

## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TENSÕES MECÂNICAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS: ESTUDO DE CASO DA TAMPA DE UMA CAIXA DE GORDURA

*Walter Mota da Fonseca<sup>1\*</sup>, Wender Henrique de Souza Araújo<sup>2</sup>, Anderson Júnior dos Santos<sup>3</sup>*

### RESUMO

FONSECA, W., M.; ARAÚJO, W., H., S.; SANTOS, A., J. Simulação computacional de tensões mecânicas pelo método dos elementos finitos: estudo de caso da tampa de uma caixa de gordura. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**, v. 30, n. 10, p. 30-45, 2020.

Durante a fase de projeto de componentes mecânicos investigações na parte de concentração de tensões mecânicas em descontinuidades geométricas são importantes para determinação dos esforços limites, no intuito de preservar a integridade estrutural. O procedimento de verificação de esforços atuantes durante a fase de projeto poderá influenciar no processo de fadiga e fratura mecânica. Com base nas especificações geométricas da peça e mecânicas do polipropileno, obtidas da literatura, o presente trabalho investiga o campo de resistência mecânica por meio da metodologia da simulação numérica, o método dos elementos finitos. O caso de falha de uma alça da tampa de uma caixa de gordura residencial foi investigado por meio de um modelo virtual em 3D. As condições de contorno como medição e aplicação de força, restrições ao movimento foram verificadas. O critério de falha

utilizado foi o de von Mises e pela 1ª tensão principal. De acordo com a força aplicada, o modelo virtual apresentou tensão de 35 MPa, este valor é 6% maior que a tensão de escoamento do material fornecida pela literatura. Um fator de concentração de tensão médio de 6,9 foi observado na borda do filete na extremidade da peça. Um exame macrográfico da superfície de fratura foi realizado, observou-se regiões de nucleação de trinca, estrias de fadiga, microtrincas e direção de propagação. Pela estimativa de fadiga teórica, o colapso da peça se iniciou com aproximadamente 4 ciclos e após o redimensionamento do raio do filete a previsão de vida à fadiga foi de aproximadamente 331.410 ciclos para uma tensão de 19,5 MPa. Um reprojeto da geometria do filete contribuirá para minimizar o rápido acúmulo de danos na região investigada.

**Palavras-chave:** Polímero; Fadiga; Fratura; Resistência; Numérica.

<sup>1</sup>WJ Projetos - Rua Professor Aimoré Dutra, 589, São João Batista, Belo Horizonte, MG, CEP: 31520-050, Brasil;

<sup>2</sup>Rua Mojoara, 259, Novo Eldorado, Contagem, MG, CEP: 32341-410, Brasil;

<sup>3</sup>Instituto Federal do Sudeste de Minas, Av. Coronel Monteiro de Castro, 550, Barra, Muriaé, MG, CEP: 36884-036, Brasil.

(\*) e-mail: [waltmec@gmail.com](mailto:waltmec@gmail.com)

## COMPUTER SIMULATION OF MECHANICAL STRESSES USING THE FINITE ELEMENT METHOD: CASE STUDY OF THE GREASE TRAP

*Walter Mota da Fonseca<sup>1\*</sup>, Wender Henrique de Souza Araújo<sup>2</sup>, Anderson Júnior dos Santos<sup>3</sup>*

### ABSTRACT

FONSECA, W., M.; ARAÚJO, W., H., S.; SANTOS, A., J. Simulação computacional de tensões mecânicas pelo método dos elementos finitos: estudo de caso da tampa de uma caixa de gordura. **Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**, v. 30, n. 10, p. 30-45, 2020.

During the design phase of mechanical components, investigations into the concentration of mechanical stresses in geometric discontinuities are important for determining the limit efforts, in order to preserve structural integrity. The procedure for verifying active efforts during the design phase may influence the fatigue and mechanical fracture process. Based on the geometric and mechanical specifications of the polypropylene, obtained from the literature, the present work investigates the field of mechanical resistance through the methodology of numerical simulation, the finite element method. The case of failure of a handle on the lid of a residential fat box was investigated using a virtual 3D model. The boundary conditions such as measurement and application of force, restrictions on movement were verified. The failure criterion used was von Mises and the 1st main stress. According to the

applied force, the virtual model presented a stress of 35 MPa, this value is 6% higher than the yield stress of the material provided by the literature. An average stress concentration factor of 6.9 was observed at the edge of the fillet at the end of the part. A macrographic examination of the fracture surface was carried out, areas of crack nucleation, fatigue streaks, microcracks and direction of propagation were observed. According to the theoretical fatigue estimate, the collapse of the part started with approximately 4 cycles and after the resizing of the fillet radius, the fatigue life forecast was approximately 331410 cycles for a stress of 19.5 MPa. A redesign of the fillet geometry will help to minimize the rapid accumulation of damage in the investigated region.

**Keywords:** Polymer; Fatigue; Fracture; Resistance; Numeric.

<sup>1</sup>WJ Projetos - Rua Professor Aimoré Dutra, 589, São João Batista, Belo Horizonte, MG, CEP: 31520-050, Brasil;

<sup>2</sup>Rua Mojoara, 259, Novo Eldorado, Contagem, MG, CEP: 32341-410, Brasil;

<sup>3</sup>Instituto Federal do Sudeste de Minas, Av. Coronel Monteiro de Castro, 550, Barra, Muriaé, MG, CEP: 36884-036, Brasil.

(\*) e-mail: [waltmec@gmail.com](mailto:waltmec@gmail.com)

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Callister (2000), os polímeros sintéticos são os plásticos, borrachas e materiais fibrosos em que algumas aplicações, peças metálicas e de madeira por exemplo, podem ser substituídas por plásticos por possuir propriedades mecânicas satisfatórias e custo de produção mais baixo.

O polipropileno é um polímero termoplástico semi-cristalino. De acordo com Ram (1997), foi desenvolvido durante a década de 50 e é utilizado em uma variedade de diferentes áreas e indústrias em geral. Normalmente, o polipropileno é definido como um material leve e de certa rigidez, com boa resistência mecânica (RAM, 1997).

A estrutura molecular da maioria dos polímeros, segundo Callister (2000), são moléculas em forma de cadeias longas e flexíveis, cujo a estrutura principal consiste em séries, unidades de repetição, de átomos de carbono conforme detalhado na Figura 1.

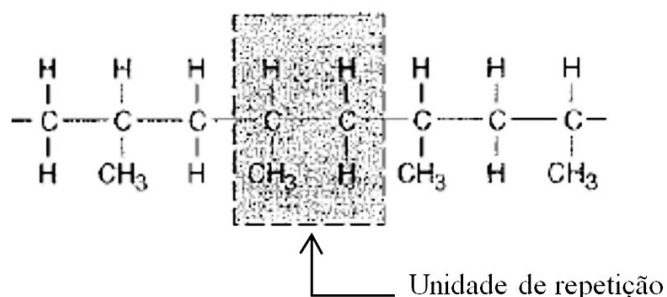


Figura 1: Estrutura da cadeia carbônica do polipropileno. Fonte: adaptado de Callister (2000).

Com relação as propriedades de resistência mecânica dos polímeros, o módulo de elasticidade é determinado da mesma maneira dos metais em ensaios de tração. A curva do ensaio de tração também fornece os valores dos limites de tensão de escoamento e ruptura. A Tabela 1 fornece propriedades mecânicas dos ensaios de tração para alguns polímeros.

Tabela 1: Propriedades mecânicas de alguns dos polímeros. Fonte: adaptado de Callister (2000).

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)
<b>Cloreto de polivinila</b>	2,4 – 4,1	40,7 – 51,7	40,7 – 44,8
<b>Polipropileno</b>	1,14 – 1,5	31 – 41,4	31 – 37,2
<b>Náilon 6.6</b>	1,6 – 3,8	75,9 – 94,5	44,8 – 82,8
<b>Poliéster</b>	2,8 – 4,1	48,3 – 72,4	59,3
<b>Policarbonato</b>	2,4	62,8 – 72,4	62,1

## 1.1 Fadiga mecânica

De acordo com Maier e Calafut (1999), estimativas da literatura indicam que entre 20% e 80% das falhas de peças em polímero podem ser atribuídas à fadiga mecânica. Apesar da importância da fadiga mecânica em polímeros, pouco foi feito para padronizar os métodos de teste, levando a muitas abordagens diferentes (MAIER e CALAFUT, 1999).

No trabalho de Haque et al. (2019) foram realizados estudos comparativos de ensaios de fadiga mecânica e confiabilidade de fadiga entre o polipropileno (PP) e um compósito polipropileno/nanofibras de celulose.

A Figura 2 apresenta graficamente a faixa de confiança de 95% dos dados experimentais de fadiga do PP puro, como exemplo. Como os dados experimentais do teste de fadiga foram amplamente dispersos, com base nos dados do teste, portanto a faixa de confiança de 95% foi representada.

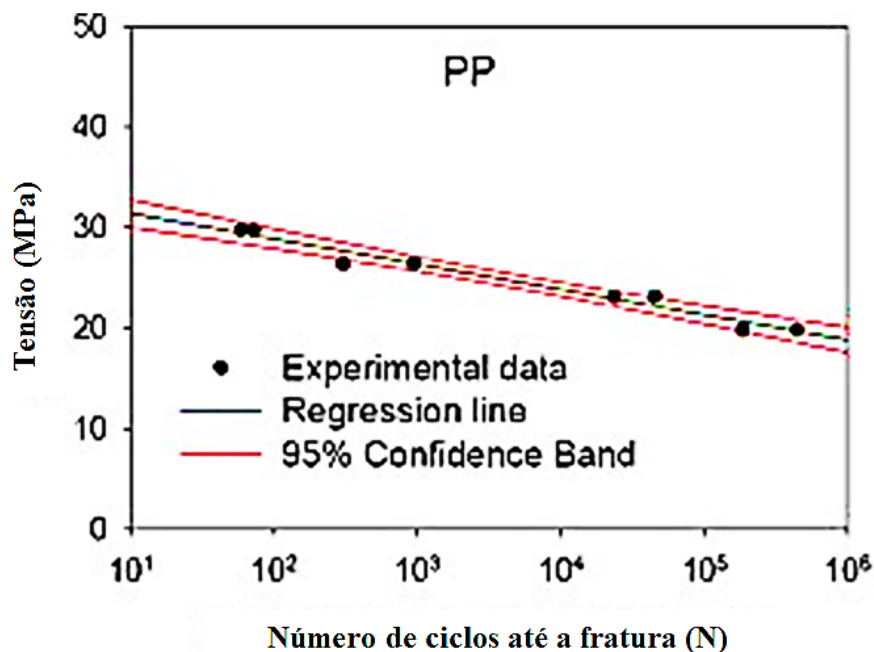


Figura 2: Curva de fadiga do polipropileno. Fonte: adaptado de Haque et al. (2019).

Segundo Haque et al. (2019), as seguintes condições de teste de fadiga foram com uma razão de tensão de 0,1; frequência 3,5 Hz, temperatura de 25 °C e tensões aplicadas de 90, 80, 70 e 60% dos níveis de resistência máxima à tração do material.

Observa-se pela regressão linear que valores de tensões acima de 30 MPa o número de ciclos apresenta tendência abaixo de 10 ciclos até a falha. A tensão de escoamento dos corpos de prova de PP utilizados durante os testes de Haque et al. (2019) foi em torno de 33 MPa.

Como um guia aproximado para o projetista, Maier e Calafat (1999) afirmam que a resistência à fadiga da maioria dos plásticos é de apenas 20% a 30% da resistência à tração.

## 1.2 Fratura

Trincas por fadiga podem se desenvolver nos polímeros de várias maneiras. De acordo com Chanda et al. (2008) as principais causas de fratura em uma peça de plástico são a ação prolongada de uma tensão mecânica constante (fratura por fluência), a aplicação de uma tensão mecânica em um período muito curto de tempo (fratura por impacto) e a contínua aplicação de uma tensão mecânica ciclicamente variável (fadiga mecânica).

São reconhecidos dois tipos básicos de fratura submetidos à tensões mecânicas; fratura frágil e fratura dúctil.

Segundo Maier e Calafut (1999), existem dois pontos de vista sobre as causas da falha, pela abordagem fenomenológica que atribui a falha no mecanismo físico, por exemplo, degradação pelo calor, porém a mesma falha pode ser atribuída ao ser humano como má seleção de material ou de uma inadequada especificação de projeto. Números são apresentados graficamente pela Figura 3 (a) que fornece um bom guia para principais causas de falha nas peças de plástico.

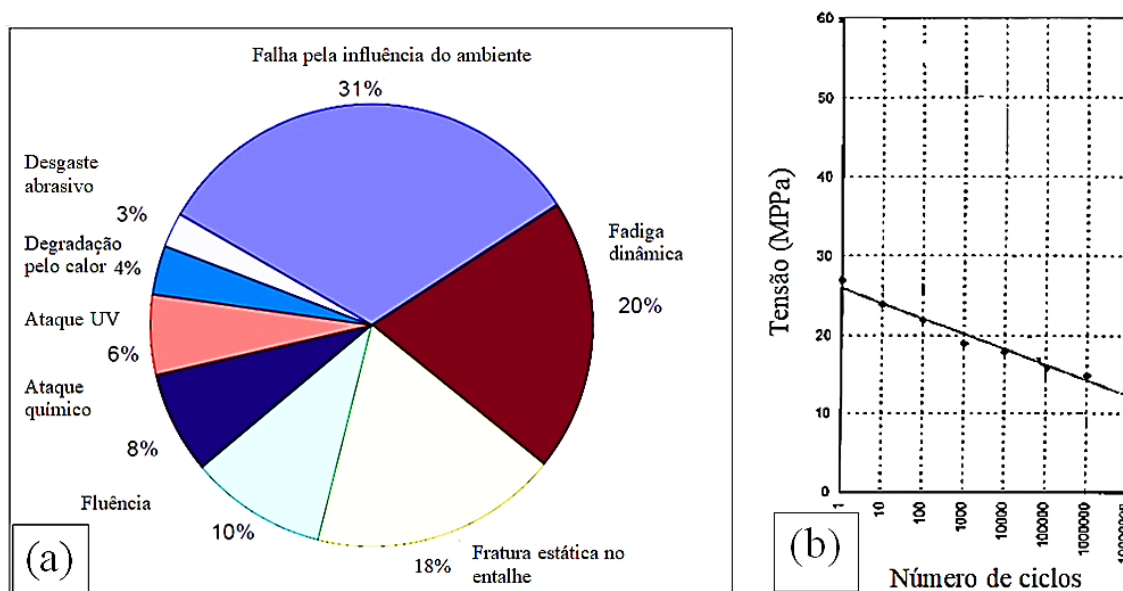


Figura 3: Representação gráfica de falhas. (a) principais causas de falha. (b) curva de resistência à fadiga do PP. Fonte: adaptado de Maier e Calafut (1999).

As fraturas frágeis são potencialmente mais perigosas porque não ocorre deformação de fácil observação no material. Em uma falha dúctil, por outro lado, grandes deformações permanentes ocorrem antes da ruptura e serve como um aviso valioso (CHANDA et al., 2008).

Chanda et al. (2008) afirmam que, se o componente de plástico apresentar-se como usinado, marcas da ferramenta de usinagem podem contribuir acrescentando concentração de tensão mecânica e conseqüentemente nucleação de trincas na superfície do componente. No entanto, se o componente for moldado, é mais provável que trincas por fadiga se desenvolvam a partir de vazios formados durante o fluxo do material, como exemplo bolhas de ar (CHANDA et al., 2008).

## 2. METODOLOGIA

Após um período de meses de uso, a alça de remoção da tampa da caixa de gordura apresentou falha prematura. De acordo com especificações gravadas em alto relevo na parte inferior da tampa, o material informado pelo fabricante é o polipropileno (PP). Segundo o fabricante a tampa possui característica hermética, ou seja, a geometria na região das bordas tem como objetivo um fechamento que impede a passagens de odores. A Figura 4 apresenta um modelo de caixa de gordura idêntico ao utilizado no presente trabalho.



Figura 4: Modelo da caixa de gordura. Fonte: adaptado de Malton do Brasil (2020).

No entanto, essas bordas oferecem resistência mecânica no trabalho de retirada da tampa para limpeza periódica do compartimento de filtragem de resíduos sólidos. A alça é submetida a esforços de tração durante a retirada da tampa, a estrutura a cada ciclo de abertura, inicia o acúmulo de danos principalmente em regiões concentradoras de tensão mecânica. A falha apresentou-se repentinamente, embora não foi possível realizar observações durante a fase de início e propagação da trinca e a contagem do número de abertura da tampa. Como mencionado anteriormente, foi observado a falha repentina da alça e uma análise visual foi realizada conforme Figura 5.

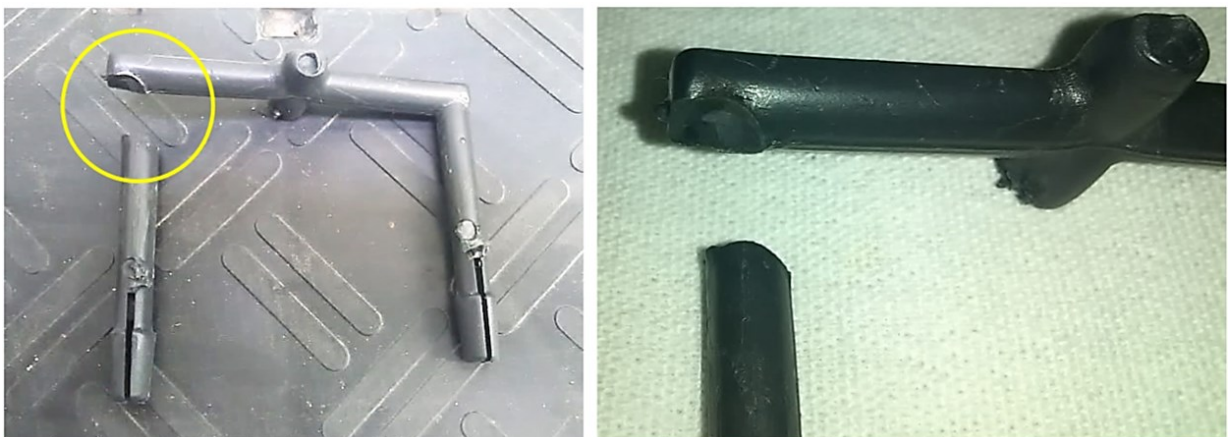


Figura 5: Falha na alça da tampa.

A falha ocorreu em umas das extremidades na região superior da alça e o exame macroscópico das superfícies de fratura foi realizado por meio de uma lupa eletrônica via porta universal, auxiliada pelo *software* de imagem *Yawcam.Ink* versão 0.6.1.

As extremidades possuem regiões concentradoras de tensão que podem apresentar, com maior rapidez, trincas por fadiga mecânica e o colapso do componente. As condições do ambiente onde a caixa de gordura foi instalada possui cobertura contra raios solares e a área na vizinhança da tampa da caixa é livre de ataques mecânicos, ou seja, a região da tampa não sofre solicitações por fluxo de pessoas caminhando ou impacto de objetos sobre a superfície da tampa. Após esta etapa, foi realizado um ensaio por meio da técnica do líquido penetrante no intuito de verificar visualmente a existência de trincas na superfície da alça, entretanto não foi detectado a existência de mais trincas, conforme Figura 6.



Figura 6: Verificação de trincas por líquido penetrante.

## 2.1 Material e modelo virtual

Para realização das simulações computacionais foi utilizado o *software* de modelagem e simulação numérica *Solidworks Simulation*® versão 2019, desenvolvido pela *Dassault Systèmes*.

O material utilizado nas simulações foi o plástico PP definido como elástico não linear no *software* e foi utilizado os valores médios das propriedades mecânicas sugeridas por Callister (2000), e mensurada por Parmentier e Santos (2007), conforme Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânica do material para a simulação computacional.

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidade kg/m <sup>3</sup>
Polipropileno	1,3	36,2	34,1	0,4	903

Para realização da simulação computacional por elementos finitos, foi feita uma modelagem virtual em 3 dimensões com base nas dimensões do componente real. Foram aplicadas condições para o processamento virtual do problema, tais como: delimitação de uma área para aplicação da força, restrições de translações e rotações; conforme Figura 7.

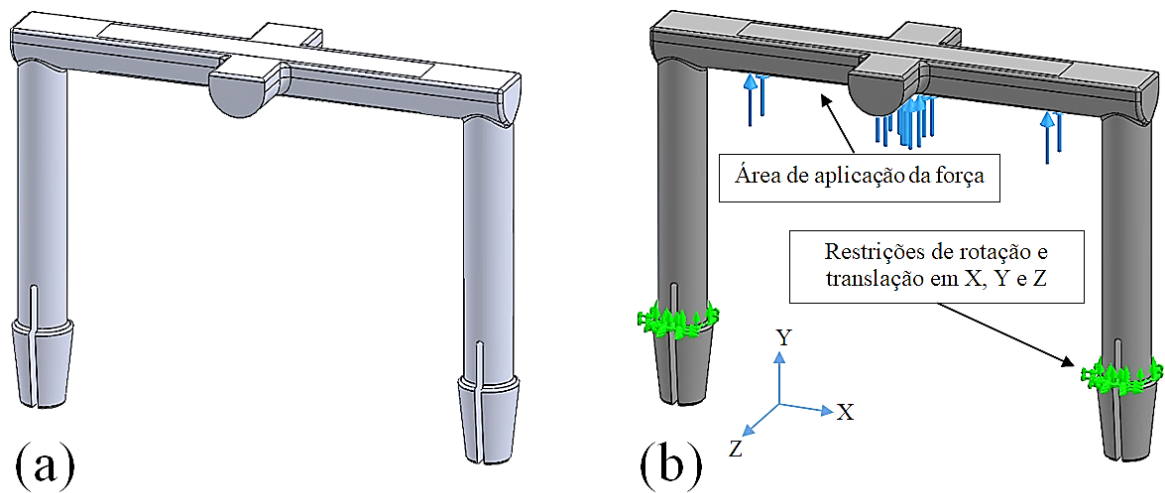


Figura 7: Modelo virtual. (a) modelagem 3D. (b) condições de contorno.

A discretização do modelo virtual foi realizada no modo fino, ou seja, alta densidade de malha selecionada na caixa de ferramentas das propriedades de malha do *software*. Os parâmetros foram malha sólida com base em curvatura; elementos tetraédricos com tamanho máximo de 1,0 mm e tamanho mínimo 0,2 mm. A qualidade da malha foi de 98,8% com 206318 nós e 134771 elementos. A Figura 8 apresenta o modelo virtual na etapa da discretização por elementos finitos.

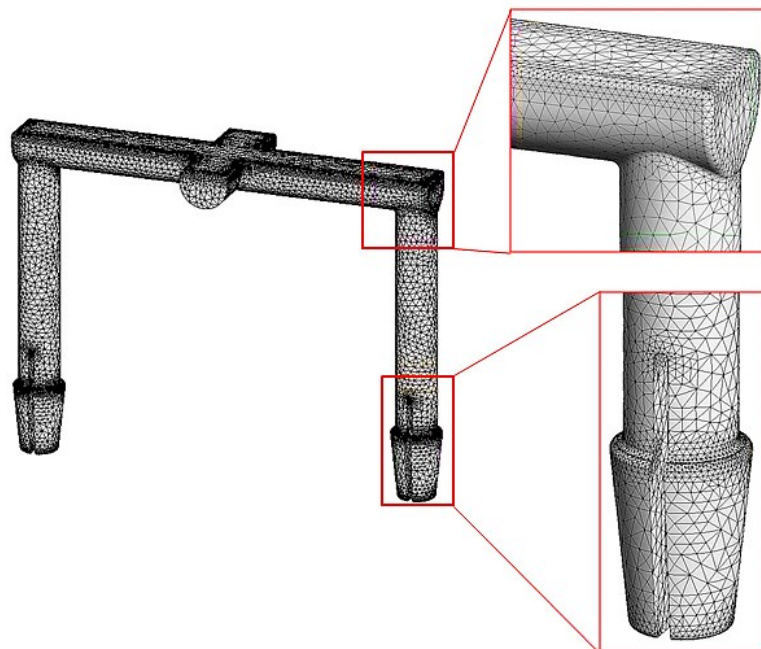


Figura 8: Discretização por meio de malha do modelo virtual.



Para a etapa da solução do modelo virtual foi utilizada a análise estática não linear, pelo o solucionador *Direct Sparse* e método iterativo de *Newton-Raphson* solucionando o modelo virtual em condição de temperatura de 22 °C.

Com relação a força de abertura da tampa da caixa, utilizou-se um equipamento portátil para medição da força máxima aplicada na alça. Este equipamento é digital da *Xtrad*® modelo XT-203 com gancho e capacidade máxima de medição de 50 kgf. A medição das forças de abertura foi possível por meio de uma alça em aço fabricada pelos autores deste trabalho, conforme apresentado pela Figura 9.

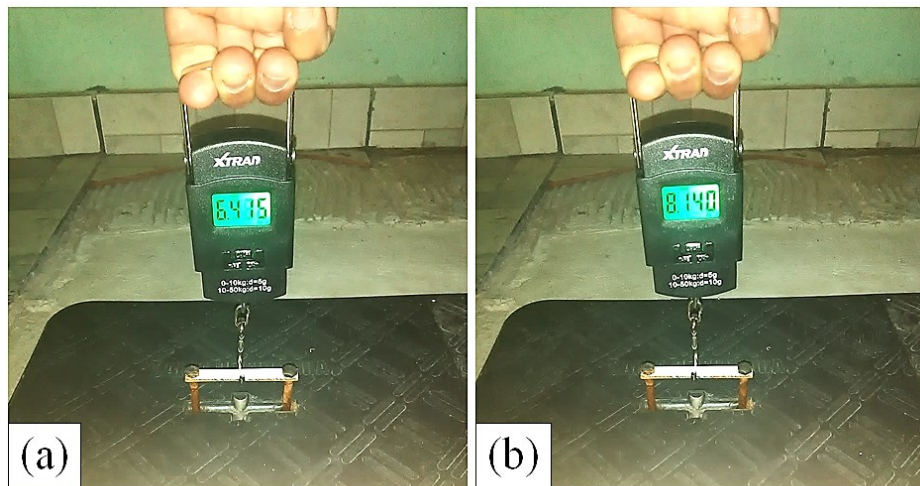


Figura 9: Medições das forças de abertura da tampa. (a) valor mínimo. (b) valor máximo.

Foram realizadas cinco medições com valores variando entre 6,4 e 8,1 kgf. A média aritmética de 7,4 kgf foi selecionada para ser aplicada na análise numérica do modelo virtual. Foram feitas simulações pelo método de elementos finitos no modelo virtual para obter os campos pelo critério de falhas de tensões de von Mises, a 1ª tensão principal, o fator de concentração de tensão e uma preliminar da curva de fadiga mecânica.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados numéricos da simulação computacional foram representados na forma de campo de tensões nos elementos finitos e exibidos em cores de acordo com a solução numérica.

Variações de tensões de von Mises foram encontradas no modelo virtual e o máximo valor de tensão de von Mises calculado pela simulação numérica foi de 30,4 MPa. A Figura 10 apresenta o campo de tensões de von Mises em toda superfície da alça e em detalhe a região com maior tensão.

A região que apresentou o valor máximo de tensão pelo critério de von Mises foi na superfície do raio na posição interna da parte superior da alça. A geometria da alça é simétrica, de acordo com os resultados essas regiões mencionadas apresentaram o mesmo valor, tanto para o lado esquerdo como o lado direito.

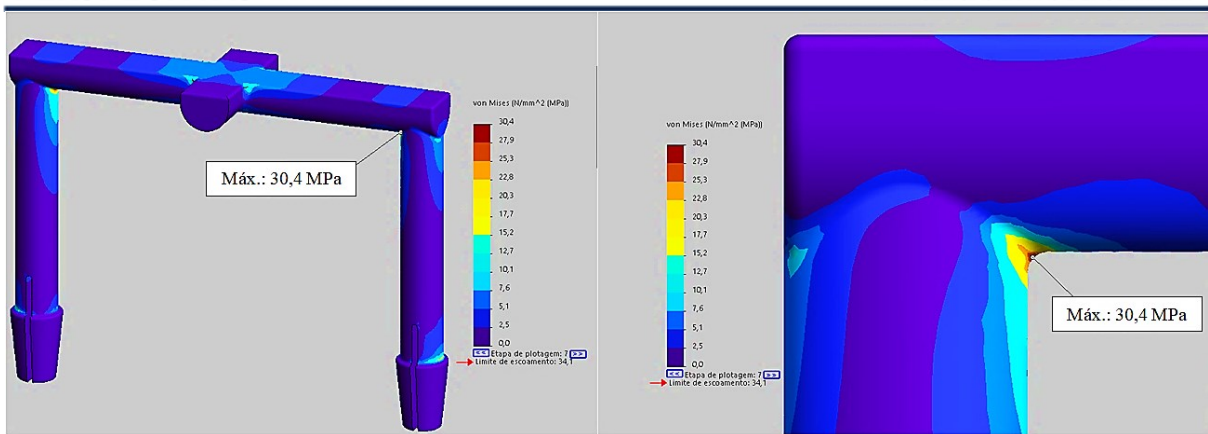


Figura 10: Simulação computacional de tensões pelo critério de von Mises.

Assim como no resultado pelo critério de von Mises, variações de 1ª tensão principal foram encontradas no modelo virtual e apresentadas conforme Figura 11.

A região que apresentou o valor máximo da 1ª tensão principal, assim como os resultados da simulação pelo critério de von Mises, foi na superfície do raio na posição interna da parte superior da alça e atende a mesma condição de simetria do modelo geométrico. O máximo valor da 1ª tensão principal calculado pela simulação numérica foi de 35 MPa. Este valor é 6% maior em percentual relativo ao valor médio do limite de resistência de escoamento do material PP segundo publicação de Maier e Clafut (1999), 33 MPa.

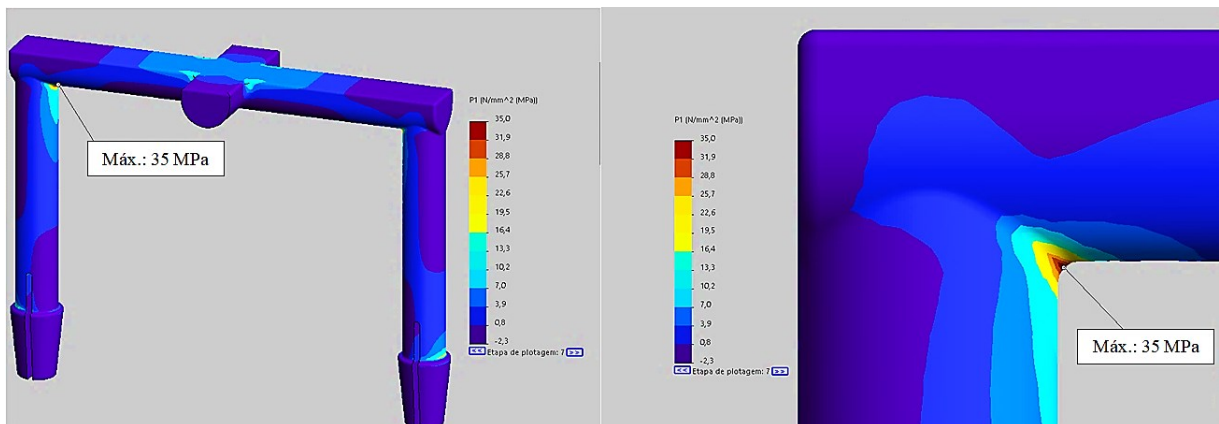


Figura 11: Simulação computacional da 1ª tensão principal.

### 3.1 Fator de concentração de tensão

A partir da borda, em distância linear de 0 até 5 mm, foram calculados os valores dos fatores de concentração de tensão, FCT, por meio da Equação 1.

$$FCT = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_5} \quad (1)$$

Onde:  $\sigma_{m\acute{a}x}$  é tensão obtida diretamente no nó correspondente ao elemento da malha e  $\sigma_5$  é a tensão média atuante na seção transversal do componente a uma distância de 5 mm a partir do pé do filete.

Os resultados dos valores calculados do FCT na parte superior e inferior, identificado pelas setas respectivamente, são apresentados conforme Figura 12 e Figura 13, respectivamente.

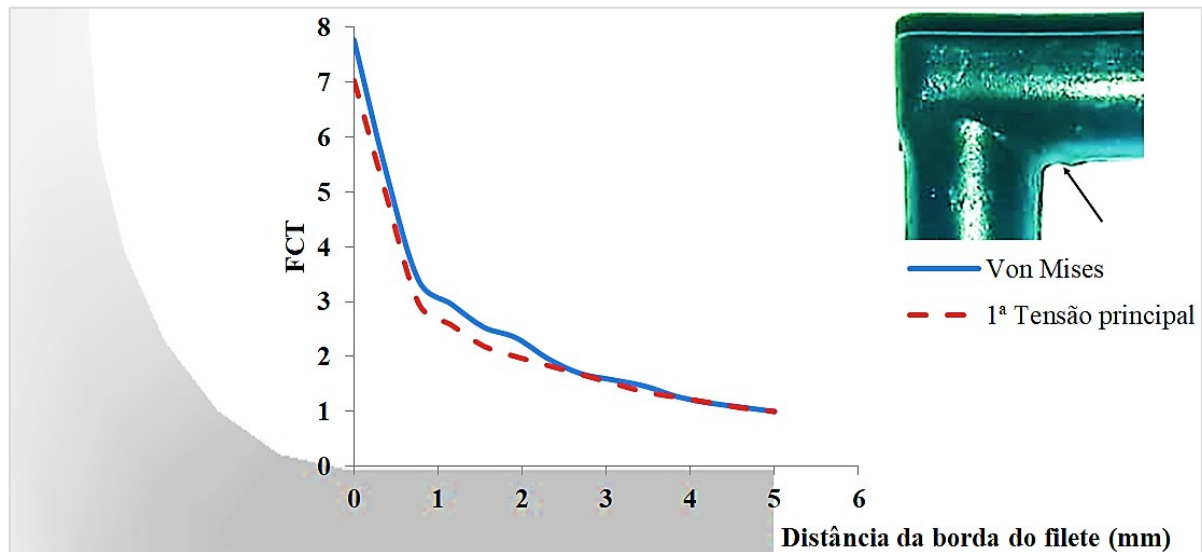


Figura 12: Valores dos FCT nas proximidades do filete da parte superior.

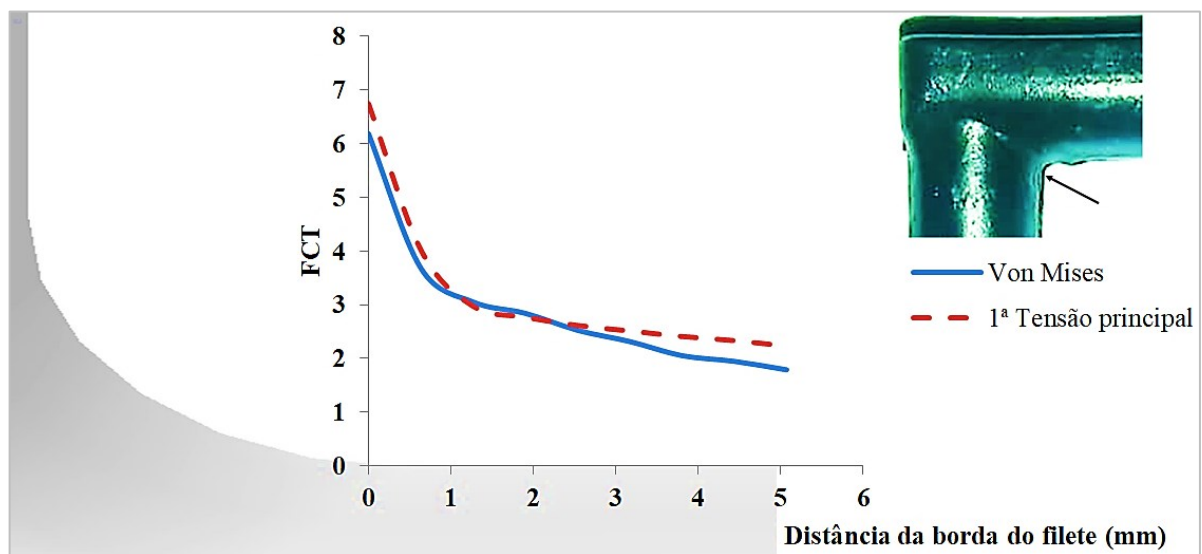


Figura 13: Valores dos FCT nas proximidades do filete da parte inferior.

A região do pé do filete apresentou o valor médio do FCT de 6,9 e um valor máximo da 1ª tensão principal de 26,3 MPa. Essa concentração de tensão é devido a discontinuidade geométrica como arestas agudas, contribuindo para picos de tensão que podem chegar ao valor de escoamento do material, dando início a um rápido acúmulo de danos e consequentemente nucleação e propagação de trinca.

### 3.2 Modo de falha

A inspeção local da superfície de fratura foi orientada a partir dos resultados publicados por Hayes et al. (2015).

Segundo Hayes et al. (2015), estrias ou linhas na superfície de fratura aparecem devido a uma variedade de condições incluindo fadiga, crescimento lento de trinca (CLT) e fratura frágil rápida (FFR). Elas são linhas curvas distintas em uma superfície de fratura que podem estar relacionadas à parada e/ou progressão da trinca através do material. A interpretação de estrias ou marca de praia em uma superfície de fratura frequentemente requerem integração de outras informações (fractografia e outros tipos de exame) sobre a falha específica, incluindo se a peça pode ou não ter sido submetida a tensões cíclicas e se a fratura ocorreu ou não em alta velocidade de propagação (HAYES et al., 2015).

A Figura 14 apresenta a superfície de fratura da alça (a) e o campo da 1ª tensão principal na superfície utilizando o modelo computacional numérico (b).

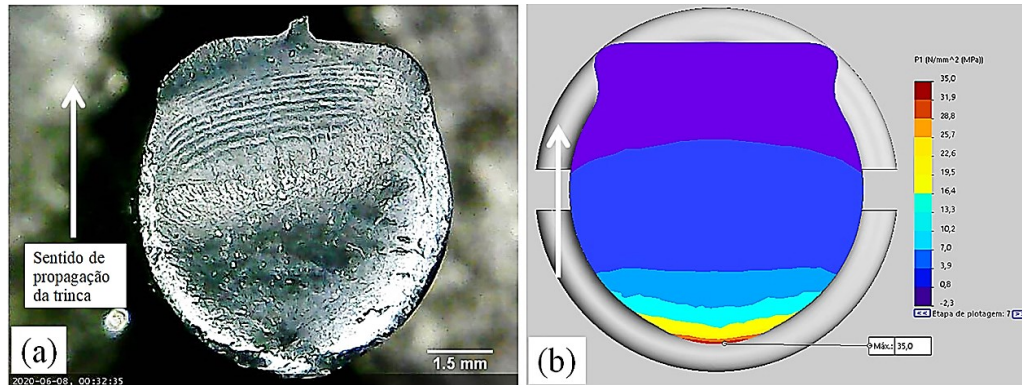


Figura 14: Superfície de fratura. (a) peça real fraturada. (b) modelo computacional.

De acordo com a análise da Figura 14 a trinca iniciou na região que apresentou maior valor de tensão, 35 MPa, ou seja, na borda do filete na parte superior interna da alça e propagou para o sentido externo, evidenciando uma concentração de tensão numa pequena região e contribuindo para o rápido estágio inicial da falha do material.

Observou-se durante o exame macroscópico, o aspecto fractográfico na superfície de fratura da alça em correlação ao diagrama esquemático sugerido por Hayes *et al.*, 2015, conforme detalhado na (Figura 15 (a)).

A superfície de fratura apresentou uma pequena região, indicada pela seta inferior da Figura 15 (b), de nucleação da trinca. Embora o recurso de imagens fractográficas de alta resolução não foi possível, a pequena região de nucleação da trinca apresentou possibilidade de aspecto de região vazia, ou seja, uma bolha de gás pode ter sido aprisionada durante o processo de fabricação ou inclusão de material estranho, vindo ser um concentrador de tensão contribuindo para nucleação de microtrincas. A seta superior da Figura 15 (b) evidencia uma região de superfície áspera. A Figura 15 (c) apresenta, pelas setas na parte esquerda, as trincas ramificadas longe da área de origem e em direção a região de nucleação da trinca e as setas na parte direita da imagem mostra as marcas de praia por fadiga.

Um *software* de processamento de imagens, o *ImageJ*® versão 5.0.3 desenvolvido pela *National Institutes Health* foi utilizado com a função *surface plot* acionada. Foi exportada para o *ImageJ*® uma parte central da imagem da superfície de fratura e realizou-se o tratamento para imagem 3D aproximada, conforme Figura 16.

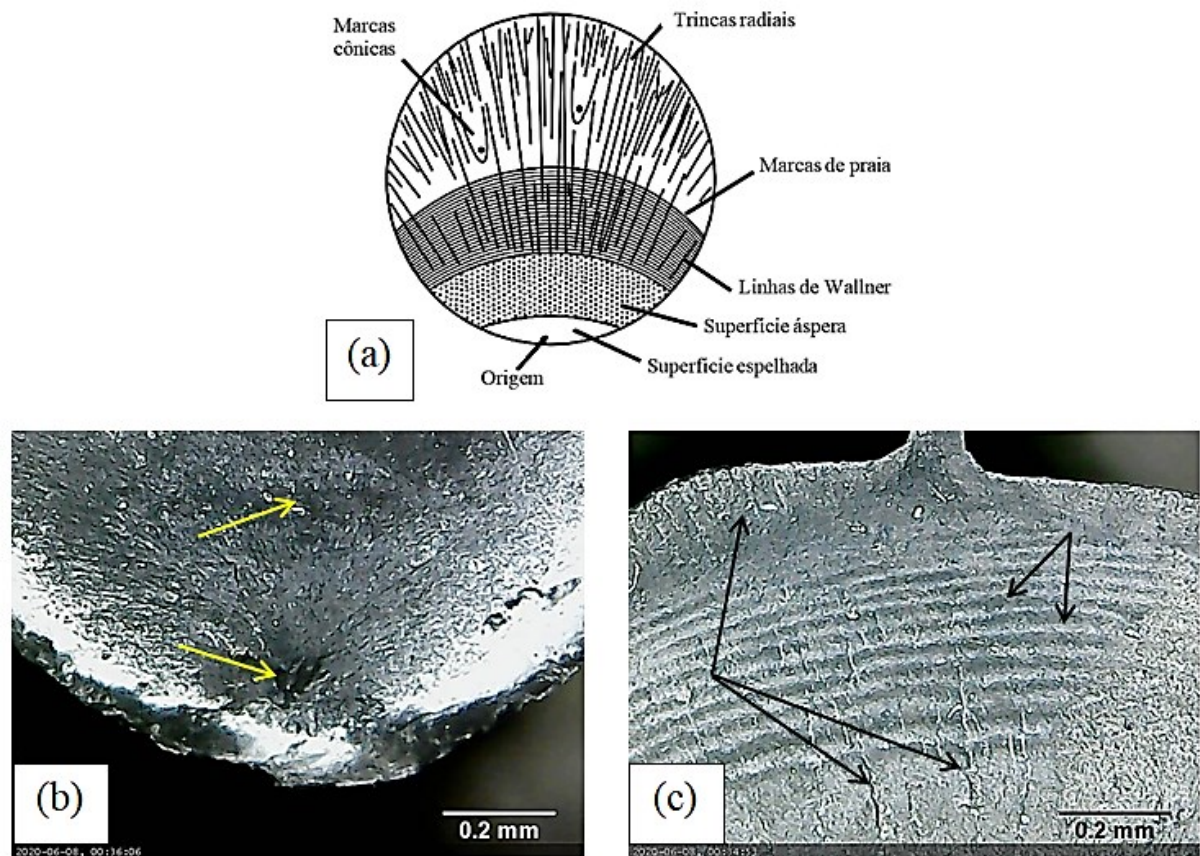


Figura 15: Exame macroscópico. (a) diagrama esquemático de Hayes et al. (2015). (b) região inicial da trinca. (c) região final da falha.

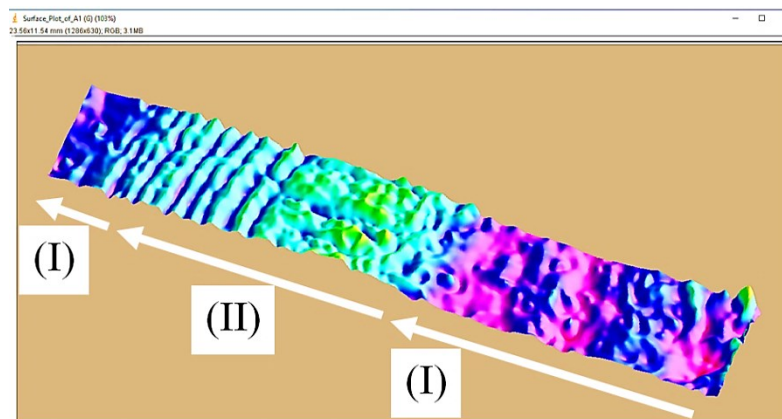


Figura 16: Área central da superfície da fratura.

No presente trabalho foi considerada uma distribuição uniforme da força na superfície de apoio para a retirada da alça e um esforço simétrico e incremental, entretanto os esforços aplicados pelo tempo não são progressíveis no sentido de rapidez de retirada da tampa, imposta de indivíduo para indivíduo. Nesse sentido, há uma variação na velocidade de propagação da trinca através da seção transversal do componente. Existe a possibilidade de que a velocidade da trinca nas regiões (I) da Figura 16 seja maior que na região (II) Figura 16.

### 3.3 Estimativa de vida por fadiga

Segundo Maier e Calafut (1999), o comportamento à fadiga mecânica do polímero é geralmente sensível a temperatura, frequência de sollicitação mecânica e ao ambiente, conforme bem como peso molecular, densidade de peso molecular e envelhecimento. Curvas tensão – número de ciclos ( $\sigma - N$ ) que não representam esses efeitos devem ser usadas com cautela. A resistência à fadiga mecânica também será afetada pelo histórico de processamento já que a facilidade de iniciação de trinca depende se falhas ou imperfeições estão presentes no material (MAIER & CALAFUT., 1999). A Figura 17 apresenta uma curva  $\sigma - N$  com dados obtidos dos ensaios de fadiga mecânica realizados por Eftekhari e Fatemi (2016), sendo o número de ciclos está em escala logarítmica.

Segundo Eftekhari e Fatemi (2016) o ensaio foi realizado em laboratório a temperatura ambiente de 23 °C, corpo de prova com seção cilíndrica, exposta à falha, de 8 mm de diâmetro, norma ASTM 606-92, e com o material PP puro sob flexão alternada. Os resultados de tensão por número de ciclos ou número de abertura da tampa, para servir de referência no presente trabalho, foram calculados pela relação de Basquin conforme Equação 2.

$$\sigma = \sigma'_f(N)^b \quad (2)$$

Onde:  $\sigma$  é a amplitude de tensão ou tensão máxima,  $\sigma'_f$  e  $b$  são os coeficiente e expoente, 37,6 MPa e -0,052 respectivamente.

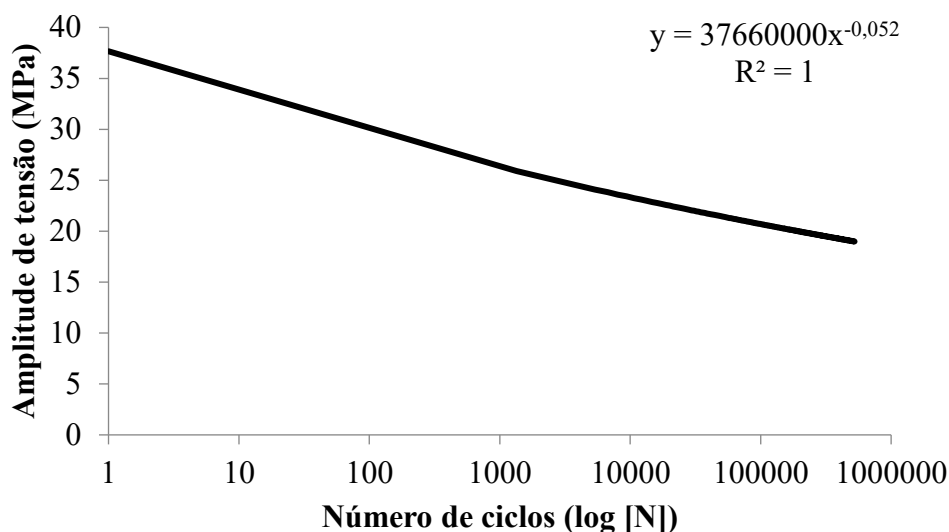


Figura 17: Curva  $\sigma - N$  do polipropileno puro. Fonte: adaptado de Eftekhari e Fatemi (2016).

Comparando os valores de máxima tensão do gráfico da Figura 17 com o valor da 1ª tensão principal máxima calculada numericamente para a alça, cerca de 35 MPa, haverá um possível escoamento do material e nucleação de trinca na região do filete com aproximadamente 4 ciclos, ou seja, 4 retiradas da tampa da caixa de gordura. Diante disso, foram realizadas 4 simulações numérica adicionando 0,65 mm no raio do filete de 0,6 mm, variando portanto de 1,25 à 3,2 mm, conforme Figura 18.

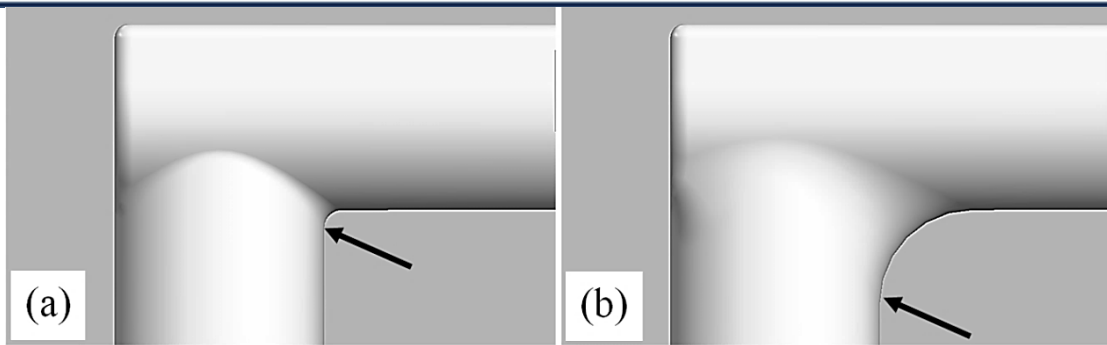


Figura 18: Variação do filete. (a) tamanho inicial. (b) tamanho final.

Os valores da tensão foram coletados no contorno de borda de cada tamanho de raio, representados graficamente por distância paramétrica conforme detalhado na Figura 19.

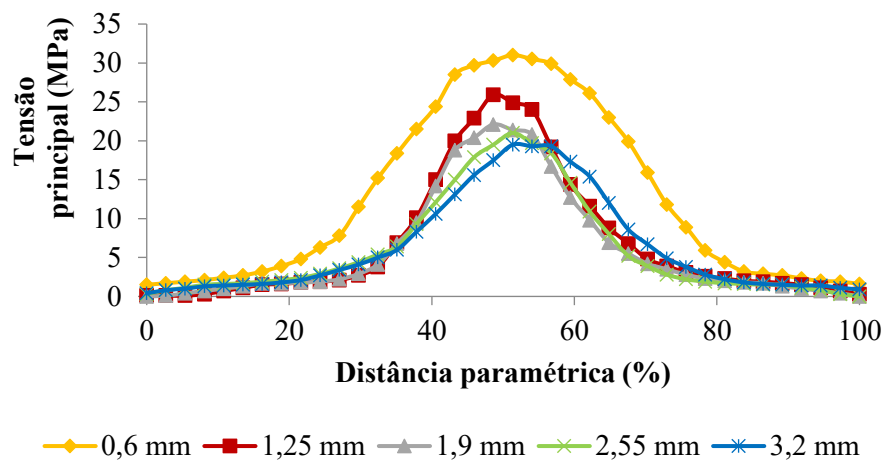


Figura 19: Curvas da primeira tensão principal para cada tamanho de raio.

De acordo com as simulações numéricas, utilizando um valor de raio de 3,2 mm a primeira tensão principal na borda do filete apresentou um valor máximo 62,9 % do valor utilizando um raio de 0,6 mm. O aumento no valor do raio diminuiu a concentração do fluxo de tensão mecânica na região onde foi observado a falha da peça. Este menor valor de tensão atingiu os 19,5 MPa, que em referência à curva de fadiga mecânica utilizada na Figura 17 fornece uma previsão de vida da peça em aproximadamente 331410 ciclos.

#### 4. CONCLUSÕES

Utilizando um modelo virtual, as simulações numéricas apresentaram regiões concentradoras de tensão mecânica na forma de campo de tensões. De acordo com os resultados das simulações, a região que apresentou valor de 35 MPa da primeira tensão principal foi na superfície do filete na parte interna da alça, valor acima do limite de resistência ao escoamento do material de acordo com a literatura, justificando o grande acúmulo de danos e posteriormente o início de trinca. O exame da superfície sugere que ocorreu uma rápida propagação de trinca até uma fase de marcas de praia e posteriormente ocorreu uma fratura instável da peça. Embora regiões geométricas de acordo com o projeto da peça apresentem concentração de tensão, vazios na seção transversal da peça ocasionados pelo processo de fabricação contribuem também para concentração de tensão e conseqüentemente nucleação de trincas e falha do material. Realizando a adequação do projeto com o aumento do valor do raio do filete para 3,2 mm a tensão máxima no pé do filete foi de 19,5 MPa, fornecendo maior durabilidade à peça.

Simulações numéricas com o intuito de otimização geométrica de um modelo de alça poderá ser feita para uma adequação do projeto original da peça e um teste experimental de fadiga mecânica simulando as condições de forças aplicadas no instante de retirada da tampa, poderá certificar o componente para uma maior durabilidade da peça.

## 5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E606-92. **Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing**. West Conshohocken, PA, 2004.

CALLISTER, W. D.; MIRANDA, P. E. V. de; SOARES, S. M. S. **Ciência e engenharia de materiais : uma introdução**. 5. ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos, ISBN 8521612885, 2000.

CHANDA, M., SALIL, K. R. **Plastics Fundamentals: properties, and testing**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

EFTEKHARI, M.; FATEMI, A. Creep behavior and modeling of neat, talc-filled, and short glass fiber reinforced thermoplastics. *Composites Part B: Engineering*, v. 97, p. 68-83, 2016.

HAQUE, M. M.-U. et al. Fatigue analysis and fatigue reliability of polypropylene/wood flour composites. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 2, n. 3, p. 136-142, 2019.

HAYES, M.; EDWARDS, D.; SHAH, A. **Fractography in failure analysis of polymers**. Elsevier, 2015.

KARGER-KOCSIS, J. Fatigue performance of polypropylene and related composites. In: **Polypropylene**. Springer, Dordrecht, 1999. p. 227-232.

MAIER, C; CALAFUT, T. **Polypropylene: the definitive user's guide and databook**. William Andrew, 1999.

MALTON DO BRASIL. Disponível em: <<https://malltondobrasil.com.br/produto/caixa-de-gordura>>. Acesso: 16/06/2020, 2020.

PARMENTIER, M. C., SANTOS, M. A. V. **Caracterização da resina termoplástica de polipropileno utilizada na fabricação de cadeiras plásticas**. In: 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú, 2007.