937	.8617	1.979	.7821	161.9	.8819
Coef.Var.(%)	.3563	1.595	5.905	1.630	5.334	16.36	5.571
Mínimo	34.34	119.8	13.74	119.8	14.01	805.5	14.73
Máximo	34.64	124.6	15.64	124.6	15.64	1114	16.85



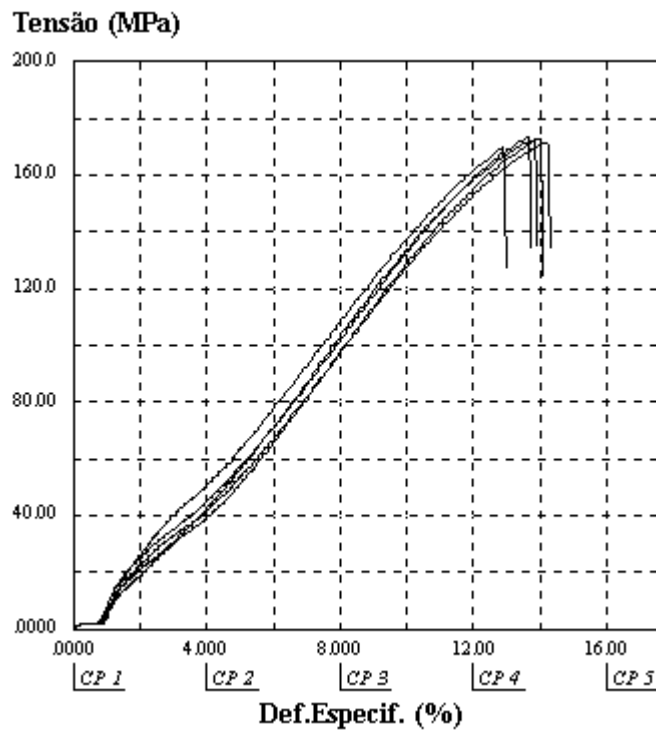
Anexo 3.13 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do *Technylstar* com 60% de fibra de vidro sem tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Tensão Ruptura (MPa)	Def.Especif. Ruptura (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Ruptura (J)
CP 1	33.99	212.7	12.59	212.7	12.59	1698	22.64
CP 2	34.16	219.4	13.21	218.8	13.12	1678	24.57
CP 3	34.20	221.5	13.12	221.2	13.04	2206	24.15
CP 4	34.20	218.4	13.21	218.4	13.21	2184	23.06
CP 5	33.99	216.5	13.39	216.5	13.39	2130	23.52
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.11	217.7	13.11	217.5	13.07	1979	23.59
Mediana	34.16	218.4	13.21	218.4	13.12	2130	23.52
Desv.Padrão	.1069	3.312	.3023	3.148	.2971	267.3	.7837
Coef.Var.(%)	.3134	1.522	2.306	1.447	2.273	13.50	3.322
Mínimo	33.99	212.7	12.59	212.7	12.59	1678	22.64
Máximo	34.20	221.5	13.39	221.2	13.39	2206	24.57



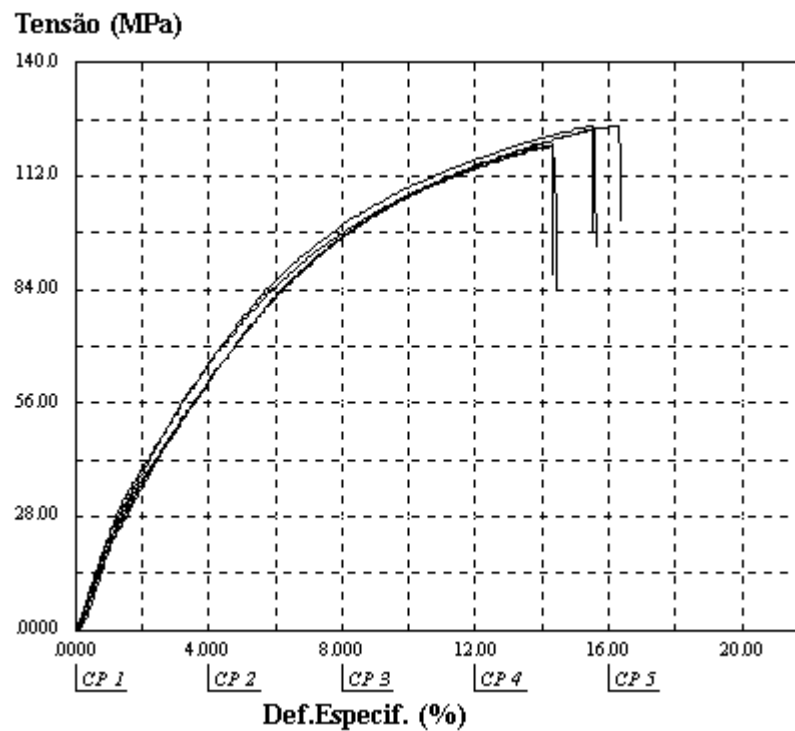
Anexo 3.14 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do *Technylstar* com 60% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.	Ruptura	Ruptura		Ruptura
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(J)
CP 1	34.34	173.7	13.65	173.0	13.57	1471	20.04
CP 2	34.44	172.7	13.88	172.4	13.79	1623	20.58
CP 3	34.23	169.7	12.90	169.7	12.90	1403	18.98
CP 4	34.34	172.9	14.01	172.9	14.01	1622	20.33
CP 5	34.34	171.4	14.19	171.4	14.19	1261	20.91
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.34	172.1	13.73	171.9	13.69	1476	20.17
Mediana	34.34	172.7	13.88	172.4	13.79	1471	20.33
Desv.Padrão	.07269	1.548	.4986	1.371	.4974	153.5	.7401
Coef.Var.(%)	.2117	.8997	3.633	.7978	3.633	10.40	3.670
Mínimo	34.23	169.7	12.90	169.7	12.90	1261	18.98
Máximo	34.44	173.7	14.19	173.0	14.19	1623	20.91



Anexo 3.15 – Tabela e gráfico do ensaio de tração do Vectra com 25% de grafite

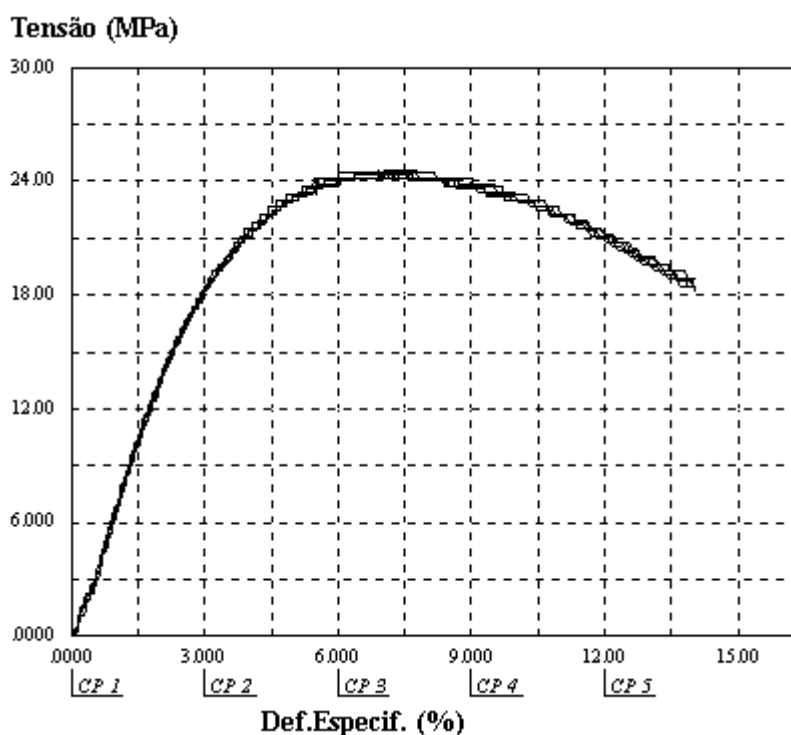
Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Tensão Ruptura (MPa)	Def.Especif. Ruptura (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Ruptura (J)
CP 1	34.26	124.6	16.31	124.4	16.22	2404	23.91
CP 2	34.26	119.6	14.36	119.6	14.36	2363	20.30
CP 3	34.26	123.3	15.47	123.3	15.47	2318	22.33
CP 4	34.37	119.7	14.32	119.7	14.32	2405	19.84
CP 5	34.30	124.2	15.47	124.2	15.56	2468	23.21
Número CPs	5	5	5	5	5	5	5
Média	34.29	122.3	15.18	122.2	15.18	2392	21.92
Mediana	34.26	123.3	15.47	123.3	15.47	2404	22.33
Desv.Padrão	.04481	2.457	.8435	2.420	.8235	55.48	1.786
Coef.Var.(%)	.1307	2.009	5.555	1.980	5.424	2.320	8.148
Mínimo	34.26	119.6	14.32	119.6	14.32	2318	19.84
Máximo	34.37	124.6	16.31	124.4	16.22	2468	23.91



ANEXO 4 – Tabelas e Curvas dos Ensaios de Flexão

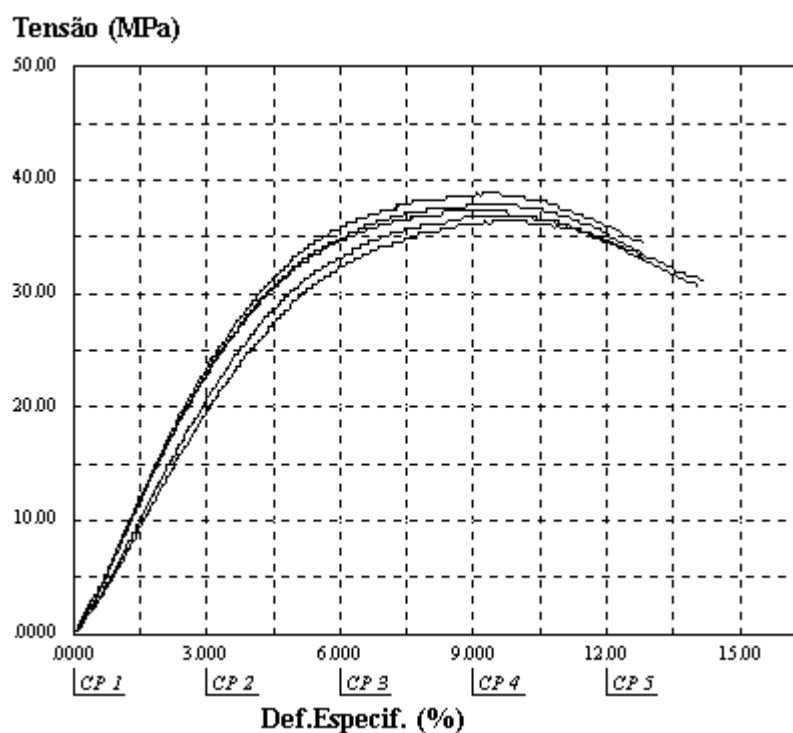
Anexo 4.1 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do polipropileno

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.816	24.38	6.388	800.2	268.7
CP 2	1.802	24.57	6.932	798.1	301.4
CP 3	1.805	24.15	6.003	766.9	241.9
CP 4	1.805	24.53	6.034	803.8	249.0
CP 5	1.804	24.54	7.091	763.0	311.1
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.806	24.43	6.490	786.4	274.4
Mediana	1.805	24.53	6.388	798.1	268.7
Desv.Padrão	.005505	.1745	.5033	19.71	30.85
Coef.Var.(%)	.3047	.7144	7.755	2.507	11.24
Mínimo	1.802	24.15	6.003	763.0	241.9
Máximo	1.816	24.57	7.091	803.8	311.1



Anexo 4.2 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 sem tratamento

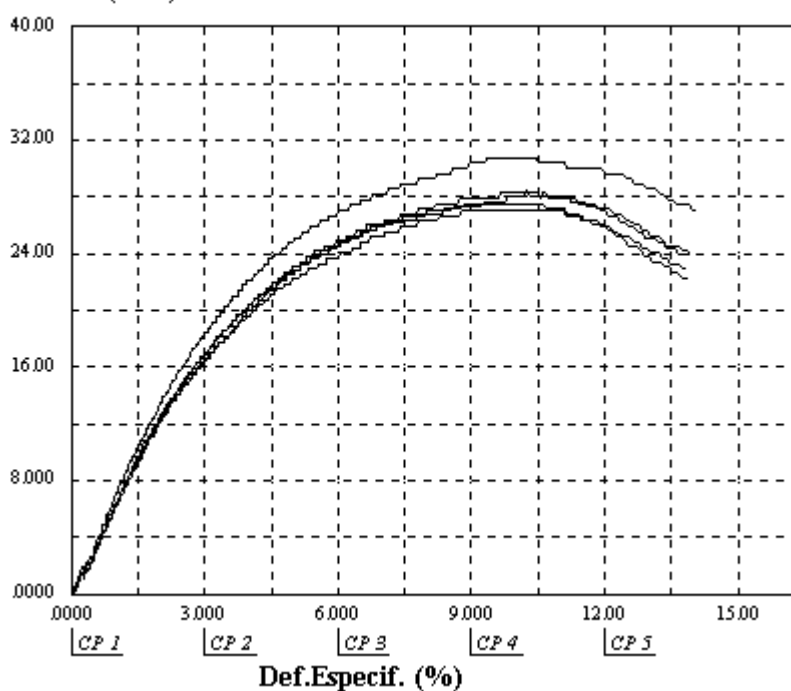
Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.		Força Max.
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(N.mm)
CP 1	1.826	36.93	8.801	724.9	556.4
CP 2	1.811	36.48	9.273	713.7	575.2
CP 3	1.845	37.29	8.340	880.3	555.2
CP 4	1.801	38.95	9.090	910.1	624.7
CP 5	1.811	37.99	8.876	834.4	595.0
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.819	37.53	8.876	812.7	581.3
Mediana	1.811	37.29	8.876	834.4	575.2
Desv.Padrão	.01715	.9689	.3521	89.48	29.19
Coef.Var.(%)	.9431	2.582	3.966	11.01	5.022
Mínimo	1.801	36.48	8.340	713.7	555.2
Máximo	1.845	38.95	9.273	910.1	624.7



Anexo 4.3 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 com tratamento

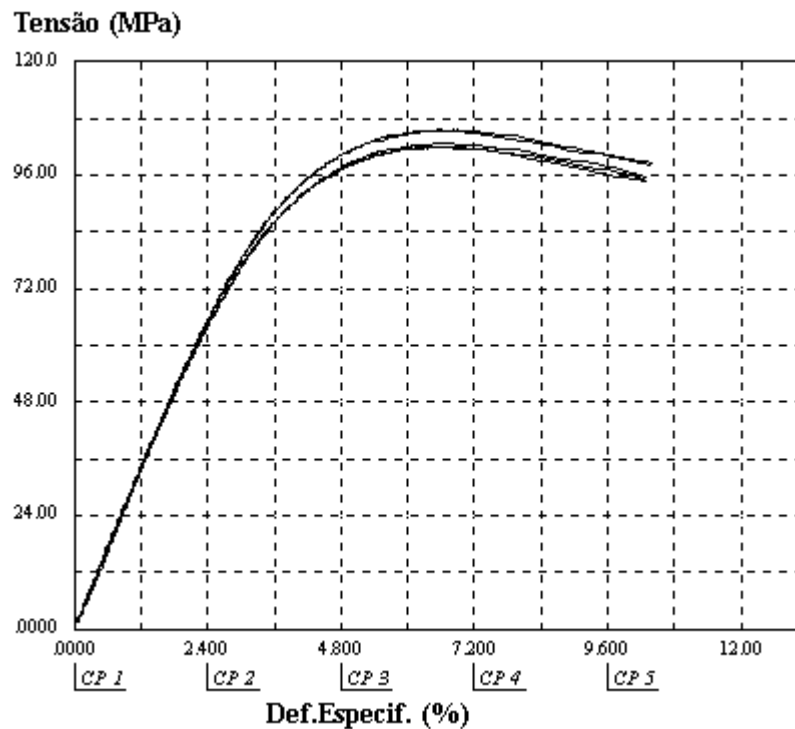
Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.		Força Max.
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(N.mm)
CP 1	1.831	28.27	9.679	606.4	500.4
CP 2	1.831	27.53	8.835	562.9	435.8
CP 3	1.838	27.05	8.795	657.9	423.8
CP 4	1.813	30.81	9.345	720.0	507.5
CP 5	1.842	28.47	10.27	650.5	542.7
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.831	28.43	9.385	639.5	482.1
Mediana	1.831	28.27	9.345	650.5	500.4
Desv.Padrão	.01111	1.448	.6162	58.95	50.49
Coef.Var.(%)	.6069	5.094	6.567	9.218	10.47
Mínimo	1.813	27.05	8.795	562.9	423.8
Máximo	1.842	30.81	10.27	720.0	542.7

Tensão (MPa)



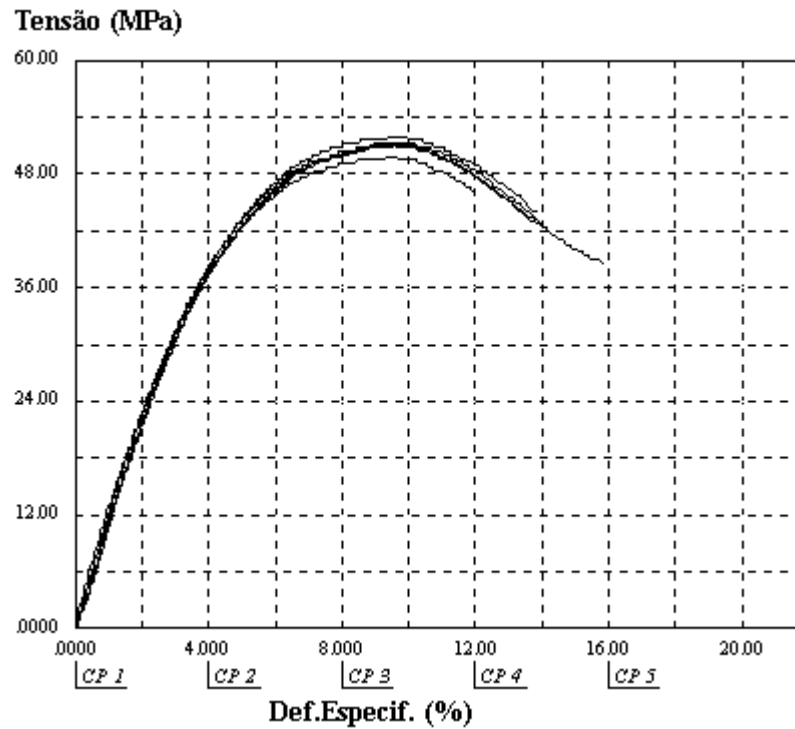
Anexo 4.4 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 com 15% de fibra de vidro sem tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.841	102.9	6.465	2906	1187
CP 2	1.841	102.1	6.314	2304	1146
CP 3	1.851	101.9	6.127	2840	1103
CP 4	1.834	105.8	6.551	2868	1223
CP 5	1.837	105.3	6.239	2905	1147
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.841	103.6	6.339	2764	1161
Mediana	1.841	102.9	6.314	2868	1147
Desv.Padrão	.006419	1.837	.1705	259.1	45.64
Coef.Var.(%)	.3487	1.773	2.690	9.373	3.930
Mínimo	1.834	101.9	6.127	2304	1103
Máximo	1.851	105.8	6.551	2906	1223



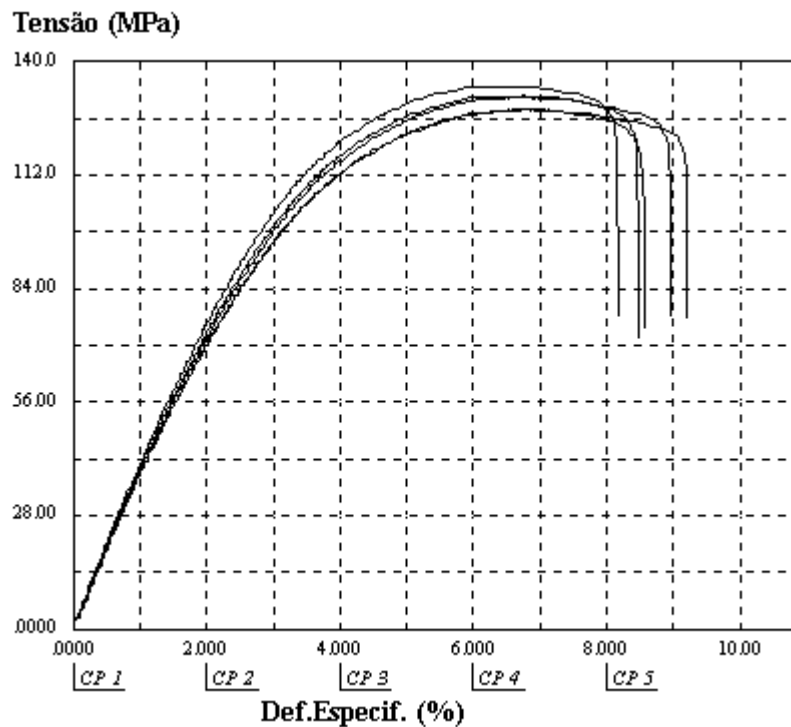
Anexo 4.5 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 com 15% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.849	51.20	9.582	1224	933.0
CP 2	1.849	51.20	8.963	1202	833.2
CP 3	1.848	51.97	9.392	1243	906.9
CP 4	1.842	49.92	9.326	1233	880.0
CP 5	1.844	50.97	8.866	1247	817.8
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.846	51.05	9.226	1230	874.2
Mediana	1.848	51.20	9.326	1233	880.0
Desv.Padrão	.003209	.7375	.3011	18.01	48.52
Coef.Var.(%)	.1738	1.445	3.264	1.464	5.550
Mínimo	1.842	49.92	8.866	1202	817.8
Máximo	1.849	51.97	9.582	1247	933.0



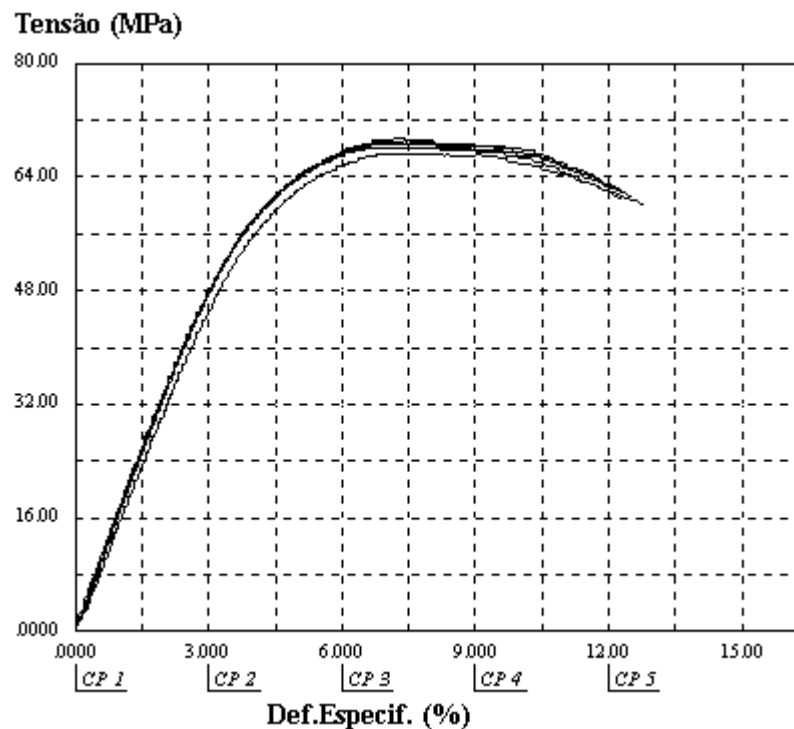
Anexo 4.6 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 6 com 30% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.764	128.2	6.525	3401	1416
CP 2	1.748	131.3	6.498	3988	1422
CP 3	1.768	128.3	6.744	3950	1490
CP 4	1.764	134.0	6.161	4194	1388
CP 5	1.762	131.8	6.743	4102	1538
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.761	130.7	6.534	3927	1451
Mediana	1.764	131.3	6.525	3988	1422
Desv.Padrão	.007694	2.476	.2389	309.3	61.47
Coef.Var.(%)	.4369	1.894	3.656	7.876	4.238
Mínimo	1.748	128.2	6.161	3401	1388
Máximo	1.768	134.0	6.744	4194	1538



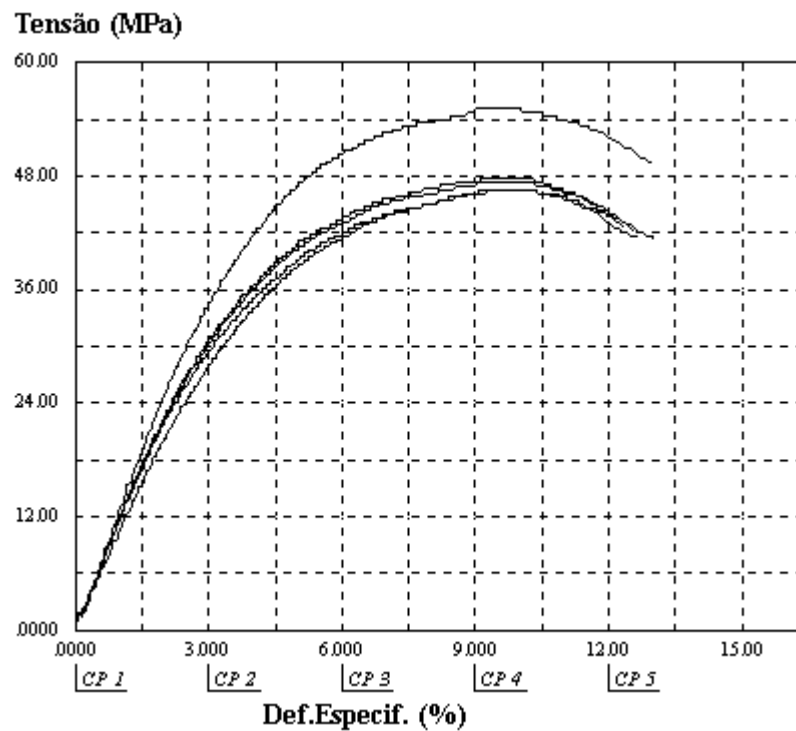
Anexo 4.7 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 sem tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.		Força Max.
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(N.mm)
CP 1	1.820	69.24	7.405	1749	915.3
CP 2	1.827	68.60	6.646	1774	780.2
CP 3	1.838	68.19	6.534	1769	765.5
CP 4	1.842	69.52	7.172	1443	889.2
CP 5	1.829	67.40	6.785	1616	772.9
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.831	68.59	6.908	1670	824.6
Mediana	1.829	68.60	6.785	1749	780.2
Desv.Padrão	.008815	.8432	.3674	142.5	71.65
Coef.Var.(%)	.4814	1.229	5.318	8.531	8.689
Mínimo	1.820	67.40	6.534	1443	765.5
Máximo	1.842	69.52	7.405	1774	915.3



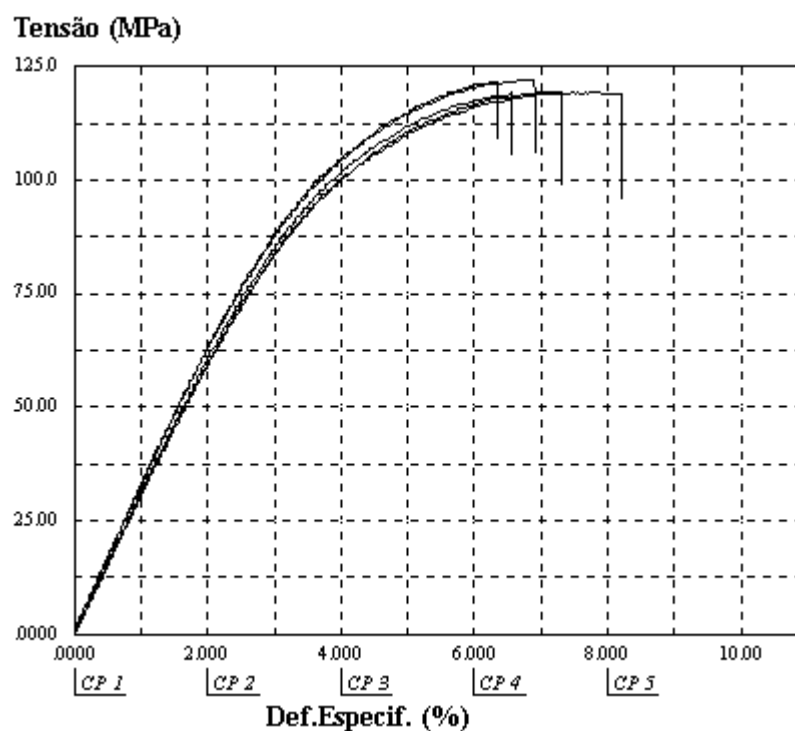
Anexo 4.8 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.		Força Max.
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(N.mm)
CP 1	1.827	55.18	9.020	1264	909.3
CP 2	1.844	46.54	9.281	1185	812.0
CP 3	1.837	47.83	9.136	1205	817.8
CP 4	1.842	47.33	9.056	1198	799.0
CP 5	1.845	46.52	9.094	1056	769.1
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.839	48.68	9.117	1182	821.5
Mediana	1.842	47.33	9.094	1198	812.0
Desv.Padrão	.007382	3.674	.1011	76.46	52.61
Coef.Var.(%)	.4014	7.548	1.109	6.470	6.404
Mínimo	1.827	46.52	9.020	1056	769.1
Máximo	1.845	55.18	9.281	1264	909.3



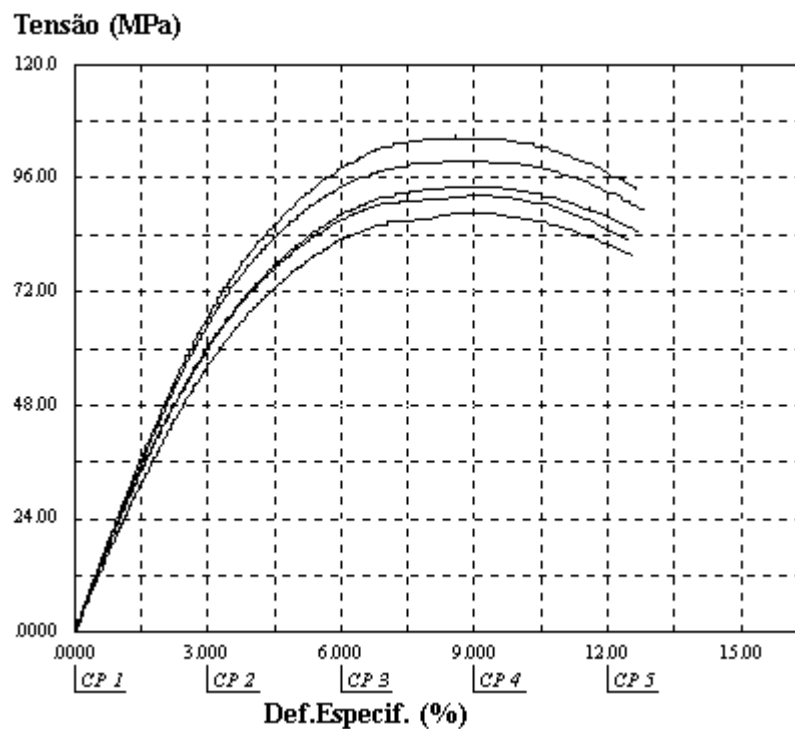
Anexo 4.9 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com 15% de fibra de vidro sem tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.831	119.4	6.930	3029	1453
CP 2	1.845	119.2	7.455	3090	1632
CP 3	1.823	119.2	6.547	3101	1341
CP 4	1.834	122.2	6.649	3186	1429
CP 5	1.823	121.8	6.222	3210	1283
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.831	120.4	6.761	3123	1428
Mediana	1.831	119.4	6.649	3101	1429
Desv.Padrão	.009121	1.495	.4634	74.23	133.1
Coef.Var.(%)	.4981	1.242	6.854	2.377	9.325
Mínimo	1.823	119.2	6.222	3029	1283
Máximo	1.845	122.2	7.455	3210	1632



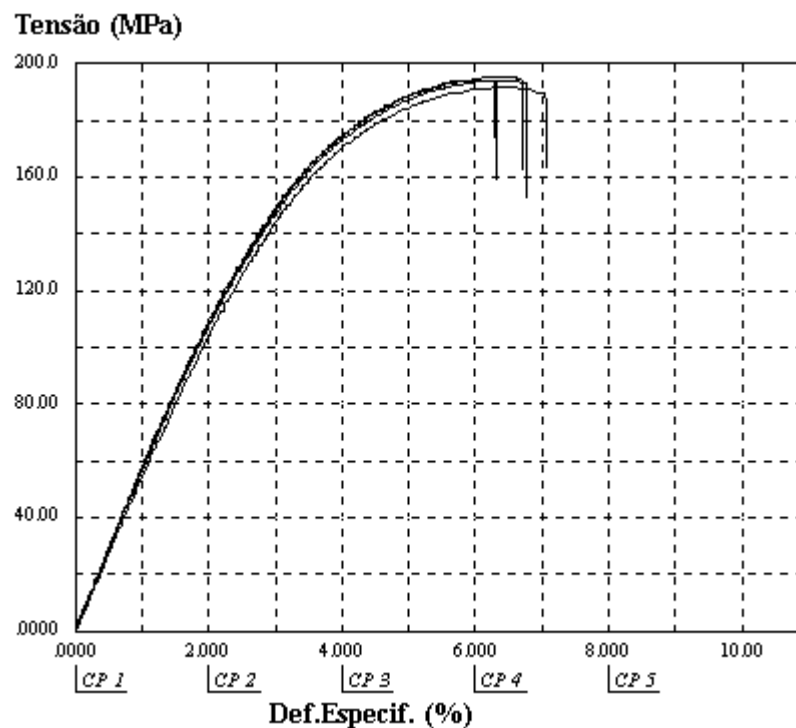
Anexo 4.10 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com 15% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.829	99.80	8.321	2440	1509
CP 2	1.815	105.1	8.604	2475	1622
CP 3	1.835	92.43	8.884	2347	1546
CP 4	1.830	88.58	8.524	2149	1372
CP 5	1.793	94.21	8.371	2324	1390
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.820	96.02	8.541	2347	1488
Mediana	1.829	94.21	8.524	2347	1509
Desv.Padrão	.01702	6.478	.2235	127.1	105.8
Coef.Var.(%)	.9352	6.746	2.617	5.416	7.111
Mínimo	1.793	88.58	8.321	2149	1372
Máximo	1.835	105.1	8.884	2475	1622



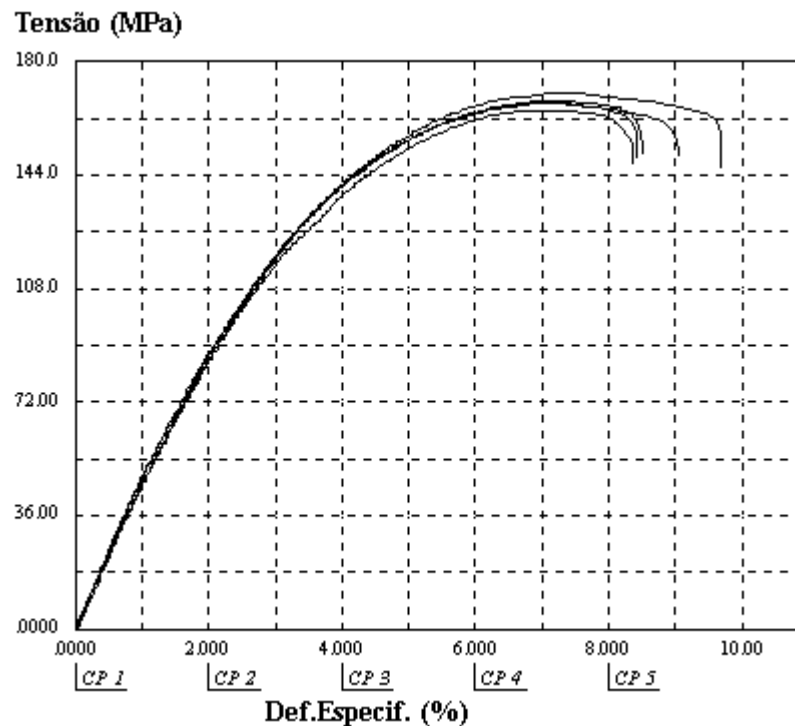
Anexo 4.11 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com 30% de fibra de vidro sem tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.829	195.5	6.233	5826	2163
CP 2	1.816	194.3	6.178	5496	2085
CP 3	1.829	194.4	5.938	5745	2003
CP 4	1.822	194.4	5.973	5662	2006
CP 5	1.820	191.6	6.250	5431	2087
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.823	194.0	6.114	5632	2069
Mediana	1.822	194.4	6.178	5662	2085
Desv.Padrão	.005718	1.446	.1480	166.0	66.64
Coef.Var.(%)	.3136	.7453	2.420	2.948	3.221
Mínimo	1.816	191.6	5.938	5431	2003
Máximo	1.829	195.5	6.250	5826	2163



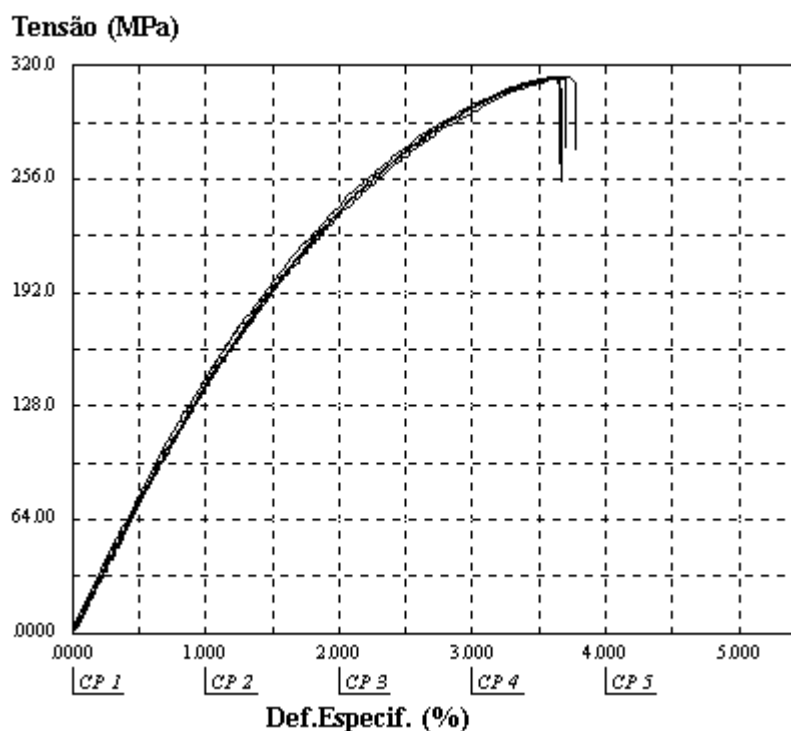
Anexo 4.12 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do náilon 66 com 30% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.		Força Max.
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(N.mm)
CP 1	1.837	167.6	6.845	5099	2044
CP 2	1.820	169.9	7.042	4631	2094
CP 3	1.852	166.6	6.848	4877	2054
CP 4	1.835	166.7	6.846	4814	2035
CP 5	1.841	164.6	6.751	4724	1961
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.837	167.1	6.866	4829	2037
Mediana	1.837	166.7	6.846	4814	2044
Desv.Padrão	.01155	1.911	.1066	177.3	48.36
Coef.Var.(%)	.6290	1.144	1.553	3.672	2.374
Mínimo	1.820	164.6	6.751	4631	1961
Máximo	1.852	169.9	7.042	5099	2094



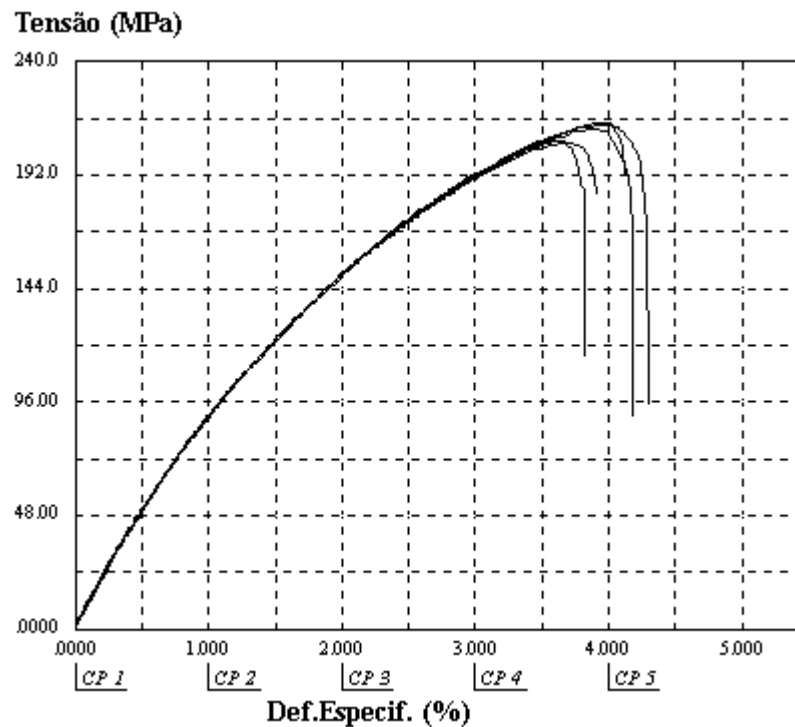
Anexo 4.13 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do *Technylstar* com 60% de fibra de vidro sem tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.825	313.5	3.722	14430	1942
CP 2	1.823	313.8	3.608	14840	1861
CP 3	1.812	312.0	3.587	14840	1819
CP 4	1.815	312.2	3.577	14770	1825
CP 5	1.829	313.2	3.603	14860	1900
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.821	313.0	3.619	14750	1870
Mediana	1.823	313.2	3.603	14840	1861
Desv.Padrão	.007085	.8069	.05864	178.8	51.76
Coef.Var.(%)	.3891	.2578	1.620	1.212	2.769
Mínimo	1.812	312.0	3.577	14430	1819
Máximo	1.829	313.8	3.722	14860	1942



Anexo 4.14 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do *Technylstar* com 60% de fibra de vidro com tratamento

Parâmetro >> Evento >> Unidade >>	Secção Inic. (mm ²)	Tensão Força Max. (MPa)	Def.Especif. Força Max. (%)	Mod.Elástico. (MPa)	Energia Força Max. (N.mm)
CP 1	1.838	205.7	3.665	5299	1247
CP 2	1.838	214.2	3.933	10210	1407
CP 3	1.831	213.2	3.914	9951	1386
CP 4	1.822	206.7	3.626	9718	1214
CP 5	1.826	211.5	3.849	9164	1334
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.831	210.2	3.797	8869	1318
Mediana	1.831	211.5	3.849	9718	1334
Desv.Padrão	.007141	3.838	.1426	2033	84.77
Coef.Var.(%)	.3900	1.825	3.755	22.92	6.434
Mínimo	1.822	205.7	3.626	5299	1214
Máximo	1.838	214.2	3.933	10210	1407



Anexo 4.15 – Tabela e gráfico do ensaio de flexão do Vectra com 25% de grafite

Parâmetro >>	Secção Inic.	Tensão	Def.Especif.	Mod.Elástico.	Energia
Evento >>		Força Max.	Força Max.		Força Max.
Unidade >>	(mm ²)	(MPa)	(%)	(MPa)	(N.mm)
CP 1	1.825	124.7	5.399	8596	1364
CP 2	1.823	124.0	5.180	8304	1289
CP 3	1.827	123.8	5.243	8451	1316
CP 4	1.829	121.0	5.289	8443	1299
CP 5	1.815	123.1	5.540	7898	1382
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	1.824	123.3	5.330	8338	1330
Mediana	1.825	123.8	5.289	8443	1316
Desv.Padrão	.005404	1.397	.1419	266.9	40.86
Coef.Var.(%)	.2963	1.133	2.662	3.201	3.073
Mínimo	1.815	121.0	5.180	7898	1289
Máximo	1.829	124.7	5.540	8596	1382

