



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEM**  
**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
**ESTUDO DO COMPORTAMENTO  
À FADIGA DO POLIPROPILENO**

**CARLOS EDUARDO JUNGES**

**JOINVILLE, SC**  
**2017**

**CARLOS EDUARDO JUNGES**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DO POLIPROPILENO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

**JOINVILLE, SC**

**2017**

## Ata de Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso

O aluno Carlos Eduardo Junges, do curso de Engenharia Mecânica da UDESC, apresentou perante a banca examinadora abaixo relacionada o trabalho intitulado Estudo do Comportamento à Fadiga do Polipropileno, obtendo a nota 8,2 ( oito virgula dois ), sendo considerado aprovado na disciplina TCC0001.

Membros da banca:

  
Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

  
Prof. Dr. Eduardo Lenz Cardoso

  
Eng. Felipe Augusto Carvalho de Faria

Joinville, 01 / 12 / 2017.

## **AGRADECIMENTOS**

Esse trabalho não teria acontecido não fosse a contribuição de várias pessoas, utilizo este espaço para agradecer alguns dos tantos envolvidos. Ao professor Ricardo Pedro Bom pelo auxílio na fabricação dos corpos de prova, à professora Daniela Becker, em conjunto com a doutoranda Maríndia Decol, pelo auxílio nos ensaios mecânicos do material estudado, ao graduando José Luís Thiesen pelas dicas sobre o software utilizado no trabalho, e ao professor Ricardo de Medeiros pela paciência e pelos direcionamentos no decorrer deste trabalho.

De maneira geral agradeço a todos que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, aos meus pais, meu irmão, minha namorada e meus amigos.

## RESUMO

O polipropileno é um dos materiais termoplásticos mais utilizados na indústria Brasileira, com diversas aplicações como embalagens, conexões, mangueiras e cadeiras, podendo ser utilizado para fabricação de componentes críticos em sistemas. O estudo do comportamento do polipropileno quando exposto à fadiga é de grande importância prática, uma vez que essa é uma das maiores causas de falhas de componentes, e ocorre em geral repentinamente. Observa-se que são poucas as informações sobre as propriedades dos materiais injetados em moldes de resina que garantam o uso das mesmas no desenvolvimento de novos produtos ou na produção de pequenos lotes de protótipos. Portanto, com o intuito de melhor entender os efeitos de solicitações cíclicas em peças fabricadas desse material, o presente trabalho visa avaliar a influência da utilização de três diferentes raios no projeto de uma peça em L e comparar com um modelo com “canto vivo”, através de simulações computacionais. Primeiramente, corpos de prova são fabricados e ensaiados via ensaio de tração, seguindo a norma ASTM D-638, afim de obter-se o comportamento mecânico do material e, então comparados com dados da literatura. Após, faz-se necessário o estudo da estimativa teórica da curva de Wöhler para o material. Em seguida, realiza-se análises computacionais de fadiga via software Hyperworks. Finalmente, analisa-se o dano acumulado e a tensão máxima no corpo de prova do tipo L, através da modificação do raio de curvatura do mesmo, afim de verificar sua influência na resposta a fadiga do material. Observa-se que houve uma diminuição no dano acumulado e uma queda na tensão máxima após um intervalo de mais de 2500 ciclos de fadiga para a peça em L. Os resultados preliminares demonstram as potencialidades e limitações da utilização de metodologias computacionais para caracterização a fadiga de estrutura em material polimérico. Vale ainda ressaltar, que trabalhos futuros tentarão aplicar esta metodologia em estruturas mais complexas fim de avaliar o comportamento a fadiga das mesmas.

**Palavras-chave:** Polipropileno, Fadiga, Análise via Elementos Finitos, Curva de Wöhler.

## ABSTRACT

The Polypropylene is one of the most used thermoplastic in the Brazilian industry, it is used in a wide range of final products, varying from packages, connections to hoses and plastic chairs, it can also be used in critical components. The study of the behavior of polypropylene when exposed to fatigue is of extreme value on a practical point of view, since fatigue is one of the major causes of component failure and it is, in general, abrupt. In general, there are not much information regarding the properties of materials used in injection molding that guarantee its usability when developing new products or when manufacturing small batches of prototypes. Therefore, in order to better understand the effects of cyclical stresses in components made of polypropylene, this study aims to evaluate the influence of three different radiuses used in the project of a simple “L” shaped piece and compare the results with a “L” without such radiuses, through computational simulations. At first, test specimens are manufactured and tested following the standard test method ASTM D-638, in order to obtain the material’s mechanical properties, the results are then compared with the literature. The theoretical Wöhler curve for the material is necessary and therefore calculated, followed by the fatigue simulations using the Hyperworks software. The analyzed variables through simulations are accumulated damage and maximum stress, aiming to verify the radius influence on the fatigue life of the material. After more than 2500 fatigue cycles, a decrease in both the accumulated damage and maximum stress is perceived. The preliminary results show the potentials and limitations in using computational methodologies for fatigue analysis in polymeric materials. It is worth mentioning that future studies will try to apply the same methodology in more complex structures.

**Keywords:** Polypropylene, Fatigue, Finite Element Analysis, Wöhler Curve.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Resumo da cadeia produtiva no Brasil.....	20
<b>Figura 2</b> – Cadeia de moléculas do Polietileno .....	23
<b>Figura 3</b> – Reação química na origem do PP .....	26
<b>Figura 4</b> – Representação de uma máquina de ensaios universal.....	29
<b>Figura 5</b> – Curva Tensão x Deformação para diferentes misturas de PP e PE .....	30
<b>Figura 6</b> – Curva tensão x deformação para misturas de PP e PE injetados a 200 C.....	30
<b>Figura 7</b> – Curvas típicas Tensão × Deformação para polímeros .....	31
<b>Figura 8</b> – Vida a fadiga para alguns tipos de polímeros.....	32
<b>Figura 9</b> – Curva de Wöhler para Poliestireno .....	33
<b>Figura 10</b> – Malha de elementos finitos aplicada à um componente.....	34
<b>Figura 11</b> – Fluxograma das fases do trabalho.....	37
<b>Figura 12</b> – Máquina Injetora Battenfeld Plus 250.....	39
<b>Figura 13</b> – Corpo de prova injetado vista frontal.....	40
<b>Figura 14</b> – Corpo de prova injetado vista traseira.....	40
<b>Figura 15</b> – CDP conforme ASTM D 638 .....	41
<b>Figura 16</b> – Máquina de ensaios universal.....	42
<b>Figura 17</b> – Corpos de prova classificados .....	43
<b>Figura 18</b> – Efeitos dos fatores de correção na curva S-N.....	45
<b>Figura 19</b> – Critérios de Goodman e Gerber.....	45
<b>Figura 20</b> – Entradas e Saídas do processo de análise Hyperworks .....	47
<b>Figura 21</b> – Procedimento para entrada de dados Hyperworks.....	48
<b>Figura 22</b> – Procedimento padrão de análise de elementos finitos.....	49
<b>Figura 23</b> – Curvas Tensão x Deformação obtidas.....	51
<b>Figura 24</b> – Comportamento do CDP D .....	53
<b>Figura 25</b> – Curvas S-N para alguns polímeros.....	54
<b>Figura 26</b> – Curva de Wöhler Teórica para o PP H301 .....	54
<b>Figura 27</b> – Geometria de referência em L .....	56
<b>Figura 28</b> – Procedimento de refinamento da malha .....	57
<b>Figura 29</b> – Malhas 3D da peça em L.....	57
<b>Figura 30</b> – Peça em L com pressão aplicada .....	58
<b>Figura 31</b> – CDP em L sem raio: (a) tensão máxima e (b) dano acumulado. ....	59

<b>Figura 32</b> – CDP em L com raio de 2,5mm: (a) tensão máxima e (b) dano acumulado .....	60
<b>Figura 33</b> – CDP em L com raio de 5mm: (a) tensão máxima e (b) dano acumulado .....	61
<b>Figura 34</b> – CDP em L com raio de 7mm: (a) tensão máxima e (b) dano acumulado .....	61
<b>Figura 35</b> – Geometrias simuladas, sem raio (superior esquerda), raio de 2,5mm (superior direita), raio de 5mm (inferior esquerda), raio de 7mm (inferior direita) .....	62
<b>Figura 36</b> – Análise das tensões máximas e dano acumulado para os diferentes raios de curvatura do CDP.....	62



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Classificação de Polímeros.....	24
<b>Tabela 2</b> – Breve histórico dos materiais poliméricos .....	25
<b>Tabela 3</b> – Propriedades típicas de alguns polímeros industriais .....	27
<b>Tabela 4</b> – Folha de dados Braskem - Polipropileno H301 .....	38
<b>Tabela 5</b> – Parâmetros da Injeção .....	39
<b>Tabela 6</b> – Relação entre cotas da norma e média dos CDPs.....	41
<b>Tabela 7</b> – Análises realizadas <i>versus</i> parâmetros modificados.....	50
<b>Tabela 8</b> – Propriedades do material.....	52
<b>Tabela 9</b> – Propriedades do material utilizados na simulação computacional. ....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	19
1.2 OBJETIVOS .....	20
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>23</b>
2.1 POLÍMEROS.....	23
2.2 PROPRIEDADES DO POLIPROPILENO (PP).....	25
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS E VISCOELASTICIDADE .....	28
2.4 FADIGA EM POLÍMEROS .....	31
2.5 ELEMENTOS FINITOS.....	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
3.1 METODOLOGIA UTILIZADA .....	37
3.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	38
3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL .....	42
3.4 CURVA DE WÖHLER .....	43
3.5 MODELO COMPUTACIONAL.....	47
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES .....	51
4.2 CURVA DE WÖHLER .....	53
4.3 ANÁLISE COMPUTACIONAL ESTRUTURA EM “L” .....	55
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	64
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O avanço tecnológico no setor industrial vem ocorrendo de uma forma muito rápida com o passar dos tempos. Diante desta evolução as empresas estão sempre buscando novas ideias para atender as necessidades exigidas pela demanda, oferecendo produtos com maior qualidade (ARAÚJO, 2010). Para acompanhar essa evolução, é necessário o estudo de metodologias que apresentem novas alternativas no desenvolvimento de produtos, na busca pela redução de custos, melhoria da qualidade, redução do prazo de produção e outros fatores que são fundamentais para a sobrevivência das empresas (ARAÚJO, 2010).

O Polipropileno (PP) é um material de vasta aplicação industrial, sendo a resina termoplástica mais consumida no Brasil, com cerca de 21,9% do mercado, segundo dados da Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2016). Esse fato torna o estudo de seu comportamento mecânico uma tarefa importante, uma vez que o material é empregado em diversas áreas que exigem confiabilidade e segurança estrutural. Como exemplos de aplicações é possível citar desde cadeiras de estádios de futebol, caixas de bateria para automóveis até tanques de expansão para o sistema de arrefecimento de caminhões.

Desenvolvido em meados dos anos 50, o polipropileno teve rápida adoção em atividades industriais, sendo muito utilizado para fibras, filmes e injeção de polímeros. Durante os anos 70 a produção foi tamanha que o material se tornou disponível em preços muito baixos, o que garantiu uma adoção ainda maior no campo fabril (BRYDSON, 1999).

Devido a sua ampla utilização, o conhecimento das propriedades do PP e, suas possíveis variações causadas por mudanças estruturais nos produtos que a utilizam é de suma importância para questões industriais. O estudo do comportamento à fadiga é de particular interesse, dadas as características deste tipo de falha e a presença constante nas aplicações práticas. Portanto, a falha por fadiga ocorre quando o material é submetido a uma carga dinâmica durante um período, e rompe a uma tensão inferior ao limite de resistência. É uma falha catastrófica que ocorre geralmente sem sinais evidentes. Nos materiais poliméricos além da influência das tensões médias, a frequência do carregamento tem forte influência no comportamento em fadiga.

A Figura 1 apresenta o resumo da cadeia produtiva do plástico no Brasil, com ênfase nas principais resinas consumidas.



- Verificar as potencialidades e limitações das análises computacionais sob condições de carregamentos cíclicos.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A organização deste texto foi planejada de tal forma que a filosofia do processo de análise de fadiga, aplicado ao problema da avaliação do comportamento dinâmico da estrutura fosse apresentada como a base da metodologia desenvolvida. Sendo assim, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução, Motivação e Objetivos:** No capítulo inicial, primeiramente apresentou-se um breve histórico da evolução do Polipropileno e sua importância na indústria brasileira. Além disso, os objetivos principais do trabalho são mostrados de forma sucinta.
- **Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica:** Neste capítulo é apresentado ao leitor uma visão geral dos tópicos mais importantes para o bom entendimento do trabalho, dentre eles destaca-se: Propriedades do Polipropileno, efeitos da viscoelasticidade e das propriedades mecânicas, o fenômeno da fadiga em polímeros, bem como um detalhamento teórico do método dos elementos finitos, utilizado na análise computacional durante o trabalho.
- **Capítulo 3 – Materiais e Métodos:** Com base na fundamentação teórica apresentada no capítulo 2, nessa etapa é tratado dos processos e métodos utilizados na execução do trabalho, com foco no modelo e análise computacional e na obtenção da curva de Wöhler teórica para o material. É apresentado também detalhes do processo de fabricação dos corpos de prova, além da metodologia para obtenção das propriedades mecânicas do material estudado.
- **Capítulo 4 – Resultados e Discussões:** No capítulo 4 são apresentados os dados referentes aos ensaios mecânicos realizados, caracterizando o material de acordo com a norma ASTM D-638, além da obtenção da curva de Wöhler do material. Ainda, os resultados dos estudos computacionais e os efeitos da adição de um raio no local concentrador de tensões em uma peça em L são apresentados.
- **Capítulo 5 – Conclusões e Perspectivas para Trabalhos Futuros:** Nessa etapa as conclusões e as discussões finais resultantes da análise dos dados apresentados no

capítulo anterior são apresentadas, além disso algumas hipóteses para trabalhos futuros com o intuito de aprofundamento no tema são apontadas.

▣ **Capítulo 6 – Referências Bibliográficas:** No capítulo final todos os recursos bibliográficos utilizados para a pesquisa e embasamento teórico para a realização do trabalho são apresentados.

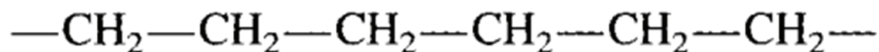
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 POLÍMEROS

Polímero pode ser definido, de maneira geral, como um apanhado de um número muito grande de moléculas, dando origem às chamadas macromoléculas, sendo obtidos através de reações de polimerização de compostos simples denominados “monômeros”. Ainda, vale ressaltar que uma unidade repetida pode ser chamada de mero, tendo origem na palavra grega meros, que por sua vez significa parte. O termo polímero foi criado para significar “muitos meros” (CALLISTER, 2013).

Cada molécula possui átomos ligados entre si através de ligações interatômicas covalentes que se repetem formando entidades estruturais chamadas de unidades repetidas. Para a maioria dos casos envolvendo termoplásticos existe apenas uma unidade repetidora (CALLISTER, 2013). Tomando como exemplo o polietileno temos uma longa cadeia de moléculas de CH<sub>2</sub> se repetindo, conforme esquema apresentado na Figura 2 (BRYDSON, 1999).

**Figura 2** – Cadeia de moléculas do Polietileno



Fonte: BRYDSON, 1999.

Os polímeros podem ser divididos em dois grandes grupos de acordo com a sua resposta à aplicação de forças mecânicas em temperaturas elevadas, fato que está intrinsecamente relacionado com a sua estrutura molecular. De um lado os termoplásticos, polímeros que amolecem, chegando ao ponto de se liquefazerem quando aquecidos e que, dada reação reversa de resfriamento, se endurecem. De outro lado os termofixos, que se tornam irreversivelmente duros durante a sua formação, impedindo a reutilização após aquecimento subsequente, uma vez que sua estrutura química é alterada. Os termofixos possuem como característica principal a sua configuração em rede, possuindo ligações cruzadas covalentes. O poliestireno e borrachas vulcanizadas são exemplos de termoplásticos e termofixos, respectivamente (CALLISTER, 2013).

Maiores graus de polimerização asseguram melhores propriedades físicas do produto e, por isso, o objetivo da produção de polímeros para materiais plásticos será, em geral, o de obter

os chamados alto polímeros. Nos polímeros, o valor de “ $n$ ”, definido como o grau de polimerização, normalmente é superior a 10.000. Ou seja, uma molécula de polietileno é constituída da repetição de 10.000 ou mais unidades de etileno (KANTOVISCKI, 2011).

Com o desenvolvimento da indústria dos polímeros, muitos produtos normalmente eram produzidos com materiais convencionais, hoje são substituídos por diversos tipos de plásticos que, devido à sua versatilidade, menor peso, maior facilidade de manuseamento, menores custos de produção, entre outros aspectos, cumprem de forma mais eficaz os requisitos pretendidos para os produtos. Os materiais poliméricos são utilizados em inúmeras frentes, tanto no âmbito civil quanto no industrial. Com o crescimento de sua utilização, impulsionado por características de grande interesse para a engenharia, tais como, módulo de elasticidade na temperatura ambiente, baixas densidade quando comparado com metais, alta razão de resistências mecânica por unidade de massa, boa resistência ao impacto, não sendo afetado pela corrosão. Além disso, podemos destacar sua facilidade de fabricação e processamento, bom isolamento elétrico e térmico e baixo custo de acabamento, entre outras (CÁRDENAS OLIVER, 2007; MANO, 1991; ANDERSON, 1995).

Também é interessante destacar que quando um polímero é composto de apenas um tipo de mero, esse leva o nome de homopolímero. No caso de haver mais de um mero compondo a cadeia, chama-se copolímero (MANO; MENDES, 1999). A Tabela 1 apresenta a classificação dos polímeros de acordo com alguns critérios básicos.

**Tabela 1** – Classificação de Polímeros

<b>Critério</b>	<b>Classe do polímero</b>
Origem do polímero	Natural Sintético
Número de Monômeros	Homopolímero Copolímero
Método de preparação do polímero	Polímero de adição Polímero de condensação Modificação de outro polímero
Estrutura química da cadeia polimérica	Poli-hidrocarboneto Poliamida Poliéster
Fusibilidade e/ou solubilidade do polímero	Termoplástico Termorrígido
Comportamento mecânico do polímero	Borracha ou elastômero Plástico Fibra

Fonte: Adaptado de MANO; MENDES, 1999.



Pode-se considerar a história dos polímeros sintético bastante recente, principalmente se comparada com a dos materiais tradicionais como metais e cerâmicas. A Tabela 2 apresenta um breve histórico dos principais materiais poliméricos.

**Tabela 2** – Breve histórico dos materiais poliméricos

<b>Ano</b>	<b>Polímero</b>
1862	Nitrato de Celulose - Parkesina
1870	Acetato de Celulose - Celulóide (CA)
1907	Fenol-Formaldeído - Baquelite (PF)
1930	Silicone (SI)
1932	Acrílico (PMMA)
1933	Poliestireno (PS)
1935	Náilon (PA)
1939	Polietileno (PE)
1940	Policloreto de Vinila (PVC)
1946	Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)
1948	Poli Tetra Fluoretileno (PTFE)
1958	Policarbonato (PC)
<b>1959</b>	<b>Polipropileno (PP)</b>
1960	Polioximetileno ou Poliacetal (POM)
1964	Polioxifenileno (PPO)
1965	Outros Plásticos de Engenharia: PET, Blendas (PC/ABS, PU/PVC, PA/PPO, PP/EPDM, etc.)
Plásticos especiais	PPS, PI, PKI, PEEK, PAI, PEUHMW, etc...

Fonte: Adaptado de KANTOVISCKI, 2011.

## 2.2 PROPRIEDADES DO POLIPROPILENO (PP)

O material polimérico de interesse deste estudo é o Polipropileno (PP), desenvolvido após o trabalho de G. Natta (1954), que por sua vez aprimorou estudos iniciais que descobriram catalisadores do tipo “Ziegler”, capazes de produzir polímeros de grande peso molecular através do Propileno e muitas outras Olefinas, de autoria do alemão K. Ziegler (BRYDSON, 1999).

Duas características importantes do Polipropileno que podem ser destacadas são: pouca ou nenhuma insaturação e ponto de fusão em média 50° C maior do que o encontrado em polietilenos. Quanto a taticidade da cadeia polimérica, afirma-se que em média, 90 – 95% dos polímeros comerciais são isotáticos (BRYDSON, 1999).

Segundo Harper (2000) o PP é um polímero muito versátil utilizado nos processos de extrusão e moldagem por injeção. O PP é obtido através de reações de polimerização, onde produtos simples, chamados de monômeros, reagem entre si, combinando suas moléculas e formando moléculas maiores, caracterizadas pela repetição de uma unidade básica. O monômero para o PP é o propeno, também conhecido por propileno, um hidrocarboneto insaturado de fórmula  $C_3H_6$ , derivado de produtos de origem do petróleo, sendo este sintetizado pela polimerização de propileno através da reação mostrada na Figura 3.

**Figura 3** – Reação química na origem do PP



Fonte: HARPER, 2000.

O Polipropileno (PP) é um termoplástico, semi-cristalino, pertencentes ao grupo das poleolefinas. Muitos são os fatores que podem alterar suas propriedades, entre elas o grau de cristalinidade, a tenacidade e a massa molar. O PP é um material com forte resistência química e baixo peso específico, sendo que essa última característica tem influência direta nas propriedades térmicas e mecânicas do material. A dependência é em geral oposta ao observado em outros polímeros, uma vez que apesar de um aumento no peso molecular estar diretamente ligado ao aumento na viscosidade de fusão e na resistência ao impacto, tal qual em outros polímeros, este aumento também ocasiona uma menor resistência ao escoamento, menor dureza, menor rigidez e menor ponto de amolecimento (BRYDSON, 1999).

Esse polímero semicristalino possui uma densidade de aproximadamente 0,90 até 0,91 g/cm<sup>3</sup>. Sua temperatura de transição vítrea encontra-se por volta de -18° C, enquanto a temperatura de fusão em torno de 165° C. De modo geral seu módulo de elasticidade está em torno de 1,14 a 1,55 GPa, resistência ao escoamento entre 31.0 e 41.4 MPa, enquanto o alongamento situa-se entre 100 e 600%. Suas características mecânicas são consideradas atrativas devido a sua alta cristalinidade, em torno de 60 a 70% (SANTOS, 2006).

O polipropileno pode ser classificado em três tipos: homopolímero, copolímero heterofásico e copolímero estatístico ou randômico. Cada um possuindo aplicações específicas. O polipropileno homopolímero (PP Homo) é um material que possui uma boa resistência em alta temperatura quando comparado com outros polímeros, podendo ser esterilizado. Sua boa

resistência química o torna ideal para aplicações com graus de criticidade elevados como caixas de baterias. Em comparação com o PEAD (Polietileno de alta densidade) possui uma densidade menor, maior ponto de amolecimento, rigidez e dureza superficial, por outro lado oferece menor resistência ao impacto e maior sensibilidade à oxidação. Utilizado principalmente na fabricação de autopeças, embalagens para alimentos, fibras e monofilamentos (ABIPLAST, 2014).

O polipropileno copolímero randômico é obtido pela adição de eteno ao propeno. O produto é um pouco mais resistente ao impacto que o homopolímero e apresenta melhores propriedades óticas.

Já o polipropileno copolímero heterofásico (PP Copo) é um material mais transparente, flexível e resistente (exceto quando analisado a resistência química) que o homopolímero. É fabricado em duas etapas de polimerização. O homopolímero é produzido em uma primeira etapa. Na segunda etapa é realizada a copolimerização do propeno com eteno. A proporção de eteno é bem mais elevada do que na produção do copolímero randômico. Pode ser modificado com elastômeros tornando-os mais resistentes ao impacto e possui uma resistência mecânica elevada quando a baixas temperaturas, aplicado em utilidades domésticas como frascos e embalagens em geral (ABIPLAST, 2014).

Algumas propriedades típicas de polímeros industriais e suas aplicações são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3** – Propriedades típicas de alguns polímeros industriais

Polímero	Propriedades Típicas					Aplicação Típica
	Transparência	Rigidez	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (MPa)	
LDPE	Translúcido	Dúctil	16	650	250	Sacos
<b>PP</b>	<b>Opaco</b>	<b>Rígido</b>	<b>55</b>	<b>160</b>	<b>1.210</b>	<b>Frascos</b>
PS	Transparente	Rígido	23	3	3.100	Utensílios
PMMA	Transparente	Rígido	31	6	3.000	Painéis
PC	Transparente	Rígido	47	80	2.500	Janelas
PA-6	Opaco	Rígido	39	250	2.500	Têxteis
NR	Translúcido	Elástico	16	800	70	Luvas

Fonte: Adaptado de MANO, 1999.

### 2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS E VISCOELASTICIDADE

Em geral os materiais poliméricos podem ser caracterizados utilizando os mesmos parâmetros empregados para metais, com interesse principal na definição do módulo de elasticidade, limites de escoamento e de resistência a tração (CALLISTER, 2013). É de extrema importância analisar as variações dos resultados da caracterização causadas pelas diferentes estruturas químicas, temperatura, tempo e história (condições) do polímero de interesse (CANEVAROLO, 2006).

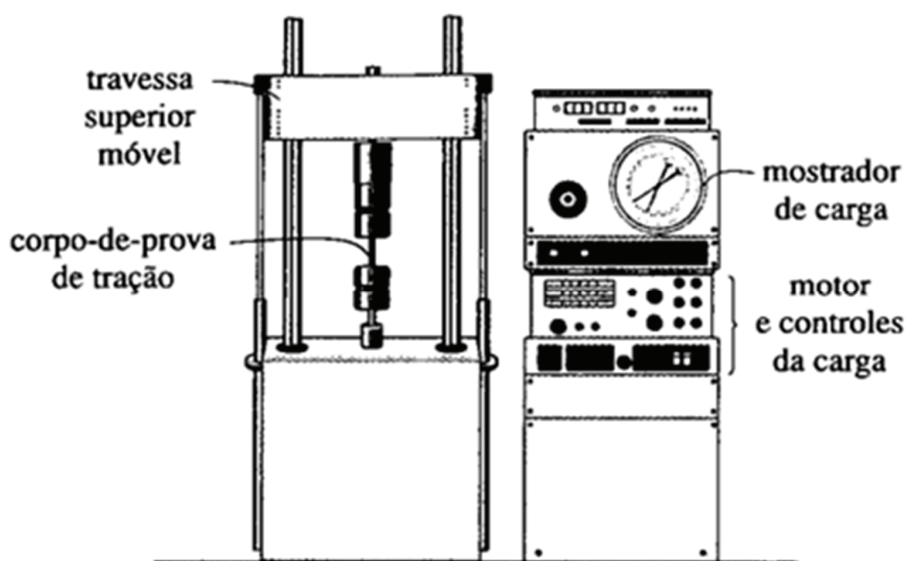
Um fenômeno de suma importância quando tratando de polímeros é a chamada viscoelasticidade, definida como uma característica interposta, na qual um polímero apresenta características tanto de um fluido quanto de um sólido elástico. O resultado final deste fenômeno é uma demora para responder à solicitação, gerando uma defasagem entre a solicitação e a resposta (CANEVAROLO, 2006).

Com o propósito de se determinar as propriedades de um material, uma das informações mais importantes neste sentido é a sua capacidade de suportar carga sem deformação excessiva ou ruptura. Esta propriedade pode ser determinada por um experimento, sendo que um dos mais importantes destes é o teste de tração. Várias informações importantes a respeito do comportamento mecânico do material estudado podem ser obtidas através do experimento citado, no entanto, na prática este é usado principalmente para determinar a relação entre a tensão normal média e a deformação normal média do material (HIBBELER, 2004).

Para realização do ensaio mecânico, um corpo de prova de acordo com a norma técnica correta deve ser confeccionado, com formato e tamanho padronizado. Existem diversas normas, variando de acordo com o material estudado. Duas marcas são feitas ao longo do comprimento do corpo de prova (CDP), longe das extremidades uma vez que a distribuição de tensão nesta região é complexa devido à fixação, Princípio de *Saint-Venant*, onde à medida que nos afastamos da força aplicada, o diagrama de tensões tende a ficar uniforme.

A área da seção transversal e o comprimento inicial entre as marcas feitas devem ser medidas antes da realização do teste. Uma máquina de teste universal (*universal testing machine*) é utilizada para estirar o CDP com uma taxa muito lenta (quasi-estática) e constante até que este venha a romper. A máquina deverá realizar a aquisição da carga e manter o estiramento uniforme. A Figura 4 apresenta uma representação esquemática do sistema (HIBBELER, 2004).

Figura 4 – Representação de uma máquina de ensaios universal



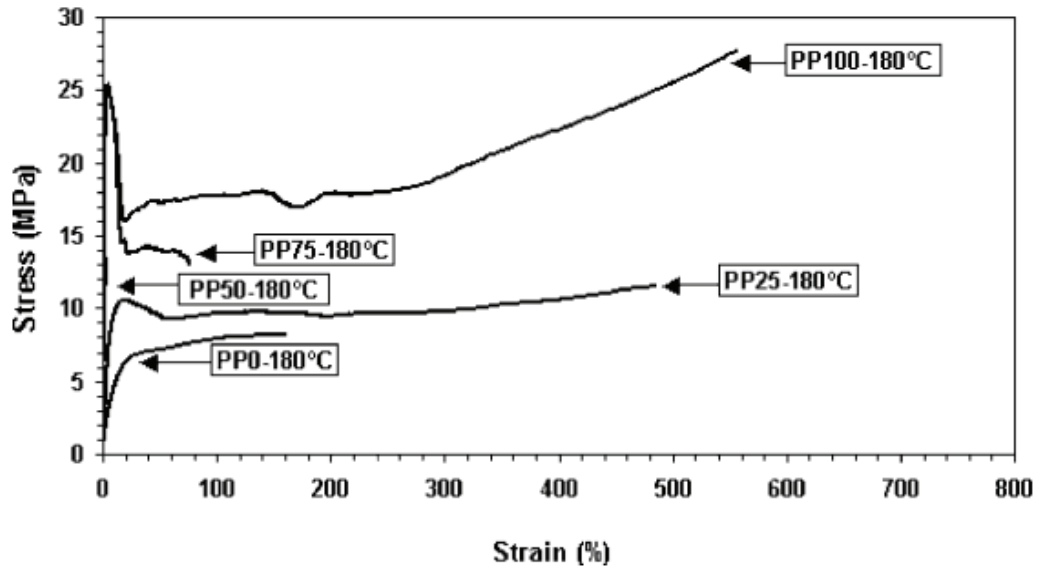
Fonte: HIBBELER, 2004.

Os dados da carga são registrados pela máquina de ensaios, enquanto o alongamento (diferença entre a distância das marcas feitas a priori e a distância atual) é captado através de um extensômetro (HIBBELER, 2004). Como resultado do ensaio tensão-deformação, destaca-se os seguintes parâmetros: módulo de Young (elasticidade); tensão e deformação no escoamento; tensão máxima; tensão e deformação na ruptura e tenacidade. As tensões são calculadas a partir da razão entre a carga e a área de seção transversal do corpo de prova. Quando utilizado a área de seção transversal medida inicialmente, obtém-se a tensão definida como nominal, enquanto quando utilizado a área instantânea no momento da medição da carga, obtém-se a tensão real.

A Figura 5 mostra as curvas tensão/deformação para diferentes misturas de polipropileno (PP) e polietileno (PE) injetados em uma temperatura de 180 °C (STRAPASSON *et al.*, 2005). As características mecânicas para a maioria dos polímeros são diretamente influenciadas por parâmetros como: taxa de deformação, temperatura do corpo de prova, temperatura de injeção, além de questões ligadas à composição química do ambiente de testes (CALLISTER, 2013).

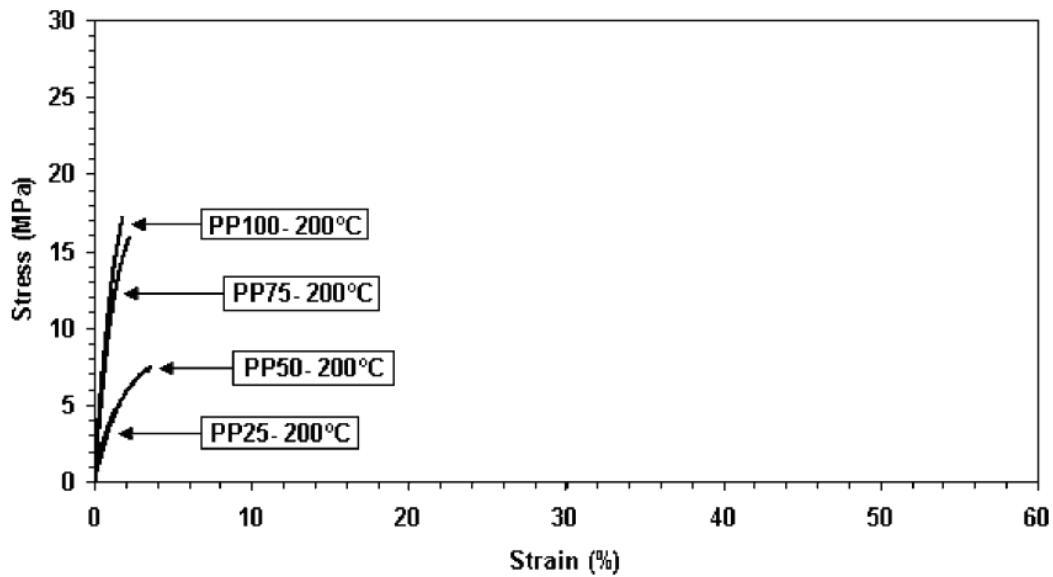
Quanto à temperatura de injeção, é possível verificar claramente através da Figura 6 a influência desse fator nas propriedades mecânicas das misturas poliméricas já observadas na Figura 5.

Figura 5 – Curva Tensão x Deformação para diferentes misturas de PP e PE



Fonte: STRAPASSON *et al.* (2005).

Figura 6 – Curva tensão x deformação para misturas de PP e PE injetados a 200 C.

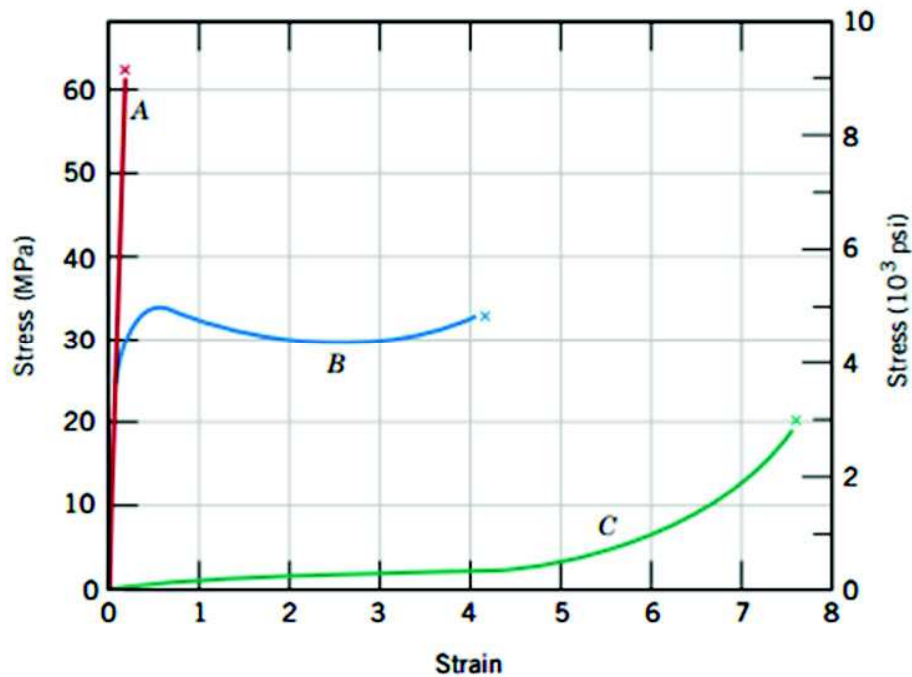


Fonte: Strapasson *et al.* (2005).

Em geral são encontradas três curvas Tensão-Deformação características dos polímeros. Conforme a Figura 7, na curva A é possível observar um comportamento típico de um polímero frágil cuja fratura ocorre enquanto o mesmo deforma-se elasticamente (CALLISTER, 2013). Para um material com características plásticas, denotado por B, ocorre um comportamento similar ao que pode ser encontrado em diversos metais, onde em um primeiro momento ocorre

uma deformação elástica, seguida pelo escoamento e então deformação plástica. Por fim, uma deformação totalmente elástica é denotada por C, este comportamento é típico da borracha, que faz parte de uma categoria de polímeros específica: os elastômeros (CALLISTER, 2013).

Figura 7 – Curvas típicas Tensão × Deformação para polímeros



Fonte: CALLISTER, 2007.

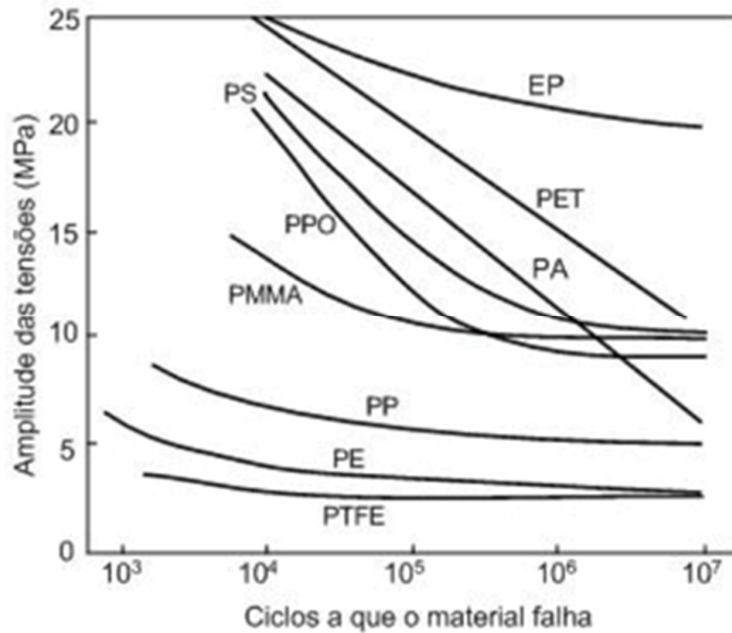
## 2.4 FADIGA EM POLÍMEROS

Segundo SOUZA (2011) a palavra “fadiga” é originária do latim “fatigare” e significa “cansaço”. Esse fenômeno pode ser definido como uma mudança nas propriedades do material que ocorre devido à aplicação de forças cíclicas (ou tensões), que podem levar a falha do material em serviço. Ainda, podemos destacar que a falha por fadiga pode ser atribuída a defeitos no material resultantes de condições inadequadas de processamento ou fabricação que levam a criação de defeitos internos e/ou superficiais.

Em razão das falhas devido a fadiga serem em geral repentinas e inesperadas, e dada a grande adoção de materiais poliméricos em aplicações de engenharia, fica evidente que o estudo destas propriedades nesses materiais é de grande importância prática. A Figura 8 mostra as curvas S-N para diversos materiais poliméricos. Verifica-se que para diversos materiais

poliméricos, há uma grande variação no seu comportamento à fadiga, ressaltando mais uma vez a importância do estudo dessa característica em cada material.

**Figura 8** – Vida a fadiga para alguns tipos de polímeros



Fonte: OLIVIER apud RIDDELL, 1974.

O método mais tradicional utilizado para o estudo do fenômeno da fadiga em polímeros é o do número de ciclos para falha ( $N$ ), em função da tensão ( $S$ ), daí o nome curvas S-N. Os ensaios mecânicos são realizados em uma tensão máxima da ordem de aproximadamente dois terços do limite estático de resistência à tração, enquanto o número de ciclos é contado até a ruptura. Esse procedimento é repetido para diversos corpos de prova com amplitudes máximas de tensão cada vez menores. Os dados são coletados e plotados com a tensão como variável dependente do logaritmo do número de ciclos ( $N$ ) até a falha, para cada corpo de prova (IMAMURA, 2010).

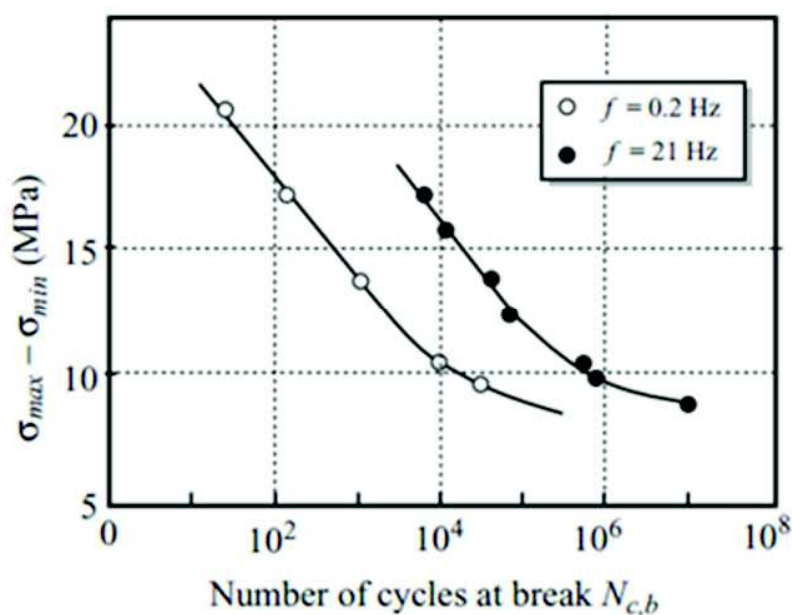
Após uma certa tensão aplicada a curva de falha por fadiga se torna quase horizontal para altos ciclos ( $N$ ), o nível de tensão no qual esse fenômeno ocorre é extremamente importante para o projeto de componentes, é chamado de limite de resistência à fadiga. Abaixo desse limite a falha por fadiga não irá ocorrer. Por outro lado, a chamada resistência à fadiga é definida como sendo a tensão específica na qual a falha ocorrerá dado um número de ciclos. Outro ponto de interesse em projetos é a chamada vida útil sob fadiga, esse é o número de ciclos necessários para causar a falha em um nível de tensão específico (IMAMURA, 2010).



A influência da temperatura sobre a vida dos polímeros é de extrema importância, portanto deve ser dada a devida atenção durante o ensaio de fadiga a fim de evitar frequências críticas onde os efeitos da temperatura se tornem prejudiciais, podendo levar à falha por derretimento térmico (WARD, SWEENEY, 2004). Ainda sobre o tópico do auto aquecimento dos corpos de prova, pesquisas sugerem que deve ser adotado uma frequência de ensaio que varia de 0,1Hz até no máximo algumas dezenas, a fim de evitar o aumento da temperatura interna do CDP, vindo a influenciar no resultado dos ensaios (HALARY, LAUPRÊTRE, MONNERIE, 2011).

A curva de Wöhler obtida pelo ensaio de fadiga tem sua forma independente do material estudado, seja ele polimérico ou metálico. Pode-se observar na Figura 9 uma curva característica obtida para o material PS (Poliestireno) em ensaios de fadiga realizados à temperatura ambiente (HALARY, LAUPRÊTRE, MONNERIE, 2011).

Figura 9 – Curva de Wöhler para Poliestireno



Fonte: HALARY, LAUPRÊTRE, MONNERIE, 2011.

Dois pontos interessantes podem ser destacados através da análise da Figura 9. Na parte inicial do gráfico, verifica-se que, com uma tensão alta, há uma relação inversamente proporcional entre o número de ciclos antes da fratura e a tensão aplicada, ou seja, a vida aumenta com o decréscimo da tensão. Já se tratando de uma tensão mais baixa, verifica-se a existência do limite de resistência à fadiga, onde a partir desse ponto não haverá mais dano

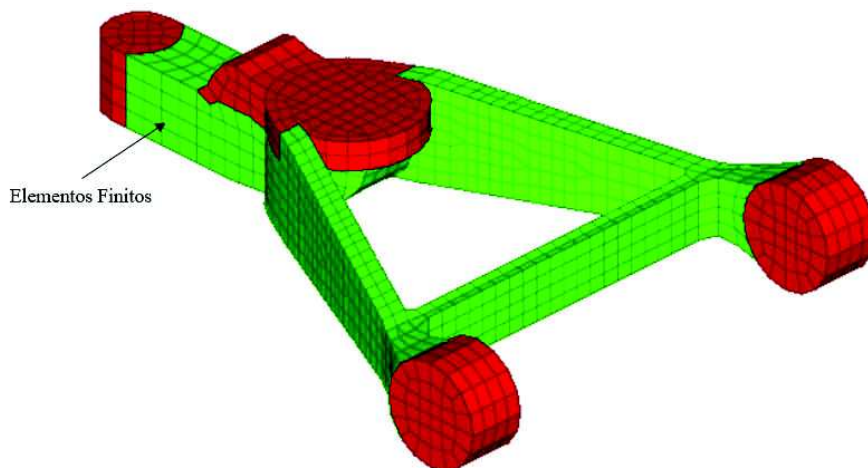
causado pela fadiga no material. Para o poliestireno endurecido retratado na figura acima, esse ponto está por volta de 7 MPa. Verifica-se também que com o aumento da frequência de teste, 21 Hz no segundo momento, há uma queda acentuada na duração da carga até a fratura. Este fenômeno pode ser explicado pelo aquecimento do corpo de prova em frequências mais elevadas (HALARY, LAUPRÊTRE, MONNERIE, 2011).

## 2.5 ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é uma técnica computacional utilizada para aproximar soluções de problemas de valor de contorno na engenharia. Dependendo do problema analisado as variáveis podem incluir deslocamento, temperatura, fluxo de calor, velocidade, entre outros (HUTTON, 2003).

Em resumo o método consiste em dividir o domínio do problema em sub-regiões compostas de geometrias simples como triângulos, quadrados, cubos, etc. Essa ideia é amplamente difundida na engenharia e consiste em dividir um problema complexo em uma série de problemas simplificados. A Figura 10 mostra um braço de suspensão com uma malha de elementos finitos aplicada (SOUZA, 2003).

**Figura 10** – Malha de elementos finitos aplicada à um componente



Fonte: O próprio autor, modelo disponibilizado nos manuais do software Hyperworks.

Como as sub-regiões criadas no componente em estudo possuem dimensões finitas, essas são chamadas de “elementos finitos”, em contraponto com os elementos infinitesimais do

cálculo diferencial e integral. Então resulta-se o nome de “Método dos Elementos Finitos”, esclarecido por Ray Clough (SOUZA, 2003).

O conjunto de elementos finitos representados em uma estrutura física é chamado de malha de elementos. Se a função de interpolação satisfaz determinados requisitos matemáticos a solução por elementos finitos converge para a solução exata do problema (HUTTON, 2003).

O campo de aplicação do método dos elementos finitos é muito amplo, já no final dos anos 60 passou a ser utilizado para simulação em fluidos, termomecânica e eletromagnetismo. Hoje é utilizado para solucionar problemas complexos nos diversos campos da engenharia civil, mecânica, nuclear, biomédica, geo-mecânica, termodinâmica, entre outros (CAMPOS, 2005).

Ao resolver problemas através do método dos elementos finitos, uma solução discreta é assumida, isto é, a solução deve pertencer a um espaço de funções construído pelos valores da função variando em uma dada maneira entre os pontos nodais. Pontos nodais, ou nós, são pontos típicos dos elementos, podendo ser os vértices, os pontos médios dos lados, pontos médios do elemento, entre outros. Esse fato faz com que a solução esteja fortemente ligada à representação geométrica do domínio (CAMPOS, 2005).

Algumas etapas são comuns para qualquer tipo de problema analisado através do método, estas etapas estão presentes em todos os softwares comerciais que se propõem a utilizar elementos finitos para solução de problemas e análises (HUTTON, 2003). As etapas mais comuns estão listadas abaixo.

- **Pré-processamento:** É a parte fundamental da análise, compreende definições básicas sobre o modelo estudado como: geometria, tipos de elementos finitos utilizados, propriedades dos materiais, conectividade dos elementos, restrições físicas, cargas aplicadas, entre outros (HUTTON, 2003).
- **Solução:** Consiste na derivação das equações que governam o problema, cálculo dos valores de contorno, substituições e solução propriamente dita. Um problema resolvido através de elementos finitos pode conter dezenas de milhares de equações dependendo da complexidade do sistema, ressaltando-se assim a importância de cálculos computacionais no processo (HUTTON, 2003).
- **Pós-processamento:** Análise e avaliação dos resultados obtidos na etapa de solução. *Softwares* de análise podem trazer diversas informações importantes para o engenheiro, como por exemplo: classificar elementos por ordem de magnitude, verificar equilíbrios, calcular fatores de segurança, entre outros (HUTTON, 2003).

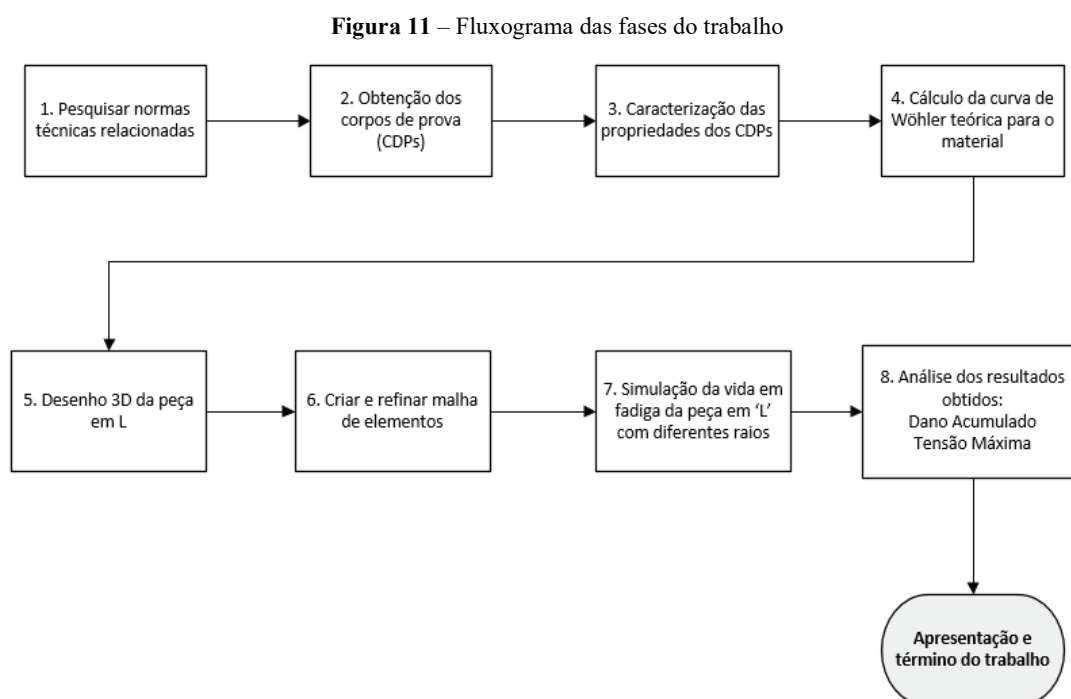
A utilização de análises e otimizações, através de elementos finitos em projetos de engenharia é de extrema importância para o desenvolvimento de novos e melhores produtos, essa metodologia vem sendo utilizada para obtenção de produtos com design aprimorado e com melhores características mecânicas, dada as consequentes melhorias de projeto devido a uma inversão no processo tradicional de desenvolvimento (ALTAIR, 2013).

Uma vez que a análise é realizada antes processo construtivo, inúmeras falhas podem ser detectadas antes da alocação de recursos para a construção de ferramentas e/ou modelos do produto final, esse encurtamento do loop de aprimoramento dentro do processo de desenvolvimento de produtos traz grandes vantagens do ponto de vista financeiro. Essa modificação no processo por si só justificaria a utilização de análises de elementos finitos em aplicações industriais.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 METODOLOGIA UTILIZADA

Para melhor visualização dos processos e etapas envolvidas no desenvolvimento desse trabalho, foi elaborado um fluxograma com as fases do estudo, conforme a Figura 11.



Fonte: O próprio autor.

Conforme disposto, na primeira etapa do trabalho (1), as normas técnicas relacionadas a ensaios mecânicos com polímeros foram pesquisadas e selecionadas, com destaque especial a norma ASTM D-638 que guiou grande parte do trabalho. Já na segunda fase (2), os corpos de prova foram obtidos com auxílio conjunto do laboratório de polímeros da UDESC e de uma empresa da cidade de Joinville. A terceira parte (3), caracterização das propriedades, foi realizada no Laboratório de Desenvolvimento de Produtos (LADEP) da UDESC. Na quarta etapa (4), a curva de Wöhler para o material foi calculada através da metodologia tradicional, utilizando dados obtidos experimentalmente em (3), em paralelo com informações da literatura. O passo seguinte (5), tratou-se do desenho 3D da peça em L que foi estudada, enquanto a sexta etapa (6) teve como foco a criação e refino da malha de elementos finitos. Já a simulação

computacional, sétima fase do estudo (7), foi realizada utilizando o software Hyperworks 2017® da empresa Altair. Na oitava e última fase do estudo (8), os dados obtidos através das simulações foram sintetizados e analisados, buscando entender o comportamento e os efeitos da variação da geometria da peça no que tange a vida em fadiga e as tensões máximas presentes no modelo. Por fim, os resultados obtidos nas fases anteriores foram compilados e uma conclusão foi obtida. Todas as etapas supracitadas serão discorridas detalhadamente no texto que segue.

### 3.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a obtenção dos corpos de prova (CDPs) para ensaio, foi utilizado o material Polipropileno H301 comercializado e produzido pela empresa Braskem. A matéria prima foi fornecida por uma empresa do ramo de autopeças para caminhões, com sede em Joinville. Segundo o fabricante do material (Braskem), o mesmo possui as características apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4** – Folha de dados Braskem - Polipropileno H301

<b>Propriedades Típicas</b>			
	Método ASTM	Unidades	Valores
Densidade	D 792	g/cm <sup>3</sup>	0,905
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	1350
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	MPa	34
Alongamento no Escoamento	D 638	%	11
Dureza Rockwell (Escala R)	D 785	-	98
Resistência ao Impacto Izod a 23 °C	D 256	J/m	25
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 Mpa	D 648	°C	103
Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 MPa	D 648	°C	53
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10N	D 1525	°C	153

Fonte: Braskem.

É importante frisar que nesse trabalho seguiu-se às mesmas normas técnicas utilizadas pela empresa fabricante do material para a caracterização das propriedades mecânicas, ou seja, a norma ASTM D-638. Os corpos de prova foram obtidos através do processo de injeção

plástica com auxílio do laboratório de polímeros da UDESC, utilizando uma máquina injetora da marca Battenfeld modelo Plus 250, que conta com capacidade de 25 toneladas de força de fechamento. A máquina pode ser vista na Figura 12.

**Figura 12** – Máquina Injetora Battenfeld Plus 250



Fonte: O próprio autor.

O processo de injeção obedeceu aos parâmetros usuais para o material Polipropileno, enquanto a temperatura de injeção foi a mesma utilizada pelo processo fabril da empresa que forneceu a matéria prima. O agregado geral de parâmetros utilizados está disposto na Tabela 5.

**Tabela 5** – Parâmetros da Injeção

<b>Parâmetro do Processo</b>	<b>Valor Utilizado</b>
Tempo de Injeção	1,5 segundos
Pressão de Injeção	53 MPa
Pressão de Recalque	32 MPa
Tempo de Recalque	12 segundos
Tempo de Resfriamento	25 segundos

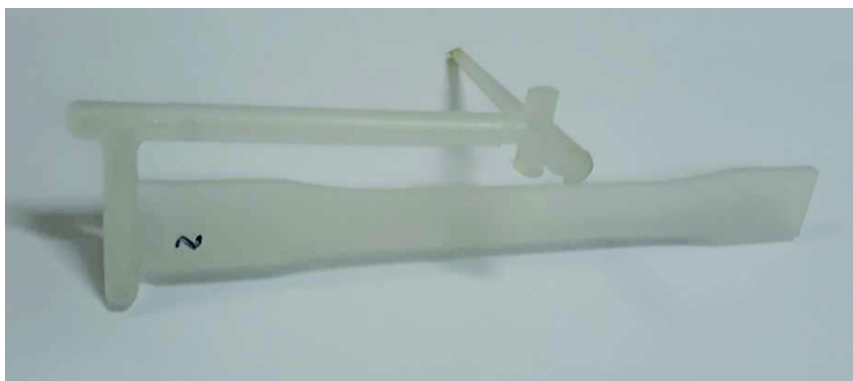
Fonte: O próprio autor.

Neste processo de fabricação, o polímero é depositado através de um funil de alimentação e redirecionado para um cilindro que contém uma rosca, essa carrega o material

para a parte frontal, girando e atuando como um parafuso sem fim. O cilindro contém resistências na parte externa, fazendo com que a matéria prima se funda no interior do mesmo. Conforme a rosca (fuso) gira, cria um espaço à frente para que o polímero seja depositado. A rosca também atua no sentido de homogeneizar o material através do cisalhamento promovido, contribuindo para a plastificação. Após a homogeneização da quantidade necessária de polímero, a rosca passa a atuar como um pistão, fazendo o movimento de injeção da massa fundida para dentro do molde, que por sua vez ocupa todos os espaços vazios lá existentes. Após o tempo de injeção ocorre também o chamado empacotamento, onde a rosca continua a exercer pressão sobre o injetado. Terminado o tempo de empacotamento e resfriada a peça, o molde se abre e o ciclo recomeça (MANRICH, 2005).

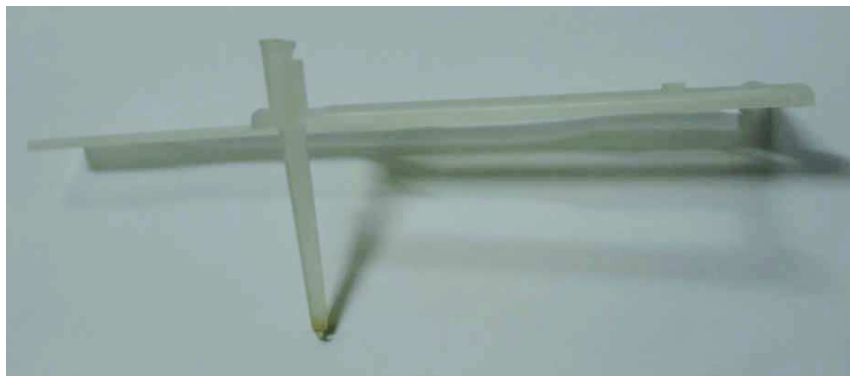
Foram gerados seis corpos de prova nas condições apresentadas na tabela 5, destinados aos ensaios de tração. É possível visualizar um corpo de prova tal qual injeção nas Figuras 13 e 14.

**Figura 13** – Corpo de prova injetado vista frontal



Fonte: O próprio autor.

**Figura 14** – Corpo de prova injetado vista traseira

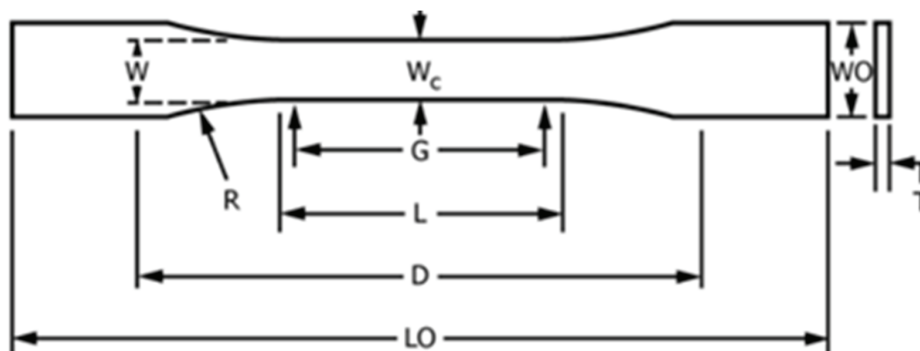


Fonte: O próprio autor.



Os espécimes foram confeccionados conforme a norma ASTM D-638. Seguindo essa norma, optou-se por utilizar os corpos de prova conforme a Figura 15. Verifica-se que todas as dimensões do corpo de prova estão diretamente relacionadas com a espessura (T) do espécime.

Figura 15 – CDP conforme ASTM D 638



Fonte: ASTM D-638.

A norma especifica os valores para as dimensões de acordo com a espessura (T) do corpo de prova, para efeitos de comparação, os dados agregados dos CDPs e da norma foram relacionados conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Relação entre cotas da norma e média dos CDPs

Cota	ASTM D-638 [mm]	Média dos CDPs [mm]	Desvio Padrão dos CDPs [mm]
T – Espessura	7 ou menos	3,33	0,03
Wc – Largura seção estreita	13 ± 0,5	13,38	0,06
LO – Comprimento geral	165	165,00	0,06

Fonte: O próprio autor, ASTM D-638.

Verifica-se que os corpos de prova possuem suas dimensões de acordo com o especificado pela norma, para espécimes com espessura (T) menor ou igual a 7 milímetros. As medições foram realizadas utilizando-se um paquímetro analógico da marca Mitutoyo de resolução igual a 0,05 mm.

### 3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

Para a determinação das propriedades mecânicas do material, ensaios de Tração/Deformação foram realizados no laboratório LADEP da UDESC. Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina de ensaios universais da marca Oswaldo Filizola modelo AME-5kN com célula de carga de 500kgf (5kN) conforme a Figura 16. Um extensômetro da marca Oswaldo Filizola com abertura de 25mm auxiliou na aquisição dos dados experimentais.

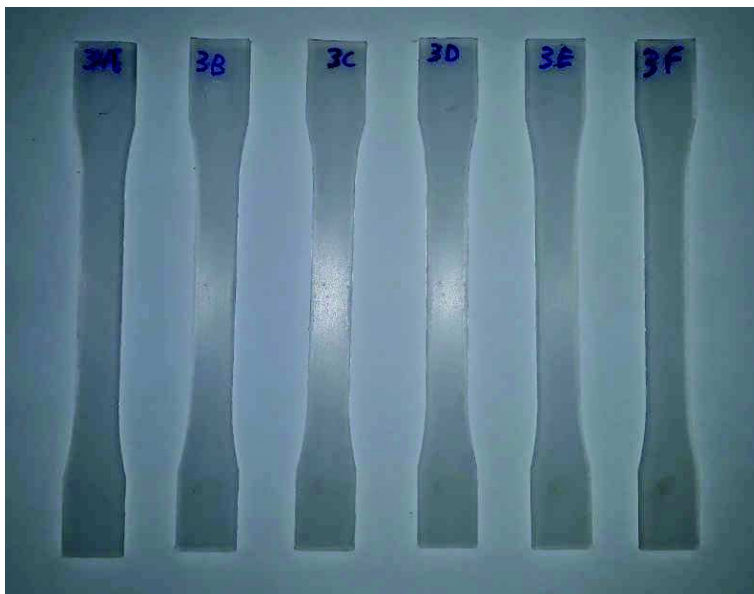
**Figura 16** – Máquina de ensaios universal



Fonte: O próprio autor.

Anteriormente aos ensaios, os corpos de prova foram identificados alfabeticamente para facilitar a organização dos dados obtidos através dos ensaios, a Figura 17 mostra a forma utilizada. O número 3 em frente às marcações alfabéticas se refere ao processo de injeção, por dificuldades iniciais na obtenção dos corpos de prova, foram necessárias algumas alterações nos parâmetros de injeção até a obtenção de corpos de prova satisfatórios, após duas tentativas obteve-se os corpos de prova apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Corpos de prova classificados



Fonte: O próprio autor.

Conforme já comentado, os ensaios foram realizados seguindo a norma ASTM D-638, que indica que no mínimo cinco corpos de prova devem ser ensaiados para o aferimento das propriedades mecânicas, nesse estudo os ensaios foram realizados em seis corpos de prova. A velocidade do teste foi de 5 mm/min, conforme a norma indica. Como resultados dos ensaios destaca-se a definição do módulo de elasticidade e da tensão de máxima no escoamento do material estudado.

### 3.4 CURVA DE WÖHLER

A teoria convencional para obtenção da curva de Wöhler já é bastante difundida e amplamente utilizada para materiais ferrosos, com os fatores de correção já amplamente estudados e catalogados. Entretanto, para materiais poliméricos, geralmente esta curva é desenvolvida baseando-se em ensaios de fadiga experimentais.

Para iniciar o processo de cálculo teórico da curva, faz-se necessário conhecer a tensão limite de resistência do material ( $\sigma_R$ ), essa informação foi obtida através dos ensaios mecânicos no material estudado e da documentação oficial da fabricante. A segunda etapa é a estimativa dos dois pontos necessários para traçar a curva, a tensão limite de fadiga ( $\sigma_F$ ) e a tensão de resistência à fadiga ( $\sigma_N$ ), nesse caso as tensões se referem à  $10^3$  e  $10^6$  ciclos, respectivamente.

Segundo Nielsen e Landel (1994), a tensão limite de fadiga para a maioria dos polímeros é de 20 a 40% da resistência a tração estática. Já a tensão de resistência à fadiga precisou ser estimada através da figura 6 já mostrada nesse trabalho, essa figura foi resultado de análises experimentais realizadas por Riddell (1974).

Uma vez definidos os pontos  $\sigma_N$  e  $\sigma_F$ , é possível obter a equação da reta e alguns parâmetros importantes, com destaque para  $C$  e  $m$ , chamados de coeficiente e expoente de Wöhler, respectivamente e, dispostos na equação (1). Verifica-se que é possível retratar a equação da reta conforme,

$$\sigma_N = CN^m, \quad (1)$$

sendo os parâmetros  $C$ ,  $N$  e  $m$  chamados de coeficiente de Wöhler, ciclos de fadiga até a falha e expoente de Wöhler, respectivamente (HYPERWORKS, 2017),  $\sigma_N$  por sua vez representa a tensão nominal na curva. Os parâmetros  $C$  e  $m$  dependem diretamente das propriedades de resistência à fadiga do material. O expoente de Wöhler pode ser encontrado através de,

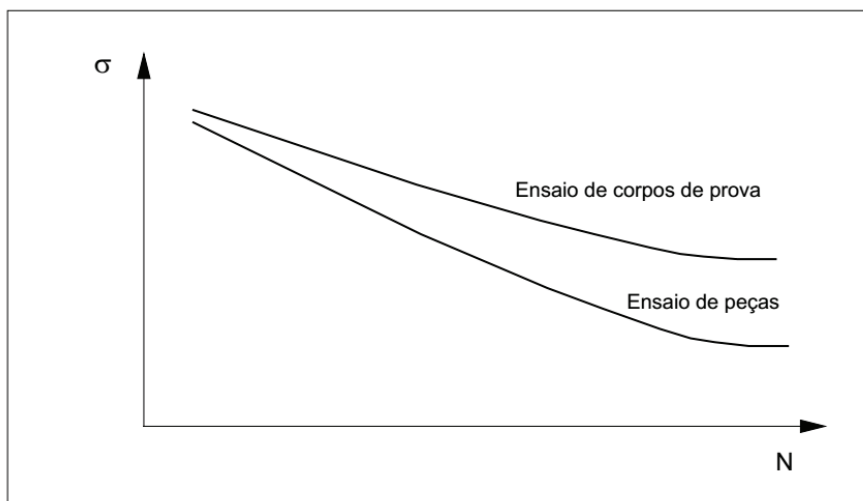
$$m = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{\sigma_N}{\sigma_F} \right). \quad (2)$$

Após o cálculo teórico da curva S-N para o material, seguindo o procedimento disposto acima, faz-se necessário algumas considerações relacionadas com a peça final que será exposta ao fenômeno da fadiga. Nesse ponto serão definidos fatores de correção para a tensão limite de fadiga, levando-se em conta características da peça como acabamento superficial, tamanho, confiabilidade, temperatura de atuação, geometria, carga aplicada, entre outros. A tensão limite à fadiga do componente fica representada conforme a equação (3), onde os componentes  $K$  são os fatores de correção.

$$\sigma'_F = K_1 K_2 K_3 K_4 \dots K_n \sigma_F. \quad (3)$$

Dessa forma a curva S-N da peça fica caracterizada pela tensão  $\sigma'_F$  para  $10^6$  ciclos. Já para vidas menores considera-se o valor original de  $\sigma_N$ . A Figura 18 ilustra o efeito dos fatores de correção na curva S-N do componente.

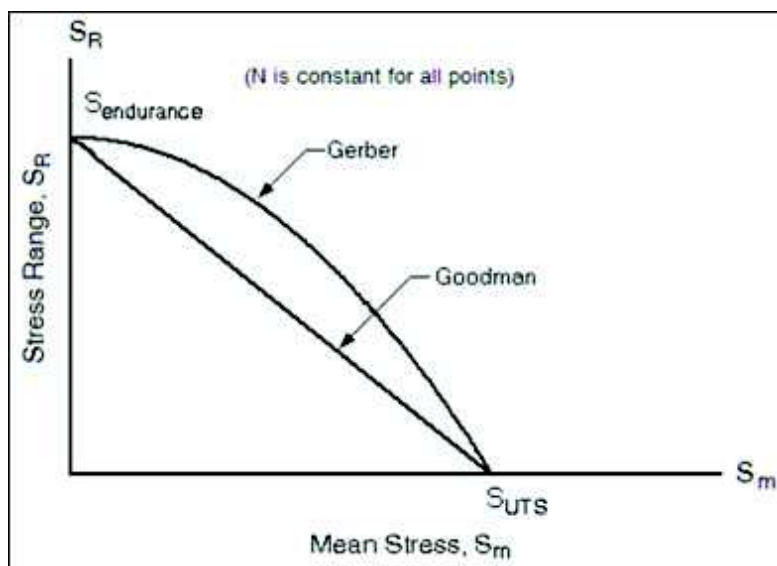
**Figura 18** – Efeitos dos fatores de correção na curva S-N



Fonte: Rosa (2002).

Um ponto importante para ser levado em consideração quando no desenvolvimento do modelo teórico da vida em fadiga para um componente são os efeitos das solicitações médias e o critério de falha utilizado na análise. No presente trabalho, o critério de Goodman modificado foi escolhido. A Figura 19 traz a diferença entre os critérios de Goodman e de Gerber, ambos disponíveis em um conjunto de opções no software utilizado para análises nesse trabalho.

**Figura 19** – Critérios de Goodman e Gerber



Fonte: Hyperworks (2017).

Utilizando o critério de Goodman modificado, a tensão alternante sobre o eixo vertical passa a ser igual ao valor da tensão limite de fadiga (ROSA, 2002). O critério pode ser definido conforme,

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_N} = 1 - \frac{\sigma_M}{\sigma_R}. \quad (4)$$

Já os parâmetros  $\sigma_A$  e  $\sigma_M$ , tensão alternante e média, podem ser obtidos através de

$$\sigma_A = \frac{\sigma_{MAX} + \sigma_{MIN}}{2}, \quad (5)$$

e

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_{MIN}}{2}. \quad (6)$$

Nesse trabalho, considerando-se que a peça em  $L$  produzida sob condições controladas de laboratório. Portanto, adotou-se a hipótese da utilização da curva de Wöhler inicial, sem fatores de correção, como a curva a ser inserida nas simulações computacionais.

Outro ponto importante para ser levado em conta durante o estudo do comportamento à fadiga de um componente é o efeito do dano acumulado sobre a peça. O método utilizado nesse trabalho foi o desenvolvido por Palmgreen-Miner, no qual caso o dano acumulado seja superior a 1 ocorre falha por fadiga. A equação (7) representa a formulação teórica da regra linear de acúmulo de dano.

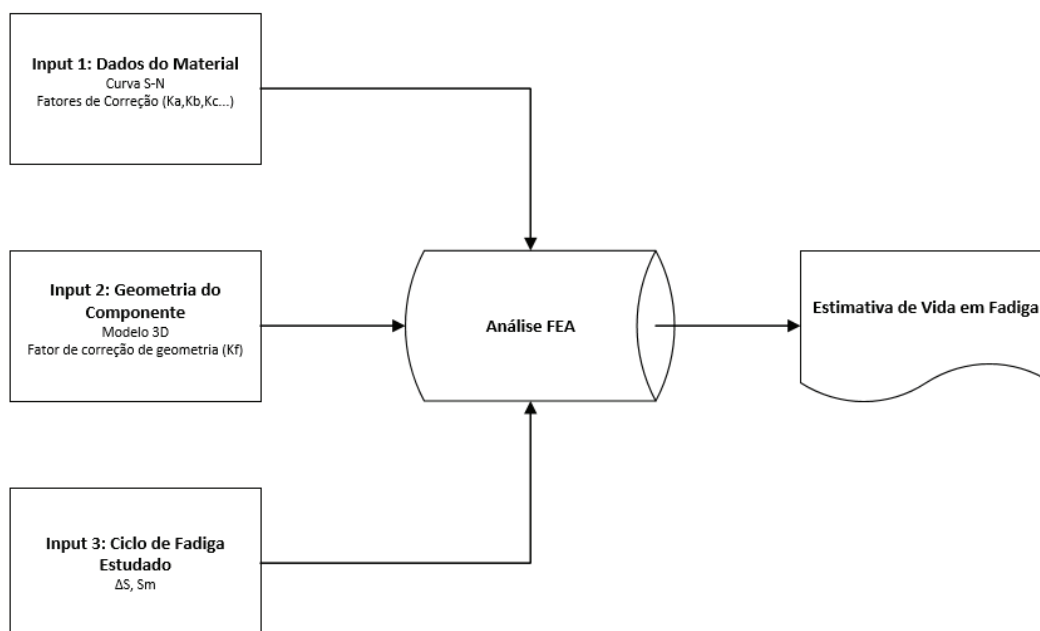
$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}, \quad (7)$$

onde  $D$  é a variável de dano por fadiga,  $n_i$  o número de ciclos de carregamento no bloco e  $N_i$  é a duração à fadiga para a tensão aplicada. Esse é um dos fatores de interesse nas simulações propostas no presente trabalho.

### 3.5 MODELO COMPUTACIONAL

Para a utilização do módulo de análise de fadiga do software Hyperworks<sup>®</sup> alguns parâmetros iniciais devem ser informados. Os dados do material devem ser fornecidos, juntamente com a curva S-N característica e os fatores de correção para o modelo, caso necessário. Além dos dados do material, também é preciso apresentar o modelo computacional da peça estudada e o ciclo de fadiga a ser utilizado na análise. A Figura 20 representa um modelo esquemático dos parâmetros de entrada necessários para o modelamento da vida em fadiga da peça em estudo.

**Figura 20** – Entradas e Saídas do processo de análise Hyperworks

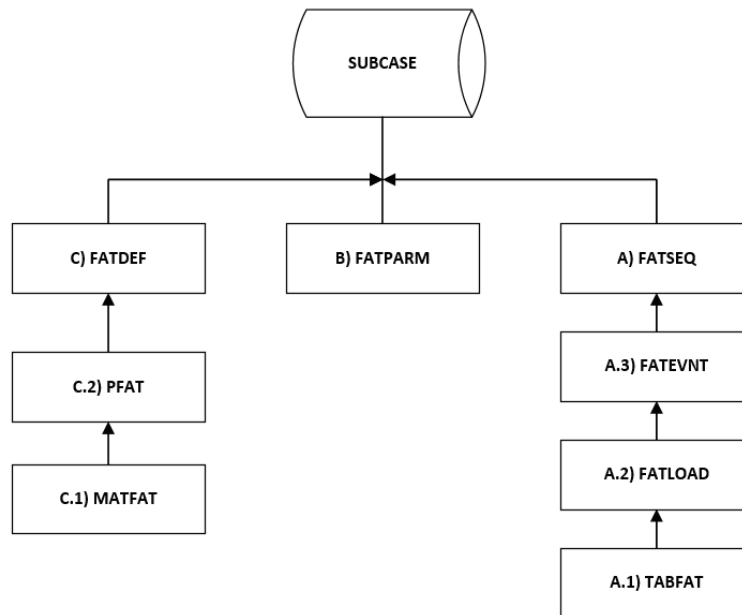


Fonte: O próprio autor com base no manual do software.

Para o primeiro input (dados do material), a curva teórica S-N foi calculada utilizando o método discutido na seção 3.4. Do ponto de vista do software utilizado, o mesmo trabalha com um modelo estruturado de entradas e os chamados “cards” de informações.

A Figura 21 destaca as etapas do processamento, vale ressaltar que a entrada de informações em geral deve seguir a ordem da base para cima, conforme os números e letras indicam, uma vez que certos parâmetros servem de complemento para outros subsequentes.

**Figura 21** – Procedimento para entrada de dados Hyperworks



Fonte: O próprio autor com base no manual do software.

A etapa A.1 consiste na configuração da entrada de valores TABFAT, que faz a definição dos valores do domínio do tempo do ensaio, nessa etapa é possível importar uma curva pré-determinada de carga de fadiga. Já na etapa A.2, associa-se as informações do ciclo fornecidas anteriormente com as respectivas cargas. Nesse momento é possível definir diversos parâmetros e escalas para os dados. A etapa A.3 consiste na definição dos eventos de carga para a análise de fadiga. Sendo possível associar diversas entradas feitas em A.2 para o mesmo evento ou várias cargas distintas para o mesmo ciclo. Já em A, FATSEQ, é definida a sequência de ciclos para a fadiga, para tanto é necessário associar a entrada FATEVNT criada anteriormente. Aqui define-se o número de repetições do ciclo importado em A.1, por exemplo, é possível repetir 'n' vezes um ciclo inicial importado. Dessa forma se faz necessário a inclusão de somente uma sequência de oscilações por simulação.

FATPARAM é configurado em seguida. Nessa etapa são definidos os parâmetros do estudo do comportamento à fadiga, é estipulado se a simulação será do tipo S-N, fator de segurança ou E-N, correções como Goodman, Gerber, entre outros, além de combinações de tensões. Nessa etapa são estipulados os parâmetros gerais do estudo da fadiga no modelo.

Em C.1 configura-se o módulo MATFAT, que informa características intrínsecas do material estudado, informações como tensão de ruptura, tensão de escoamento e coeficientes de fadiga devem ser informadas. Já em C.2 os coeficientes de correção podem ser informados,



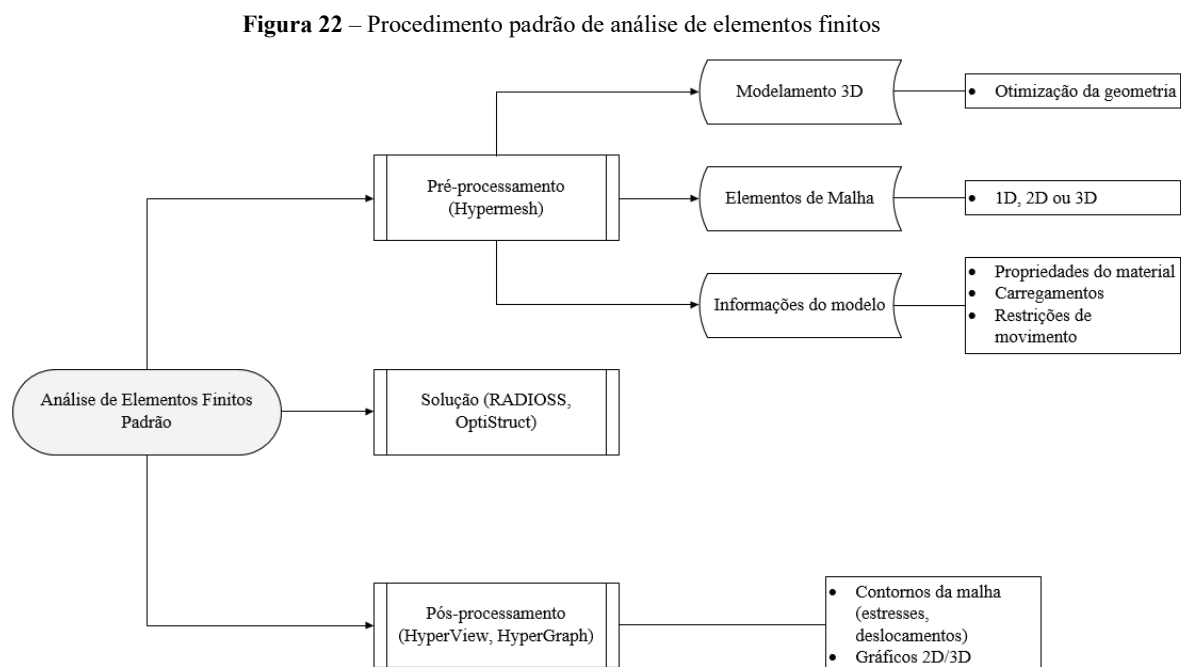
acabamento, tratamentos superficiais, regiões das malhas, entre outras. Por fim configura-se o módulo FATDEF, nesse momento são definidos os elementos e as características de fadiga associadas para o estudo. SUBCASE consiste no estudo do fenômeno da fadiga propriamente dito.

Para a definição de todos os parâmetros de entrada discutidos acima, nesse trabalho adotou-se duas metodologias complementares, na qual dados experimentais e teóricos foram utilizados em conjunto, uma vez que testes experimentais para levantamento da curva S-N do material não foram possíveis.

A peça em L passou por um ciclo de carregamento imposto pelo autor, que se assemelha ao utilizado em simulações de fadiga realizados em treinamentos ministrados pela empresa Altair, em componentes estruturais automotivos. Para a carga utilizada, foi adicionado uma pressão constante na parede interna do L, definida pelo autor através da curva de Wöhler.

Para definição das propriedades do material, a curva S-N foi obtida de forma teórica, enquanto o módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão de ruptura foram obtidas experimentalmente através de ensaios de tração.

De maneira geral a utilização do método de elementos finitos no *software* utilizado segue o fluxograma apresentado na Figura 22.



Fonte: O próprio autor, adaptado de ALTAIR (2013).

Para estudos do efeito do raio interno na peça, foram realizadas 4 diferentes análises com raios variando de acordo com a Tabela 7.

**Tabela 7** – Análises realizadas *versus* parâmetros modificados

<b>Análise</b>	<b>Raio [mm]</b>
1	0
2	2,5
3	5
4	7

Fonte: O próprio autor.

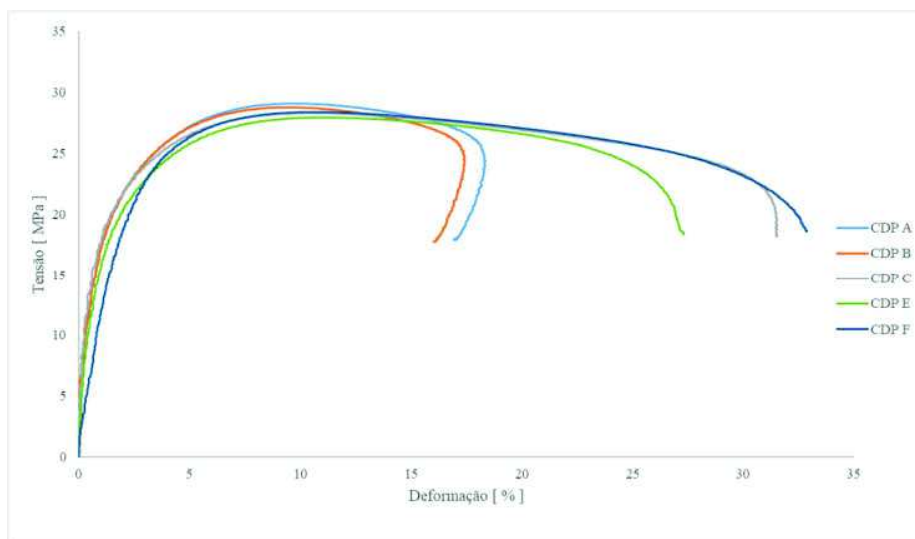
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de avaliar os efeitos da inclusão de um raio em uma peça em L feita de Polipropileno, esse trabalho teve como foco a análise de duas variáveis. O dano acumulado e a tensão máxima, obtidas através de simulações computacionais para cada geometria do modelo. Os dados de entrada necessários foram obtidos através de ensaios mecânicos para a caracterização do material, cálculo teórico com base na literatura e aproximações com base em dados obtidos da literatura. O que segue são os pormenores desse processo.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES

No total foram ensaiados seis corpos de prova, de acordo com a norma ASTM D-638 previamente citada. Os corpos de prova podem ser vistos na Figura 17. Os ensaios foram realizados utilizando a velocidade de 5 mm/min, conforme estipulado pela norma. De maneira geral os resultados obtidos estiveram próximos dos fornecidos pela fabricante, e em linha com outros resultados encontrados na literatura. É possível verificar as curvas obtidas através da Figura 23. Apenas cinco curvas foram selecionadas para fazer parte dessa figura, uma vez que o corpo de prova D apresentou um comportamento anormal na curva e teve seus dados descartados.

**Figura 23** – Curvas Tensão x Deformação obtidas



Fonte: O próprio autor.

É possível observar que os cinco corpos de prova tiveram comportamento similar, ao que pese a diferença na deformação máxima percentual. Essa modificação, observada no comportamento da deformação, não teve impacto sobre os resultados esperados, uma vez que buscou-se obter o módulo de elasticidade e a tensão máxima no escoamento para o material. Na Tabela 8 encontram-se relacionados os valores encontrados para cada corpo de prova para as variáveis analisadas.

**Tabela 8** – Propriedades do material

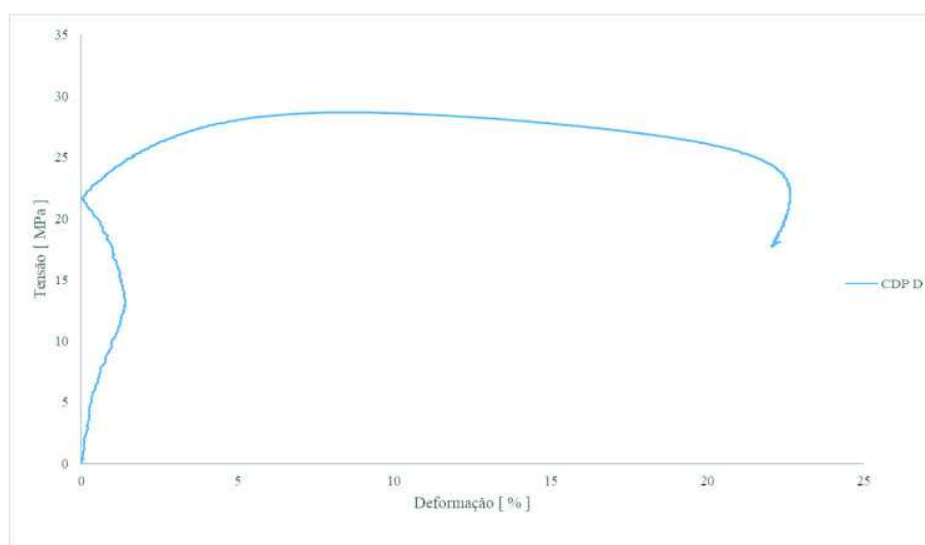
<b>Corpo de Prova</b>	<b>Módulo Elástico [MPa]</b>	<b>Tensão Máxima no Escoamento [MPa]</b>	<b>Alongamento no Escoamento (%)</b>
A	1402,50	29,04	9,8
B	1315,39	28,76	9,1
C	1578,15	28,26	10,3
E	1718,16	27,88	10,9
F	1335,31	28,34	10,4
Média	1469,90	28,46	10,1
Desvio Padrão	154,84	0,40	0,6

Fonte: O próprio autor.

Ao comparar a média dos dados obtidos com o fornecido pelo fabricante, confirma-se o sucesso dos ensaios, quando se compara a tensão máxima no escoamento, a média obtida nos ensaios foi de 28,46 MPa, enquanto o fabricante informa um valor de 34 MPa. Essa diferença de aproximadamente 16% pode ser explicada pelas diferenças entre os processos de injeção dos corpos de prova. Já no tocante do módulo de elasticidade, o fornecedor não informa esse dado especificamente, optando por informar o módulo de flexão, com valor de 1350 MPa. No entanto, outros autores como Brunett, Moretti, Bretas e Favaro (2009) e Santos (2006) encontraram módulos de elasticidade para o mesmo material de cerca de 1500 MPa, que estão em linha com o encontrado pelos ensaios aqui discutidos.

O corpo de prova “D” apresentou um comportamento anormal, o que levou ao descarte de seus resultados. A possível explicação para esse comportamento pode estar ligada aos parâmetros de injeção que podem ter sofrido variação ou no próprio posicionamento do extensômetro, apesar dos constantes cuidados durante os ensaios. A curva tensão deformação para o corpo de prova “D” pode ser observada na Figura 24. Percebe-se um comportamento fora do esperado na região elástica, um aparente retorno na deformação enquanto a tensão segue aumentando.

**Figura 24** – Comportamento do CDP D



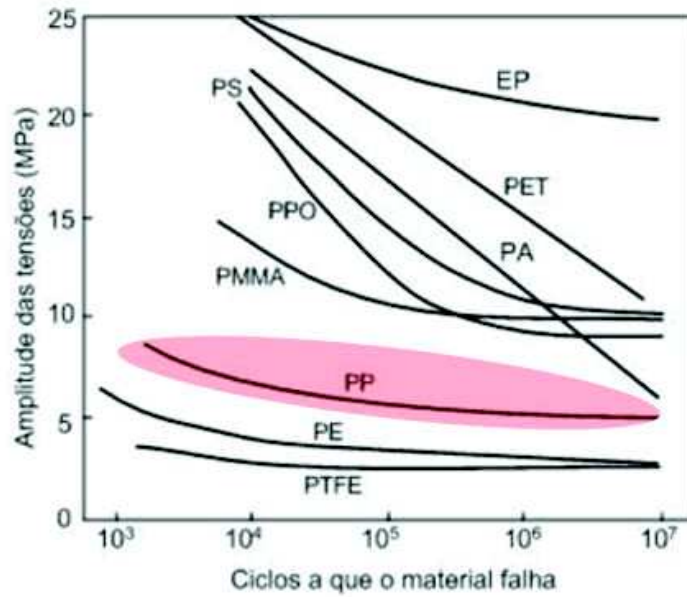
Fonte: O próprio autor.

Outro ponto que contribui para a avaliação do sucesso dos ensaios ocorre quando se compara os valores de alongamento no escoamento obtidos com o fornecido pelo fabricante. Enquanto os ensaios resultaram em uma média de 10,1% com desvio padrão de 0,6%, o fabricante informa um valor de 11%, valor próximo do obtido experimentalmente.

#### 4.2 CURVA DE WÖHLER

A curva de Wöhler teórica para o material em estudo foi calculada com base na metodologia tradicional abordada por Rosa (2003). Partindo da tensão limite de resistência disponibilizada pela fabricante Braskem, obtém-se um valor de  $\sigma_R$  igual a 34MPa. Com base nesse valor calcula-se a tensão limite de fadiga ( $\sigma_F$ ). Segundo Nielsen e Landel (1994), para a maioria dos polímeros o limite de resistência à fadiga encontra-se entre 20 e 40% da resistência a tração, seguindo esse raciocínio foi utilizado o valor mais conservador de 20% da resistência, resultando em  $\sigma_F$  igual a aproximadamente 6,8 MPa. Para a tensão de resistência à fadiga ( $\sigma_N$ ), utilizou-se uma aproximação com base nos estudos realizados por Riddel (1974), cujos resultados podem ser observados na Figura 25. Foi adotado um valor de 9MPa para  $\sigma_N$ , em linha com o valor encontrado por Riddel (1974) para o material PP.

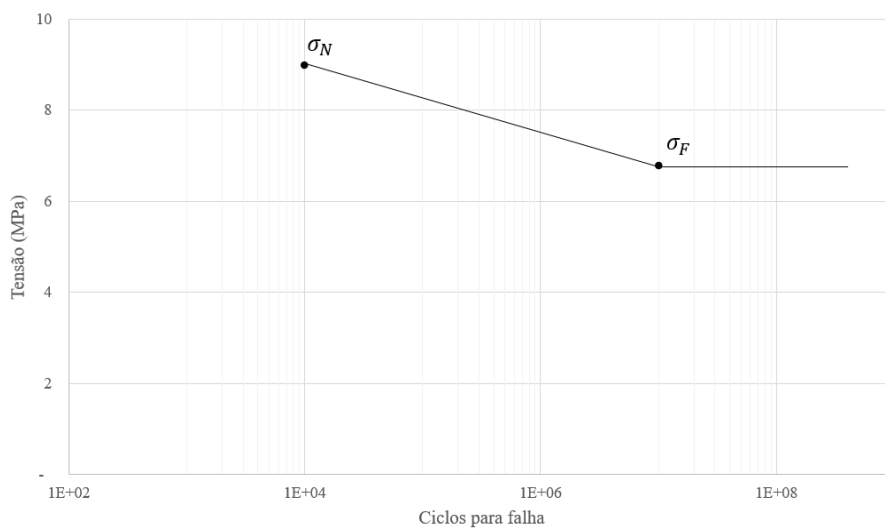
**Figura 25** – Curvas S-N para alguns polímeros



Fonte: OLIVIER apud RIDDELL, 1974.

Determinados os valores de  $\sigma_N$  e  $\sigma_F$ , o que segue é a utilização de equações para encontrar o coeficiente e o expoente de Wöhler. Esse último é obtido através da equação (2), enquanto o coeficiente  $C$  pode ser encontrado através de substituição direta. A Figura 26 mostra a curva encontrada através da metodologia discutida.

**Figura 26** – Curva de Wöhler Teórica para o PP H301



Fonte: O próprio autor.

Com base na curva obtida, é possível então encontrar os valores do coeficiente e do expoente de Wöhler, primeiramente obtemos o expoente através,

$$m = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{9}{6,8}\right) \cong -0,04 \quad (8)$$

A partir do momento que encontramos o valor de  $m$  é possível encontrar o valor do coeficiente de Wöhler através de,

$$C = \frac{\sigma_N}{N^m} = \frac{9 * 10^6}{(10.000)^{-0,04}} \cong 1,3 * 10^7 \quad (9)$$

Dessa forma fica caracterizada a curva de Wöhler para o material em questão. A equação da reta é dada por:

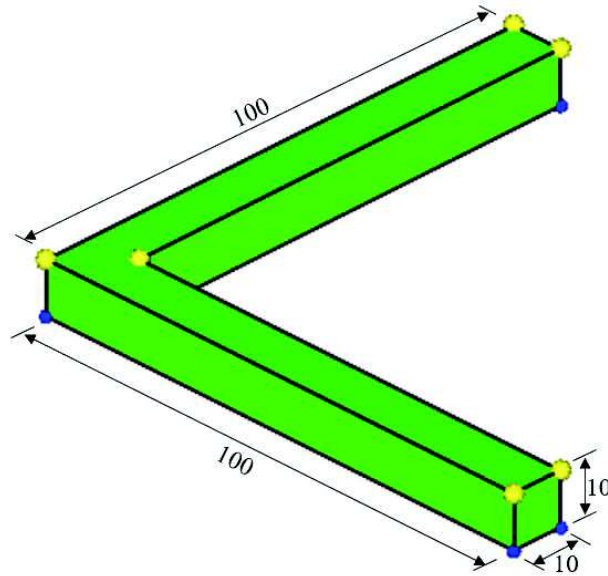
$$\sigma_N = 1,3 * 10^7 * N^{-0,04} \quad (10)$$

Conforme já comentado, o trabalho tem como objetivo a avaliação da vida à fadiga de uma peça em L, considerando que esse espécime será construído com condições controladas de laboratório, optou-se por considerar a curva obtida anteriormente como a curva para a peça, fazendo com que fatores de correção não necessitem ser aplicados.

#### 4.3 ANÁLISE COMPUTACIONAL ESTRUTURA EM “L”

Para a análise computacional e simulação da vida em fadiga o software Hyperworks® foi utilizado, por meio de uma licença estudantil que permitiu o acesso ao módulo de solução OptiStruct. Conforme o exposto em 3.5, o software necessita que alguns parâmetros de entrada sejam definidos para que as simulações ocorram de acordo.

Partindo para o modelo, na fase de pré-processamento, um elemento em L foi criado com dimensões de 100mm de comprimento horizontal e 100mm de comprimento vertical, quando visto sob um plano 2D, contando ainda com uma seção quadrada de 10mm de espessura. Essa geometria pode ser vista na Figura 27. O modelo foi criado no próprio software Hyperworks, que apresenta uma série de ferramentas para desenho 2D e 3D.

**Figura 27** – Geometria de referência em L [dimensões em mm]

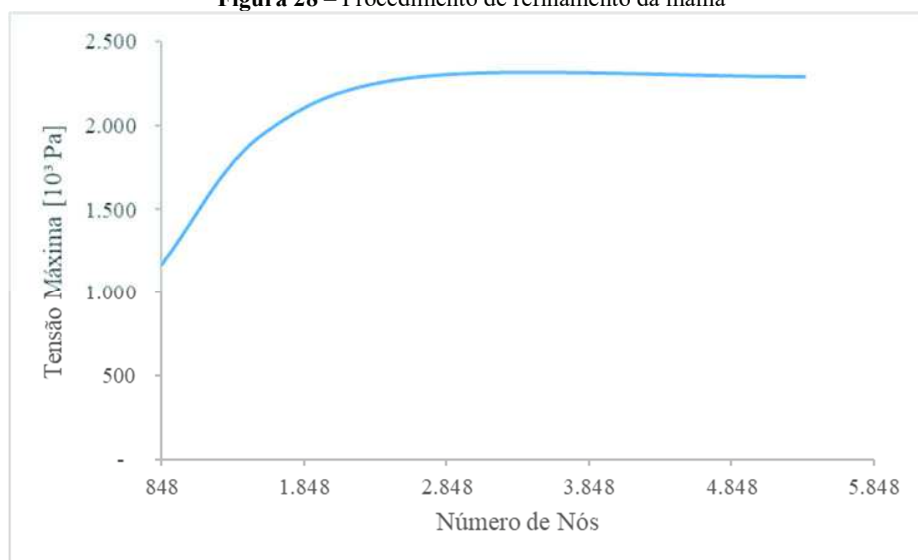
Fonte: O próprio autor

Após a modelagem da peça em L, a malha foi definida. Como o modelo é um sólido 3D, uma malha 3D foi utilizada. A malha escolhida foi de elementos Hexas, uma vez que essa configuração se mostrou mais adaptável à geometria do modelo, após a escolha inicial, um processo de refinamento foi realizado afim de se obter a malha com o tamanho e quantidade de elementos e nós que mais se adequava ao modelo.

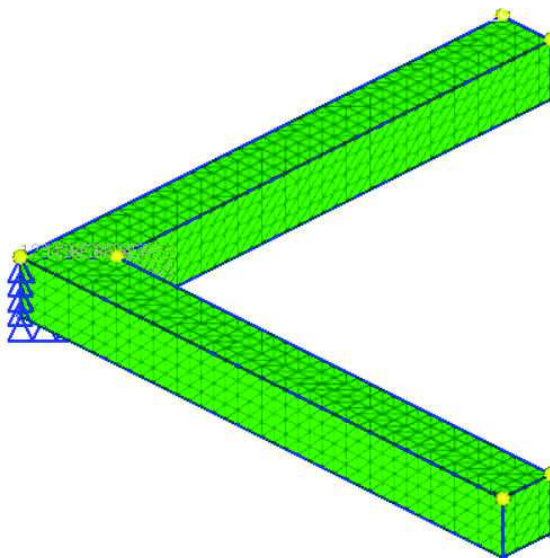
Inicialmente foi escolhido uma malha cujos elementos possuíam uma dimensão de 5mm, que foi posteriormente refinada. A Figura 28 representa o processo de refinamento da malha, relacionando o número de nós com a tensão máxima encontrada em uma simulação linear estática no modelo.

Após o processo de refinamento ficou claro que não havia necessidade de aumentar o número de nós acima de 2678, ficando assim definida a malha com dimensão de 2mm. O resultado da malha aplicada ao modelo pode ser visto na Figura 29, onde também é possível observar as condições de contorno aplicadas ao problema. Esses apoios representados por pequenos triângulos restringem o movimento da peça na simulação.



**Figura 28** – Procedimento de refinamento da malha

Fonte: O próprio autor.

**Figura 29** – Malhas 3D da peça em L

Fonte: O próprio autor.

Uma vez definida a malha e a posição dos apoios, passou-se para a definição das propriedades do material para a simulação, os dados de entrada estão relacionados na Tabela 9. Vale ressaltar que nem todas as informações foram obtidas experimentalmente, como por exemplo a densidade e coeficiente de Poisson, onde o primeiro foi obtido através da folha de dados da fabricante, enquanto o segundo foi obtido através de estudos realizados por Gsell, Bai

e Hiver (2004), que classificaram o coeficiente de Poisson para Polipropileno como sendo aproximadamente 0,35. Todas as fontes de dados foram relacionadas na Tabela 9, em conjunto com os valores utilizados nas simulações.

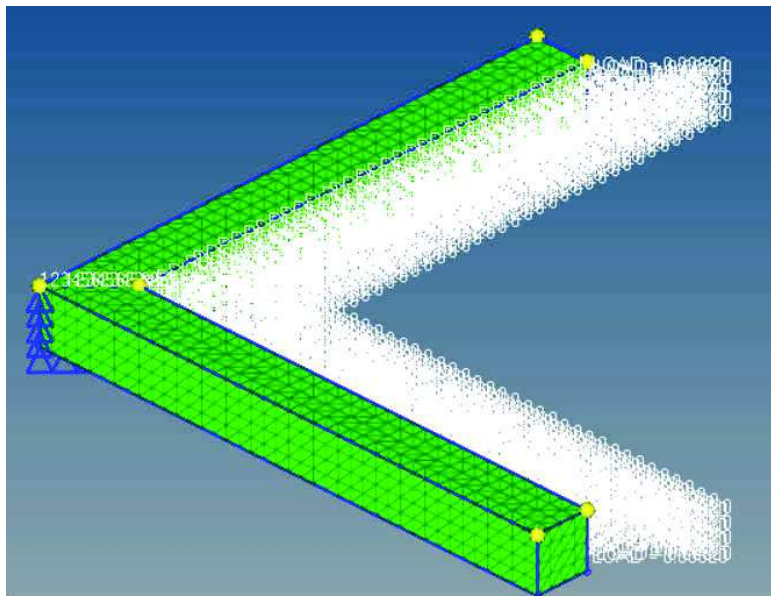
**Tabela 9** – Propriedades do material utilizados na simulação computacional.

Propriedade	Valor	Fonte
Módulo de Elasticidade [E]	1,4 GPa	Aproximação da média dos ensaios mecânicos
Coeficiente de Poisson [NU]	0,35	De acordo com o trabalho de Gsell, Bai e Hiver (2004)
Densidade [Rho]	0,905 g/cm <sup>3</sup>	Folha de dados da fabricante Braskem
Resistência à ruptura	28,5 MPa	Aproximação da média dos ensaios mecânicos
Coeficiente de Wöhler (SR1)	13 MPa	Obtido através da curva teórica desenvolvida
Expoente de Wöhler (b1)	-0,04	Obtido através da curva teórica desenvolvida

Fonte: O próprio autor.

Após definição das propriedades do material, passou-se para a definição da carga que seria estudada, nessa etapa estipulou-se uma pressão de 8,2kPa nas faces internas do L, que foi imposta sob um carregamento cíclico de 2545 repetições com amplitude de magnitude da carga variando entre 1 e -1. A Figura 30 mostra a peça com a pressão aplicada.

**Figura 30** – Peça em L com pressão aplicada

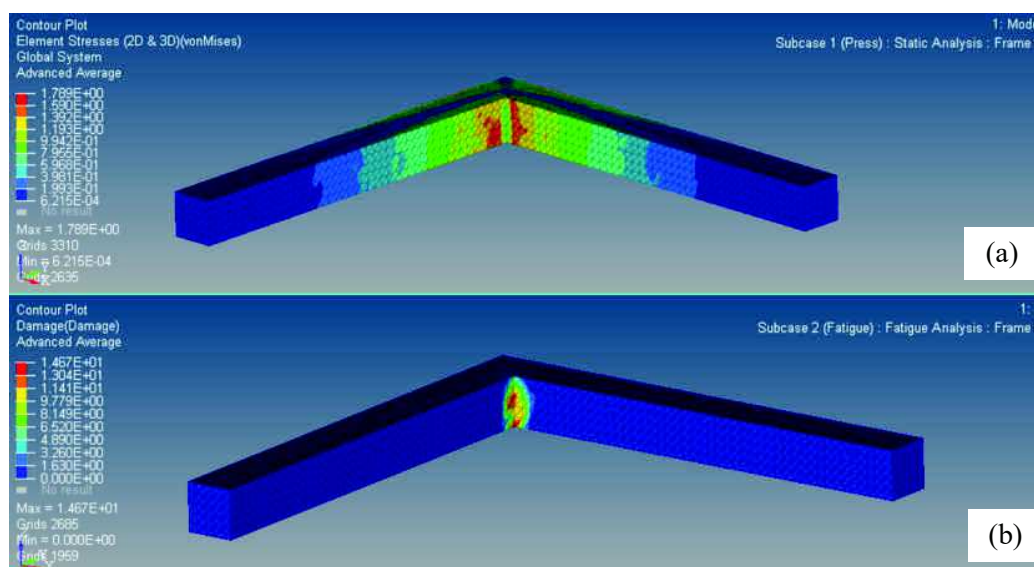


Fonte: O próprio autor.

Uma vez configurado o software, passou-se para as simulações propriamente ditas. Para fins de análise o software foi configurado para que realizasse o cálculo, tanto do comportamento à fadiga do modelo, resultando no dano acumulado na peça, quanto das tensões impostas aos elementos durante o ciclo, resultando nas tensões máximas distribuídas através da peça. Esses resultados foram comparados para as quatro diferentes situações envolvendo a geometria da peça, conforme a Tabela 7.

Na primeira simulação, envolvendo a peça em L (considerando raio = 0), obteve-se uma concentração de tensão máxima de 1,789 MPa, o que a rigor não levaria o material ao escoamento, considerando a tensão média encontrada nos ensaios mecânicos. Por outro lado, quando analisado o dano acumulado verifica-se que na mesma região de concentração de tensões ocorre um dano de 14,67, o que indica o rompimento por fadiga nessa região. Ambas as análises podem ser visualizadas na Figura 31.

**Figura 31** – CDP em L sem raio: (a) tensão máxima e (b) dano acumulado.

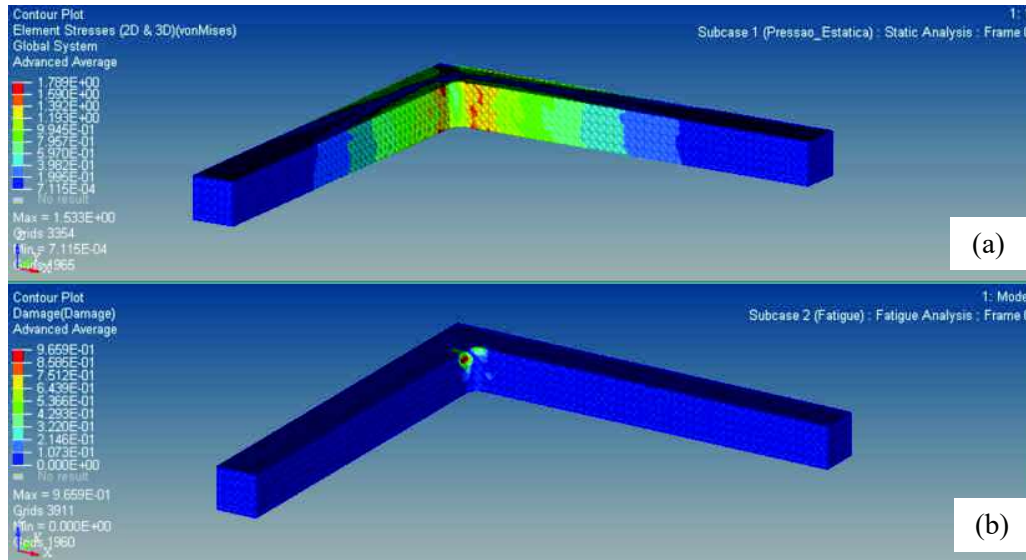


Fonte: O próprio autor.

O próximo passo, foi a simulação para o modelo com raio de 2,5mm, sendo que se obteve um resultado condizente com o esperado, ou seja, ocorreu uma diminuição na tensão máxima atuante nos elementos, agora de 1,53 MPa. No que tange o comportamento à fadiga do modelo, a adição do raio trouxe o dano para próximo do limite máximo estipulado pela literatura, no qual o dano não pode ser maior do que 1, conforme discutido anteriormente. Nesse

caso, o dano acumulado foi de aproximadamente 0,97. Na Figura 32 encontra-se o resultado da simulação realizada para a peça com raio de 2,5mm.

**Figura 32** – CDP em L com raio de 2,5mm: (a) tensão máxima e (b) dano acumulado



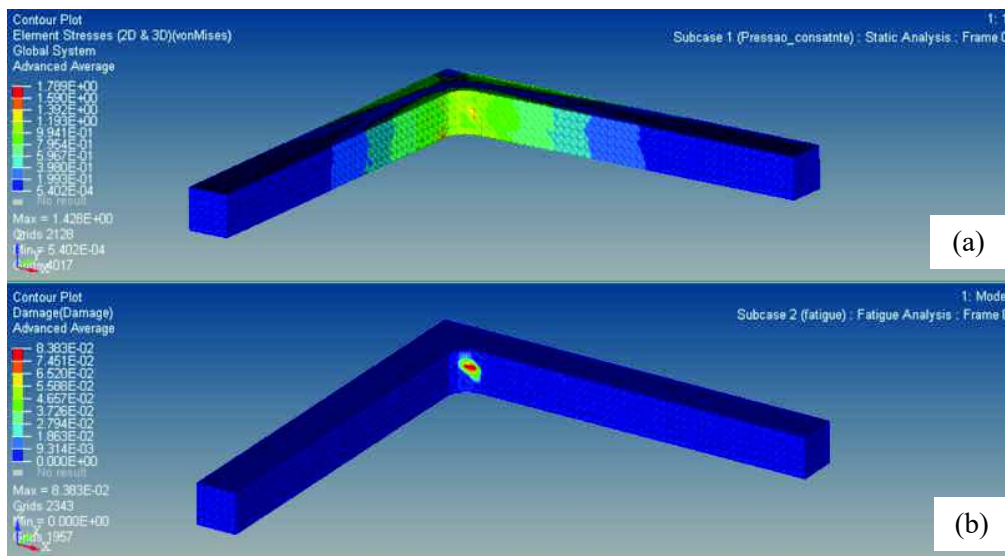
Fonte: O próprio autor.

É importante se atentar para a legenda nas figuras referentes ao dano acumulado, uma vez que não é possível utilizar a mesma escala no modelo, dada a grande diferença entre os valores, caso fosse escolhido a mesma legenda do primeiro estudo, não haveria percepção de dano no segundo.

Passando para o terceiro estudo de caso, quando adicionado um raio de 5mm no modelo inicial, ocorre mais uma vez a diminuição na tensão máxima, sendo esta de cerca de 1,428MPa, ou seja, retornando uma diminuição de cerca de 7%. No entanto, no quesito dano acumulado há uma variação expressiva de resultado. Dessa vez o dano é praticamente zero (aproximadamente 0,08) o que indica que a peça, em tese, não deve falhar por fadiga. A figura 33 representa o resultado da simulação realizada.

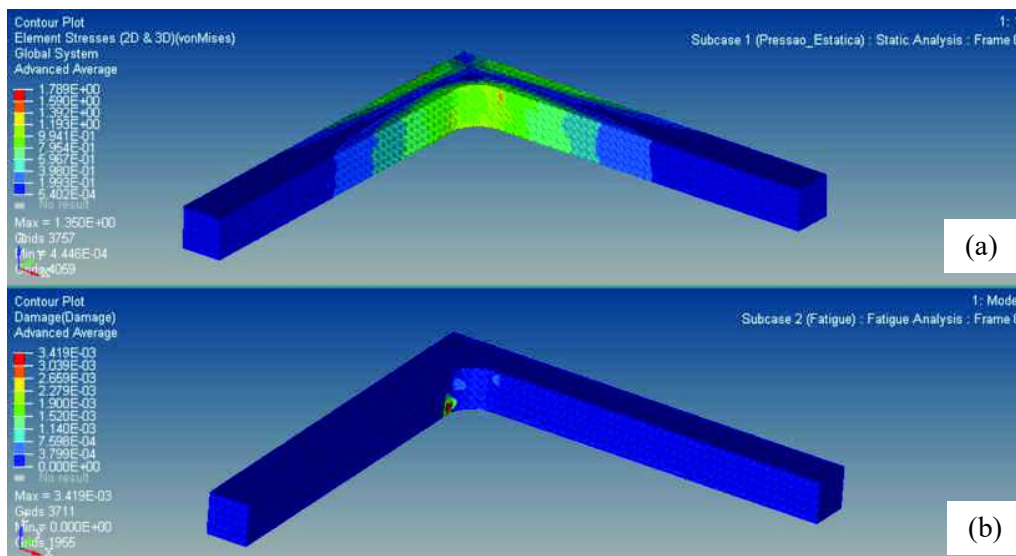
Por fim, ao realizar-se a simulação do modelo com raio de 7mm, obtém-se novamente uma diminuição nas duas variáveis analisadas. A tensão máxima obtida na simulação foi de 1,350MPa, enquanto o dano foi aproximadamente zero (0,003), mais uma vez em linha com os resultados obtidos anteriormente. A Figura 34 traz os resultados da simulação para o caso do modelo com raio de 7mm.

Figura 33 – CDP em L com raio de 5mm: (a) tensão máxima e (b) dano acumulado



Fonte: O próprio autor.

Figura 34 – CDP em L com raio de 7mm: (a) tensão máxima e (b) dano acumulado



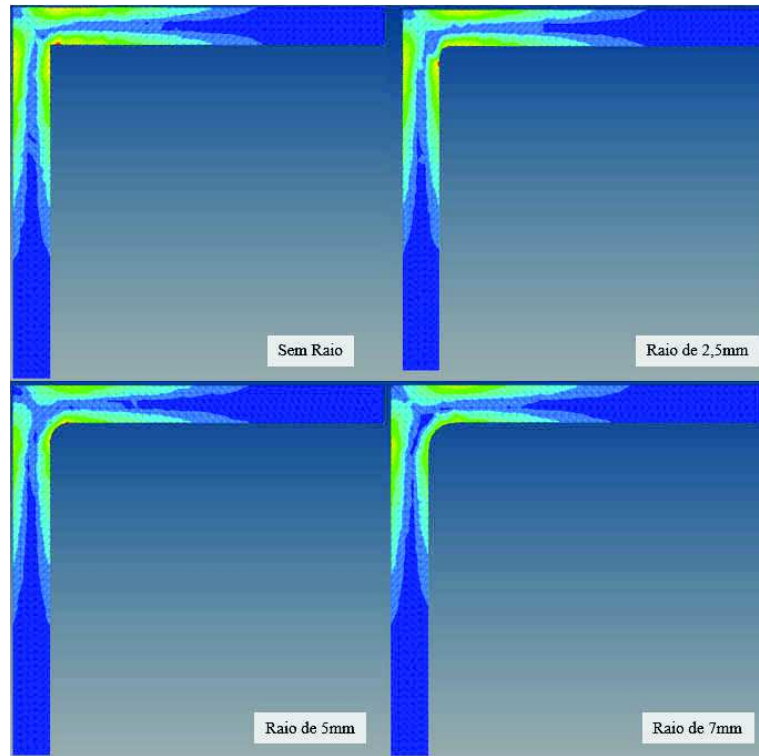
Fonte: O próprio autor.

Para melhor visualização das diferenças entre as peças e os efeitos do raio na geometria, todas as quatro configurações de modelo foram agrupadas na Figura 35, onde pode-se verificar os diferentes raios utilizados nas simulações.

Verifica-se um comportamento esperado, uma vez que se diminui a concentração de tensões causadas pela mudança abrupta da geometria com a inserção do raio interno. Essa

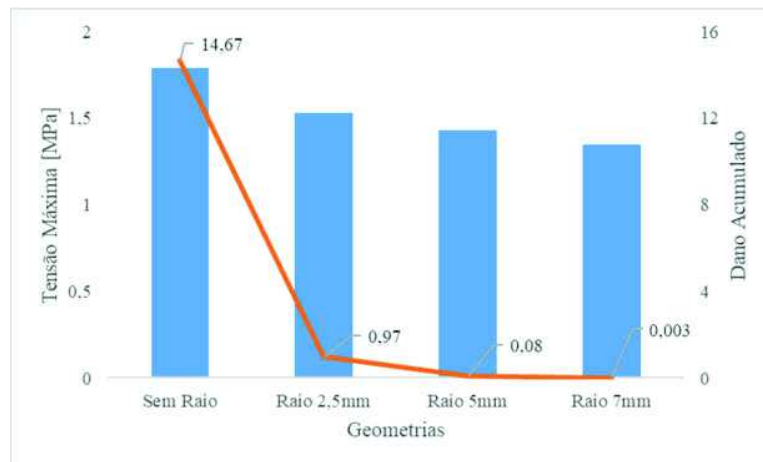
variação pode ser observada na Figura 36, onde os resultados da tensão máxima e do dano nas simulações foram agrupados.

**Figura 35** – Geometrias simuladas, sem raio (superior esquerda), raio de 2,5mm (superior direita), raio de 5mm (inferior esquerda), raio de 7mm (inferior direita)



Fonte: O próprio autor.

**Figura 36** – Análise das tensões máximas e dano acumulado para os diferentes raios de curvatura do CDP.



Fonte: O próprio autor.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho buscou-se desenvolver uma ferramenta computacional para análise de fadiga de materiais poliméricos. Para isso, primeiramente realizou-se ensaios mecânico de caracterização do material. Em seguida, buscou-se, através dos dados experimentais e da literatura, determinar a curva de Wöhler característica. Por fim, de posse destes dados, utilizou-se um software computacional para avaliar a influência do raio de curvatura do corpo de prova na vida à fadiga do mesmo.

No que tange os dados obtidos através dos ensaios mecânicos, todos os dados coletados estiveram dentro dos limites estabelecidos pela literatura, e muito próximos dos dados fornecidos pela própria fabricante, o que confirma a qualidade das informações.

Quanto a curva de Wöhler, podemos destacar a semelhança entre a curva obtida através dos cálculos teóricos e do resultado obtido experimentalmente por Riddell em 1974, indicando a consistência do modelo utilizado nas simulações.

As simulações da vida à fadiga realizadas no software Hyperworks® tiveram um resultado condizente com o esperado, uma vez que, ao passo que um raio foi adicionado no ponto onde originalmente localizava-se um canto vivo, tanto a tensão máxima quanto o dano acumulado na peça apresentam um comportamento inversamente proporcional ao aumento do raio.

Pode-se observar com que a metodologia proposta para análise de estruturas em material polimérico apresentou resultados esperados com a literatura e dados experimentais. Além da clara tendência da simulação computacional de extensão da vida à fadiga com a inclusão de raios. Ainda, é possível destacar a facilidade com que projetos e desenvolvimentos podem ser melhorados através de simulações, tanto tratando-se de estudos estáticos quanto de fadiga, proporcionando uma economia considerável à longo prazo, dada a diminuição na necessidade de ajustes após construção.

Apesar do resultado estar de acordo com o esperado, não se pode afirmar com certeza que esse seria o comportamento real da peça, para isso seria necessário a construção do modelo e posterior ensaio nas condições à fadiga simuladas, afim de validar o modelo computacional.

Conclui-se, portanto, que o trabalho teve seu objetivo alcançado, uma vez que foi realizado uma análise preliminar do estudo a fadiga em estruturas de material polimérico. No entanto, destaca-se a importância do prosseguimento desse trabalho para que resultados significativos e de usabilidade prática possam vir a ser encontrados, uma vez que tudo o que foi

aqui exposto resume-se a apenas um pequeno passo em direção ao entendimento do comportamento da vida à fadiga do polipropileno em geometrias complexas.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para que a linha de estudos iniciada nesse trabalho tenha uma aplicação prática relevante, novos trabalhos poderão ser conduzidos no sentido de:

- Determinar a curva de Wöhler real do material, seguindo as normas definidas pela ASTM e posterior inclusão dos dados nas simulações;
- Fabricação do modelo da peça em L e ensaio de fadiga em ambiente controlado de acordo com os dados de ciclo e carga utilizados no software, posterior comparação com os dados obtidos computacionalmente;
- Validação da simulação computacional através dos dados obtidos experimentalmente e comparação entre resultados;
- Extrapolação dos resultados obtidos com a peça em L, agora validados experimentalmente, para produtos com geometrias complexas e de uso real. Posterior comparação da simulação com a prática e validação dos resultados contribuindo para a melhoria do projeto do produto estudado.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST (São Paulo) (Org.). **Perfil ABIPLAST 2016**. 2016. Disponível em: <[http://file.abiplast.org.br/file/noticia/2017/folder\\_preview\\_perfil2016\\_separado.pdf](http://file.abiplast.org.br/file/noticia/2017/folder_preview_perfil2016_separado.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2017.

ABIPLAST (São Paulo) (Org.). **Processos de Transformação para Materiais Plásticos**. 2014. Disponível em: <[http://file.abiplast.org.br/download/links/links\\_2014/apresentacao\\_sobre\\_transformacao\\_vf.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/links/links_2014/apresentacao_sobre_transformacao_vf.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2017.

ALTAIR, University (Ed.). **Practical Aspects of Finite Element Simulation: A Study Guide**. [s. L.]: University Altair, 2013. Disponível em: <<https://altairuniversity.com/free-ebooks-2/free-ebook-practical-aspects-of-finite-element-simulation-a-study-guide/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. Astm, 2014.

ARAÚJO, Jorge Francisco de. **Estudo de propriedades mecânicas do polipropileno moldado por injeção em insertos de resinas**. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Manaus, 2010. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/diretorias/dirppg/programas/ppgem/banco-teses/dissertacoes/2010/ARAJOJorgeFranciscocode.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2017.

BRUNETT, Luís G.; MORETTI, Fernando; FAVARO, Marcia M.; BRETAS, Rosário. **Caracterização das propriedades mecânicas de nanocompósitos de PP/PP-e-AM/MMT**. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 10., 2009, Foz do Iguaçu. Anais. Foz do Iguaçu: Cbpol, 2009. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/1028.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

BRYDSON, John Andrew. **Plastics Materials**. 7. ed. [s. L.]: Butterworth-heinemann, 1999.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 9. ed. [s. L.]: Wiley, 2013.

CAMPOS, Marco Donisete de. **Simulação numérica de escoamentos de fluidos pelo método de elementos finitos baseado em volumes de controle com a técnica de passo fracionado**. 2005. 92 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteiro, 2005. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94546/campos\\_md\\_me\\_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94546/campos_md_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 29 out. 2017.

CANEVAROLO Jr, Sebastião V. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

CÁRDENAS OLIVIER, Nelson. **Análise de falha da camada polimérica externa de cabos umbilicais**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica,

Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi:10.11606/T.3.2007.tde-14012008-111221. Acesso em: 2017-11-15.

G'SELL, Christian; BAI, Shu-lin; HIVER, Jean-marie. **Polypropylene/polyamide 6/polyethylene–octene elastomer blends. Part 2: volume dilatation during plastic deformation under uniaxial tension.** *Polymer*, [s.l.], v. 45, n. 17, p.5785-5792, ago. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2004.06.020>.

HALARY, Jean Louis; LAUPRETRE, Francoise; MONNERIE, Lucien. **Polymer Materials: Macroscopic Properties and Molecular Interpretations.** New Jersey: Wiley, 2011.

HARPER, Charles A. **Modern Plastics Handbook.** New York: McGraw-Hill, p. 1298, 2000.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais.** 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. Revisão técnica Wilson Carlos da Silva.

HUTTON, David V. **Fundamentals of Finite Element Analysis.** New York: Mcgraw-hill Science/engineering/math, 2003.

HYPERWORKS, Altair. **Fatigue Analysis Manual.** Disponível em: <[http://www.altairhyperworks.com/hwhelp/Altair/2017/help/os/topics/solvers/analysis\\_fatigue\\_e\\_c.htm](http://www.altairhyperworks.com/hwhelp/Altair/2017/help/os/topics/solvers/analysis_fatigue_e_c.htm)>. Acesso em: 15 nov. 2017.

IMAMURA, Rafaela. **Análise comparativa de fadiga mecânica em compósitos de polipropileno com talco e com nanoargila.** 2010. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/871/4507.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 29 out. 2017.

KANTOVISCKI, Adriano R. **Materiais Poliméricos: Módulo 1 - Conceitos e Definições.** 2011. Disponível em: <<http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/automotiva/downloadsAutomot/d5matPolimMod1.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução à Polímeros.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** São Paulo: Artliber, 2005.

NIELSEN, Lawrence E.; LANDEL, Robert F. **Mechanical Properties of Polymers and Composites.** 2. ed. New York: CRC Press, 1994.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica de peças e componentes estruturais (mecânica da fratura e fadiga).** 2002. Disponível em: <<http://www.grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf>>. Acesso em: 04 nov. 2017

SANTOS, Alexandre Maneira dos. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia.** 2006. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em:

<[http://www.pgmeec.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao\\_078\\_alexandresantos.pdf](http://www.pgmeec.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_078_alexandresantos.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2017.

SOUZA, Evandro Elias de. **Análise do comportamento em fadiga do poli(fluoreto de vinilideno) (PVDF)**. 2011. 59 f. TCC (Graduação em Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10004428.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2017.

SOUZA, Remo Magalhães de. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. 2003. Disponível em: <[http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo\\_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf](http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2017.

STRAPASSON, R. et al. Tensile and impact behavior of polypropylene/low density polyethylene blends. **Polymer Testing**, [s.l.], v. 24, n. 4, p.468-473, jun. 2005.4

WARD, Ian Macmillan; SWEENEY, John. **An Introduction to the mechanical properties of solid polymers**. 2. ed. [s. L.]: Wiley, 2004.