



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Jairo Alonso Quintero Quintero

**Nova abordagem para caracterizar o comportamento cíclico de materiais viscoelásticos através do controle de energia. Estudo de caso do UHMWPE**

Florianópolis SC

2023

Jairo Alonso Quintero Quintero

**Nova abordagem para caracterizar o comportamento cíclico de materiais viscoelásticos através do controle de energia. Estudo de caso do UHMWPE**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de doutor.  
Orientador: Prof. Edison da Rosa, Dr.

Florianópolis SC

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Quintero Quintero, Jairo Alonso

Nova abordagem para caracterizar o comportamento  
cíclico de materiais viscoelásticos através do controle de  
energia: Estudo de caso do UHMWPE / Jairo Alonso Quintero  
Quintero ; orientador, Edison da Rosa, 2023.

145 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Fadiga. 3. Viscoelasticidade.  
4. Controle de energia. 5. Modelo de Huet-Sayegh/Dano. I.  
Rosa, Edison da. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
III. Título.

Jairo Alonso Quintero Quintero

**Nova abordagem para caracterizar o comportamento cíclico de materiais viscoelásticos através do controle de energia. Estudo de caso do UHMWPE**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. PABLO ANDRES MUNOZ ROJAS, Dr. Eng  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. ROGÉRIO MARCZAK, Dr. Eng.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.(a) EDUARDO ALBERTO FANCELLO, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) CARLOS RODRIGO DE MELLO ROESLER, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor.

---

Coordenação do Programa de  
Pós-Graduação POSMEC

---

Prof. Edison da Rosa, Dr.  
Orientador  
Florianópolis SC, 2023.

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha parceira de lutas, minha esposa Lisana Miled.

A minha companheira do laboratório a minha filha Maria Valentina e ao meu irmão Elver (in memoriam).

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por me ajudar a superar todos os obstáculos, por ser o meu refúgio, a minha fortaleza.

A minha família, - meus pais, - tios, - primos, - sobrinhos, - afilhados, - minha sogra, - minha esposa e em especial - minha filha pelo amor do dia a dia, Muchas Gracias.

A Carlos Quintero, meu irmão pelas contribuições técnicas para elaborar este trabalho.

Ao meu orientador Professor Edison da Rosa, agradeço pelos ensinamentos compartilhados, pelo apoio quando precisei, por ser meu pai no Brasil.

A Diocese de Caçador pelo apoio, em especial ao Bispo Don Cleocir, e meus amigos Ismael, Edy, Teo.

Aos Seminaristas do Convívio Emaús, em especial ao Alexandre Amorin, muito obrigado mesmo.

Ao presente de Deus, meu padrinho Marcelo Henrique Câmara por me acompanhar nas orações.

Aos meus amigos, Campo Elias Pallares, Kelly Rocio Niño, Hunter, Sergio, pelas contribuições em Python.

Ao meus amigos que fazem da minha vida o mais fácil possível, a todos que já tinha e os que foram surgindo ao longo deste trabalho, em especial aqueles que encontrei no caminho 7543.

Ao Programa de Pós-Graduado em Engenharia Mecânica pela oportunidade de estar no meio de um grupo competente de professores.

Agradeço aos colegas e professores do GRANTE e os laboratórios LEBm, LMP, LEPTEN, LabMat, que possibilitaram a realização da parte experimental deste trabalho.

Ao Hélio Irineu José, quem me ajudou na confecção dos corpos de prova.

Ao CNPq pelo apoio financeiro em forma de bolsa de estudos.

*“A variação da energia dissipada em relação ao dano  
como variável de controle em ensaios de fadiga:  
uma abordagem híbrida para materiais poliméricos”  
(J)*

## RESUMO

Ensaio de fadiga tradicionalmente são efetuados com controle de carga, indiretamente tensão, ou com controle de deslocamento, que pode levar a se considerar controle de deformação. No entanto, no caso de materiais poliméricos, com comportamento fortemente viscoelástico, essas estratégias apresentam inconvenientes, que podem ser superados, caso se adote um procedimento simultâneo, qual seja, de usar uma variável de controle baseada em energia, no caso deste trabalho usando o conceito da integral J. Um trabalho preliminar foi uma exaustiva pesquisa em bancos de patentes, sobre máquinas de ensaio de fadiga, buscando propostas para controle em energia, a qual levou a um resultado nulo. Nesta pesquisa, desenvolveu-se um novo tipo de controle chamado 'controle J' para ensaios cíclicos, em que J representa a variação da energia dissipada em relação ao dano. Ao adotar essa nova abordagem, para caracterizar o comportamento cíclico de materiais viscoelásticos, torna-se necessário calcular a energia dissipada, em tempo real, bem como o dano atuante no material. Na mecânica da fratura esse dano é tipicamente caracterizado pelo crescimento progressivo de uma trinca existente. No entanto, devido ao seu comportamento viscoelástico, o dano nos polímeros pode manifestar-se de forma distinta, não necessariamente como uma trinca, mas sim como alterações na estrutura das macromoléculas. Essas alterações podem ser detectadas por mudanças no módulo complexo, mas devido ao comportamento viscoelástico, torna-se necessário desacoplar as componentes do módulo complexo a partir do ângulo de fase, o que pode ser realizado utilizando a transformada discreta de Fourier em tempo real. Dessa forma, é possível calcular e utilizar o controle J como variável de controle do ensaio, corrigindo o parâmetro físico adotado, que consiste em um controle de deslocamento para iniciar o ensaio. Com o auxílio de um *feedback* calculado em um instante (*i*) para retroalimentar o sistema do ensaio, é viável ajustar a solicitação de entrada e manter o valor de J constante ciclo a ciclo. Para estabelecer J constante foi implementada uma metodologia de caracterização de materiais viscoelásticos programada em Python, e um *template* especialmente desenvolvido para esse novo tipo de controle na execução do ensaio em uma máquina MTS Acumen de 3 kN. Previamente conduziu-se uma série de ensaios fundamentados nos dois conceitos já existentes, além de ensaios DMA, que contribuíram para o entendimento do comportamento do material e seus parâmetros associados. Posteriormente, uma série de experimentos foram realizadas usando corpos de prova de pequenas dimensões feitos de *UHMWPE*. Os resultados obtidos com o controle J evidenciam uma variação constante da energia dissipada em relação ao dano. Paralelamente, por meio dos resultados do ensaio DMA, obteve-se um outro resultado relevante para esta pesquisa: a implementação do fator de dano (D) no modelo de Huet-Sayegh.

**Palavras-chave:** Fadiga; Viscoelasticidade; Controle de carga; Controle de deslocamento; DMA; Modelo de Huet-Sayegh/Dano; Controle J; *UHMWPE*.



## ABSTRACT

Fatigue tests are traditionally performed with load control, indirectly stress, or with displacement control, which can lead to considering strain control. However, in the case of polymeric materials, with strongly viscoelastic behavior, these strategies present drawbacks, which can be overcome if a simultaneous procedure is adopted, that is, to use an energy-based control variable, in the case of this work using the concept of the integral  $J$ . A preliminary work was an exhaustive research in patent banks, on fatigue testing machines, seeking proposals for control in energy, which led to a null result. In this research, a new type of control called 'control  $J$ ' was developed for cyclic tests, in which  $J$  represents the variation of the energy dissipated in relation to the damage. When adopting this new approach, to characterize the cyclic behavior of viscoelastic materials, it becomes necessary to calculate the dissipated energy, in real time, as well as the acting damage to the material. In fracture mechanics, this damage is typically characterized by the progressive growth of an existing crack. However, due to their viscoelastic behavior, damage to polymers can manifest itself distinctly, not necessarily as a crack, but rather as changes in the structure of macromolecules. These changes can be detected by changes in the complex modulus, but due to the viscoelastic behavior, it becomes necessary to decouple the components of the complex module from the phase angle, which can be accomplished using the discrete Fourier transform in real time. Thus, it is possible to calculate and use control  $J$  as a control variable of the test, correcting the physical parameter adopted, which consists of a displacement control to start the test. With the aid of a textitfeedback calculated in an instant ( $i$ ) to feed back the assay system, it is feasible to adjust the input request and keep the  $J$  value constant cycle by cycle. To establish  $J$  constant, a methodology for characterization of viscoelastic materials programmed in Python was implemented, and a textittemplate specially developed for this new type of control in the execution of the test in a 3 kN MTS Acumen machine. Previously, a series of tests based on the two existing concepts was conducted, in addition to DMA tests, which contributed to the understanding of the behavior of the material and its associated parameters. Subsequently, a series of experiments were carried out using small specimens made of textitUHMWPE. The results obtained with control  $J$  show a constant variation of the energy dissipated in relation to the damage. In parallel, through the results of the DMA assay, another relevant result was obtained for this research: the implementation of the damage factor ( $D$ ) in the Huet-Sayegh model.

**Keywords:** Fatigue; Viscoelasticity; load control; displacement control; DMA; Huet-Sayegh model/Damage;  $J$  control; *UHMWPE*.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Diferentes padrões de solicitação cíclica na fadiga . . . . .   | 32 |
| Figura 2 – Tipos de solicitações cíclica na fadiga e seus parâmetros . . . . .   | 33 |
| Figura 3 – Parâmetros típicos de solicitações cíclicas . . . . .   | 34 |
| Figura 4 – Ensaio de fadiga com controle de carga . . . . .  | 35 |
| Figura 5 – Ensaio de fadiga com controle de deslocamento . . . . .   | 36 |
| Figura 6 – Estimativa do dano de fadiga com base na Lei de Miner . . . . .   | 38 |
| Figura 7 – Representação da trinca conforme a sua deformação . . . . .   | 41 |
| Figura 8 – Solicitação monotônica - Energia de deformação na integral J . . . . .  | 42 |
| Figura 9 – Parâmetros do ciclo de histerese . . . . .  | 43 |
| Figura 10 – Ciclo de histerese estável . . . . .   | 44 |
| Figura 11 – Energia elástica e energia plástica . . . . .  | 45 |
| Figura 12 – Energia requerida para que o material falhe . . . . .  | 46 |
| Figura 13 – Comportamento de um material viscoelástico em um ensaio cíclico . . . . .  | 48 |
| Figura 14 – Representação da excitação e resposta dinâmica de um material viscoelástico - módulo complexo linear no plano complexo . . . . . | 49 |
| Figura 15 – Resultados DMA - $E_1$ , $E_2$ . . . . .   | 51 |
| Figura 16 – Representação do modelo de Huet . . . . .  | 55 |
| Figura 17 – Plano Cole-Cole - Modelo de Huet . . . . .   | 55 |
| Figura 18 – Interpretação do modelo Huet-Sayegh . . . . .  | 56 |
| Figura 19 – Desenho e dimensões do corpo de prova . . . . .  | 59 |
| Figura 20 – Dispositivo de corte . . . . .   | 60 |
| Figura 21 – Metodologia para o cálculo do ângulo de fase no controle J . . . . .   | 68 |
| Figura 22 – Metodologia de caracterização de materiais viscoelásticos utilizando o novo tipo de controle J . . . . .                         | 69 |
| Figura 23 – Resultado do ensaio monotônico no MTS Acumen . . . . .   | 71 |
| Figura 24 – Ensaio DMA 100 $\mu\text{m}$ 1,5,10 Hz . . . . .   | 72 |
| Figura 25 – Ensaio DMA 100 $\mu\text{m}$ , a: 1,5,10,20,25 Hz . . . . .  | 72 |
| Figura 26 – Resultados do ensaio DMA, frequências de 1, 5, 10, 20, 25 Hz . . . . .   | 73 |
| Figura 27 – Comportamento da variável monitorada: deslocamento . . . . .   | 74 |
| Figura 28 – Resultados dos ensaios com controle de carga mostrando os laços de histerese com deformação incremental . . . . .                | 75 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 29 – Compilação dos resultados com controle de deslocamento, com $R = 0,5$ $R = 0,69$ $R = 0,75$ , mostrando o comportamento de amolecimento da força . . . . . | 76  |
| Figura 30 – Comparação dos laços de histerese do ensaio com controle de deslocamento . . . . .   | 76  |
| Figura 31 – Resultado da amplitude do sinal com controle J . . . . .   | 79  |
| Figura 32 – Resultado do módulo de armazenamento $E_1$ com controle J . . . . .  | 79  |
| Figura 33 – Resultado do módulo de perda $E_2$ com controle J . . . . .  | 80  |
| Figura 34 – Resultado do módulo complexo $E^*$ com controle J . . . . .  | 80  |
| Figura 35 – Resultado da energia dissipada com controle J . . . . .  | 81  |
| Figura 36 – Resultado do dano com controle J . . . . .   | 81  |
| Figura 37 – Resultado de $J_n$ com controle J . . . . .  | 82  |
| Figura 38 – Resultado do $u_{max}$ com controle J . . . . .  | 82  |
| Figura 39 – Compilação dos resultados do dano com controle J . . . . .   | 85  |
| Figura 40 – Compilação dos resultados do módulo complexo com controle J . . . . .  | 85  |
| Figura 41 – Compilação dos resultados do módulo $E_2$ com controle J . . . . .   | 86  |
| Figura 42 – Compilação dos resultados $J_N$ com controle J . . . . .   | 86  |
| Figura 43 – Representação dos dados experimentais e o modelo Huet-Sayegh no plano Cole-Cole do <i>UHMWPE</i> a 1 Hz e 5 Hz . . . . .                                   | 90  |
| Figura 44 – Resultados das curvas isotermas do ensaio DMA . . . . .  | 91  |
| Figura 45 – Representação do modelo Huet-Sayegh com dano . . . . .   | 94  |
| Figura B.1 – Processo de análise de patentes . . . . .   | 108 |
| Figura B.2 – Definição da ontologia . . . . .  | 109 |
| Figura D.1 – PC com superfície com fratura, e os estágios do dano . . . . .  | 129 |
| Figura D.2 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura do <i>UHMWPE</i> com ampliação de 50x . . . . .  | 130 |
| Figura E.1 – Ensaio DMA: <i>offset</i> . . . . .   | 132 |
| Figura E.2 – Ensaio DMA, 20 $\mu\text{m}$ , 1Hz . . . . .  | 133 |
| Figura E.3 – Curva típica resultante dos dados obtidos usando na técnica de DMA . . . . .  | 134 |
| Figura E.4 – Curva típica para materiais poliméricos: comportamento do módulo $E_1$ com variação da temperatura ( $T^o$ ) . . . . .                                    | 135 |
| Figura E.5 – Comportamento viscoelástico de um material, curvas DMA . . . . .  | 136 |
| Figura E.6 – Curva dinâmico-mecânica de uma mistura de <i>UHMWPE</i> com PP . . . . .  | 137 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura E.7–Curvas DMA para módulo de armazenamento e tangente de perda .                 | 137 |
| Figura E.8–Resultado do ensaio DMA para PP multifrequência (1, 2, 5, 10 Hz) .            | 138 |
| Figura G.1–Comportamento da temperatura no ensaio com controle de deslocamento . . . . . | 145 |

## LISTA DE QUADROS

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 1 – Delineamento dos experimentos, controle de carga . . . . .      | 61  |
| Quadro 2 – Delineamento dos experimentos, controle de deslocamento . . . . | 62  |
| Quadro 3 – Delineamento dos experimentos, controle J . . . . .             | 64  |
| Quadro 4 – Parâmetros do modelo Huet-Sayegh . . . . .                      | 90  |
| Quadro 5 – Palavras-chave 1 . . . . .                                      | 110 |
| Quadro 6 – Palavras-chave 2 . . . . .                                      | 118 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 – Propriedades do UHMWPE analisado . . . . .                        | 58  |
| Tabela 2 – Planejamento dos experimentos, controle de deslocamento . . . . . | 62  |
| Tabela 3 – Planejamento dos experimentos, controle J . . . . .               | 64  |
| Tabela 4 – Mapeamento de patentes . . . . .                                  | 110 |
| Tabela 5 – Máquinas de fadiga. . . . .                                       | 119 |
| Tabela 6 – Resultados . . . . .  | 139 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|               |   |
|---------------|---|
| ASTM          | American Society for Testing and Materials  |
| <i>UHMWPE</i> | Ultra High Molecular Weight Polyethylene  |
| CP            | Corpo de Prova  |
| PP            | Polipropileno   |
| PC            | Policarbonato   |
| PTMT          | Poli tereftalato de tetrametileno   |
| PS            | Poliestireno  |
| DMA           | Ensaio dinâmico mecânico  |
| G01N          | Investigação ou análise de materiais determinando suas propriedades químicas ou físicas |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### ALFABETO LATINO:

|          |   |
|----------|---|
| $R$      | Razão de tensões cíclicas   |
| $E^*$    | Módulo complexo, MPa  |
| $E_1$    | Módulo complexo, parte real associada à energia armazenada, MPa                                   |
| $E_2$    | Módulo complexo, parte imaginária associada à energia perdida por atrito interno do material, MPa |
| $E_c$    | Energia cinética, J   |
| $N$      | Número de ciclos para falha   |
| $N_{tr}$ | Número de ciclos de transição   |
| $F$      | Força, N  |
| $U_N$    | Energia dissipada por ciclo, J  |
| $t$      | Tempo   |
| $K$      | Fator de intensidade de tensão  |
| $PM$     | Peso molecular, g/mol   |
| $T_g$    | Temperatura de transição vítrea, °C   |
| $T_m$    | Temperatura de fusão, °C  |
| $a$      | Tamanho da trinca   |

### ALFABETO GREGO:

|               |  |
|---------------|--|
| $\varphi$     | Ângulo de fase   |
| $\tan\varphi$ | Tangente de perda, relação entre os módulos de perda e armazenamento |



|                       |   |
|-----------------------|---|
| $\beta_a, \gamma_a$   | Temperaturas de transição, relacionadas com relaxações de grupos, ou parte de grupos laterais presentes nas fases amorfas das cadeias poliméricas |
| $\alpha_c, \alpha'_c$ | Temperaturas de transição, relacionadas às fases cristalinas associadas a processos de fusão  |
| $\sigma_m$            | Tensão média, MPa   |
| $\sigma_{max}$        | Tensão máxima, MPa  |
| $\sigma_{min}$        | Tensão mínima, MPa  |
| $\sigma_a$            | Tensão alternada, MPa   |
| $\sigma_f$            | Tensão real de fratura, MPa   |
| $\sigma_F$            | Tensão limite de fadiga, MPa  |
| $\sigma_N$            | Tensão de resistência à fadiga para N ciclos, MPa   |
| $\Delta\sigma$        | Faixa de variação de tensão, MPa  |
| $\Delta\varepsilon$   | Faixa de variação de deformação   |
| $\varepsilon$         | Deformação  |
| $\varepsilon_e$       | Deformação elástica   |
| $\varepsilon_p$       | Deformação plástica   |
| $\varepsilon_{min}$   | Deformação mínima   |
| $\varepsilon_{max}$   | Deformação máxima   |
| $\mu$                 | Deslocamento, mm  |
| $\sigma_0$            | Amplitude da tensão   |
| $\varepsilon_0$       | Amplitude da deformação   |
| $\omega$              | frequência, rad/s   |
| $\Delta H$            | Entalpia  |

|             |                             |
|-------------|-----------------------------|
| $\Delta S$  | Entropia                    |
| $U_{ciclo}$ | Energia dissipada por ciclo |
| $U^t$       | Energia total               |
| $U^p$       | Energia plástica            |
| $U^e$       | Energia elástica            |

### **MODELO HUET-SAYEGH**

|                |   |
|----------------|---|
| $E_{\infty}$   | Módulo elástico instantâneo, MPa  |
| $E_0$          | Módulo estático, MPa  |
| $i$            | Número complexo   |
| $\omega$       | Frequência de pulsação = $2 \pi f$ , rad/s  |
| $f$            | Frequência de solitação, Hz   |
| $k, h$         | Expoentes dos <i>spring-pot</i> (SP) do modelo, onde $1 > h > k > 0$                          |
| $\theta$       | Temperatura, °C   |
| $\tau(\theta)$ | Tempo de retardo, característico, associado à variação da temperatura dos <i>spring-pot</i> . |
| $\delta$       | Constante adimensional em função da natureza do material                                      |

## ENSAIO COM CONTROLE J:

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| $J = dU/dD$                    | Varição da energia dissipada em relação ao dano, $J/m^3$                    |
| U                              | Energia dissipada, $J/m^3$  |
| D                              | Dano sofrido pelo material  |
| $u_{min}$                      | Deslocamento mínimo, mm   |
| $u_{max}$                      | Deslocamento máximo, mm   |
| A, B, C                        | Correspondem aos cálculos dos parâmetros iniciais                           |
| N                              | Corresponde ao ciclo N  |
| DAQ A, DAQ B, DAQ C, DAQ N     | Armazenamento interno no equipamento MTS<br>Acumen                          |
| $u_{max1}, u_{max2}, u_{max3}$ | Variáveis relacionadas ao deslocamento máximo aplicado durante o ensaio, mm |

## SUMÁRIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>                                 | <b>22</b> |
| 1.1          | CONSIDERAÇÕES INICIAIS                            | 22        |
| 1.2          | PROBLEMA DE PESQUISA                              | 24        |
| 1.3          | OBJETIVO GERAL                                    | 25        |
| <b>1.3.1</b> | <b>Objetivos específicos</b>                      | <b>25</b> |
| 1.4          | JUSTIFICATIVA DA PESQUISA                         | 26        |
| 1.5          | METODOLOGIA                                       | 27        |
| 1.6          | LIMITAÇÕES DA TESE                                | 27        |
| 1.7          | ESTRUTURA DA TESE                                 | 28        |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO TEÓRICA</b>                            | <b>30</b> |
| 2.1          | INTRODUÇÃO  | 30        |
| 2.2          | MODO DE FALHA: FADIGA                             | 30        |
| 2.3          | SOLICITAÇÕES CÍCLICAS NO ENSAIO DE FADIGA         | 32        |
| 2.4          | AUGUST WÖHLER                                     | 34        |
| <b>2.4.1</b> | <b>Ensaio com controle de carga</b>               | <b>35</b> |
| <b>2.4.2</b> | <b>Ensaio com controle de deslocamento</b>        | <b>36</b> |
| 2.5          | EVOLUÇÃO DO DANO NA FADIGA                        | 37        |
| <b>2.5.1</b> | <b>Integral J</b>                                 | <b>39</b> |
| 2.6          | ENERGIA DISSIPADA DURANTE UM CICLO DE SOLICITAÇÃO | 43        |
| 2.7          | MÓDULO COMPLEXO                                   | 47        |
| 2.8          | MODELO DE HUET-SAYEGH                             | 52        |
| <b>2.8.1</b> | <b>Viscoelasticidade fracionária</b>              | <b>54</b> |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA</b>                                | <b>57</b> |
| 3.1          | INTRODUÇÃO  | 57        |
| 3.2          | MATÉRIA PRIMA                                     | 58        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Confecção dos corpos de prova</b>              | <b>58</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>Condicionamento dos corpos de prova</b>        | <b>59</b> |
| 3.3          | ENSAIOS MONOTÔNICOS                               | 59        |
| 3.4          | ENSAIO DMA  | 60        |
| 3.5          | ENSAIO COM CONTROLE DE CARGA                      | 61        |
| 3.6          | ENSAIO COM CONTROLE DE DESLOCAMENTO               | 61        |
| 3.7          | ENSAIO COM CONTROLE J                             | 63        |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 3.7.1   | <b>Introdução</b>   | 63  |
| 3.7.2   | <b>Planejamento dos experimentos, controle J</b>  | 64  |
| 3.7.3   | <b>Critério de parada para o controle J</b>   | 65  |
| 3.7.4   | <b>Definição dos parâmetros iniciais do ensaio com controle J</b>                         | 65  |
| 3.7.5   | <b>Rotina para análise dos ensaios com controle J</b>                                     | 67  |
| 4       | <b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b>  | 70  |
| 4.1     | INTRODUÇÃO  | 70  |
| 4.2     | RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÔNICOS  | 70  |
| 4.3     | RESULTADOS DOS ENSAIOS USANDO A TÉCNICA DMA   | 71  |
| 4.4     | RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CONTROLE DE CARGA  | 74  |
| 4.5     | RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CONTROLE DE DESLOCA-<br>MENTO                                  | 75  |
| 4.6     | RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CONTROLE J   | 77  |
| 5       | <b>ANÁLISE E EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS</b>  | 83  |
| 5.1     | EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO COM CONTROLE J  | 83  |
| 5.1.1   | <b>Introdução</b>   | 83  |
| 5.2     | EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS DMA   | 87  |
| 5.2.1   | <b>Interpretação do modelo de Huet-Sayegh</b>   | 87  |
| 5.2.2   | <b>Aplicação do modelo reológico de Huet-Sayegh</b>                                       | 89  |
| 5.2.3   | <b>Implementação do fator dano (D) no modelo de Huet-Sayegh</b>                           | 91  |
| 6       | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>                                      | 95  |
|         | <b>Referências</b>  | 97  |
|         | <b>APÊNDICE A – PESQUISAS USANDO OU CONTROLE DE CARGA<br/>OU CONTROLE DE DESLOCAMENTO</b> | 104 |
|         | <b>APÊNDICE B – ANÁLISE DE PATENTES</b>   | 107 |
| B.1     | ANÁLISE DE PATENTES   | 107 |
| B.1.1   | <b>Definição da ontologia da tecnologia</b>   | 109 |
| B.1.2   | <b>Coleta de patentes e geração de vetor de palavras-chave</b>                            | 110 |
| B.2     | MÁQUINAS DE ENSAIOS DE FADIGA   | 117 |
| B.2.0.1 | Componentes estruturais de uma máquina de fadiga:   | 117 |
|         | <b>APÊNDICE C – FENÔMENO DA FADIGA NOS POLÍMEROS: ES-<br/>TUDO DE CASO O UHMWPE</b>       | 120 |
| C.1     | INTRODUÇÃO  | 120 |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
| C.2          | CARACTERÍSTICAS MOLECULARES . . . . .   | 122        |
| C.3          | ESTRUTURA CRISTALINA . . . . .  | 122        |
| <b>C.3.1</b> | <b>Fatores que afetam a cristalinidade do <i>UHMWPE</i> . . . . .</b>                             | <b>124</b> |
| C.4          | TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA . . . . .   | 127        |
| C.5          | FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES REOLÓGICAS . . . . .   | 127        |
|              | <b>APÊNDICE D – FALHA POR FADIGA NOS POLÍMEROS . . . . .</b>                                      | <b>129</b> |
|              | <b>APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS USANDO A TÉCNICA DMA . . . . .</b>                         | <b>132</b> |
|              | <b>APÊNDICE F – MATERIAL DE ESTUDO: RESULTADOS ENSAIO DMA . . . . .</b>                           | <b>139</b> |
|              | <b>APÊNDICE G – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA NO ENSAIO COM CONTROLE DE DESLOCAMENTO . . . . .</b> | <b>144</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O uso de materiais viscoelásticos em suas diversas aplicações requer que o comportamento dependente do tempo, como a fadiga e suas contribuições para a resposta mecânica em relação à falha, sejam consideradas no projeto de peças ou componentes.

A falha por fadiga é um dos principais modos de falha quando um material é submetido a solicitações cíclicas. Diferentes métodos e normas são utilizados para caracterizar o comportamento mecânico dos materiais e determinar sua vida (**N**). A vida **N** é definida pelo número de ciclos que o material pode suportar antes da falha, para um determinado nível de solicitação.

Na presente pesquisa destacam-se os dois métodos amplamente utilizados nos ensaios de fadiga até os dias de hoje:

(1) Realiza-se o ensaio com controle de carga, usando o modelo tensão vida ( $\sigma - N$ ): Para um corpo de prova sendo ensaiado com controle de carga, assumindo que a área da seção transversal permaneça constante, a tensão cíclica varia entre os limites de tensão mínima ( $\sigma_{min}$ ) e tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ), diretamente relacionados com os valores da força mínima ( $F_{min}$ ) e força máxima ( $F_{max}$ ). A deformação do material é livre, controlada apenas pela sua resposta mecânica às tensões cíclicas aplicadas.

(2) Realiza-se o ensaio com controle de deslocamento, usado o modelo deformação vida ( $\varepsilon - N$ ): No caso de um ensaio com controle de deslocamento ( $u$ ), a deformação oscila ciclicamente entre uma deformação mínima ( $\varepsilon_{min}$ ) e uma deformação máxima ( $\varepsilon_{max}$ ), diretamente relacionados com os valores da deslocamento mínimo ( $u_{min}$ ) e deslocamento máximo ( $u_{max}$ ). A tensão do material pode variar livremente, dependendo apenas da resposta cíclica do material.

Esta pesquisa propõe um novo método para o ensaio cíclico de materiais viscoelásticos, superando as limitações dos métodos convencionais. Atualmente, os métodos existentes estabelecem limites fixos para a solicitação ao longo do ensaio, impondo uma parcela mínima e máxima que o material deve suportar por um número determinado de ciclos.

A proposta desta pesquisa é desenvolver e implementar uma nova abordagem

que permita o recálculo e a modificação da solicitação de entrada de forma dinâmica. Isso significa que as solicitações aplicadas ao material durante o ensaio serão ajustadas continuamente com base nas informações obtidas, acompanhando o comportamento da tensão e da deformação simultaneamente ciclo a ciclo. Essa abordagem visa lidar de forma mais precisa com a perda de rigidez do material viscoelástico ao longo do ensaio.

Ao adotar esse método será possível uma adaptação mais precisa e personalizada às características do material viscoelástico em estudo. O uso do *feedback* contínuo permitirá um controle mais adaptativo das solicitações, considerando a natureza viscoelástica do material e suas variações ao longo do tempo.

Com essa abordagem espera-se obter resultados mais confiáveis e representativos sobre o comportamento cíclico dos materiais viscoelásticos. Isso contribuirá para uma melhor compreensão dos mecanismos de falha e da vida útil desses materiais quando submetidos a solicitações cíclicas, resultando em avanços no projeto e na utilização de componentes e estruturas viscoelásticas.

Portanto, a essência desta pesquisa concentra-se no método desenvolvido, que pode ser resumido da seguinte forma:

(3) Realizar o ensaio cíclico controlando a variação da energia dissipada em relação ao dano. Esse controle é denominado nesta pesquisa como controle **J**, e é representado pela equação  $\mathbf{J} = d\mathbf{U}/d\mathbf{D}$ . Na abordagem proposta, no início do ensaio, a solicitação oscila ciclicamente entre um deslocamento mínimo ( $u_{min}$ ) e um deslocamento máximo ( $u_{max}$ ) para identificar e armazenar os parâmetros iniciais do material. Em seguida, o controle J é iniciado por meio de um *feedback*. Dessa forma, o controle J ajustará, com ajuda do *feedback*, ciclo após ciclo, o deslocamento máximo ( $u_{max}$ ).

Destaca-se que o deslocamento mínimo ( $u_{min}$ ) será mantido constante, mas, com a variação do deslocamento máximo ( $u_{max}$ ) o resultado da razão do deslocamento mínimo dividido pelo deslocamento máximo será diferente para cada ciclo.

Essa abordagem possibilita uma adaptação contínua e dinâmica do ensaio, levando em consideração o comportamento do material, diretamente relacionada à perda da rigidez a cada instante de solicitação.



## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Existem diversas metodologias para realizar testes mecânicos e determinar as propriedades dos materiais, incluindo ensaios sob solicitações cíclicas. Esses ensaios são essenciais para prevenir danos e falhas indesejadas em produtos, desde que sejam adequadamente caracterizados. No entanto, é importante ressaltar que as condições de solicitação na vida real nem sempre são preestabelecidas, diferentemente dos ensaios cíclicos realizados em laboratório, nos quais o corpo de prova é submetido a um caminho fixo com uma solicitação mínima e máxima, controladas por carga ou deslocamento.

Portanto, é de extrema importância realizar a simulação das condições reais de aplicação dos materiais e levar em consideração as variáveis e parâmetros que afetam o seu comportamento. Isso inclui a consideração de fatores como variações na solicitação, temperatura, umidade, frequência e outros relevantes para a aplicação real do material. A inclusão dessas variáveis é crucial para uma caracterização mais precisa dos materiais, garantindo uma compreensão completa de seu desempenho em condições reais de uso.

Pesquisadores têm estudado materiais como o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM ou *UHMWPE*), utilizado em superfícies de implantes ortopédicos devido à sua biocompatibilidade, excelente resistência ao desgaste e propriedades mecânicas, como tenacidade, baixa resistência à fluência, baixa absorção de água, alta rigidez e alta resistência à fadiga em relação a outros polímeros. Percebe-se que analisar o comportamento de um material polimérico sob condições de solicitação cíclica é um desafio complexo.

Como mencionado anteriormente, há diversas variáveis que podem afetar a vida de fadiga de um material. No Apêndice A, é possível encontrar um resumo de algumas pesquisas que estudam essas variáveis.

No entanto, é importante ressaltar que as pesquisas existentes até o momento utilizam o controle de carga ou deslocamento como método de ensaio. Apesar de haver uma quantidade considerável de trabalhos publicados na área do comportamento à fadiga, todos eles adotam uma solicitação cíclica com uma variação fixa como controle do ensaio. Essa lacuna na literatura motivou a implementação da nova abordagem proposta. A metodologia foi desenvolvida com o intuito de superar as limitações dos métodos convencionais, permitindo levar em consideração as características viscoe-

lásticas do material e a adaptação das solicitações de acordo com suas características singulares.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Implementar uma nova abordagem para caracterizar o comportamento cíclico de materiais viscoelásticos. Essa abordagem é desenvolvida a partir das duas técnicas existentes, porém, diferencia-se ao não impor condições fixas ao comportamento do material, como é feito no controle de deslocamento ou no controle de carga, onde uma solicitação mínima e máxima são fixadas até a falha ocorrer. Em vez disso, será utilizado o controle J, definido nesta pesquisa como a variação da energia dissipada em relação ao dano ( $J = dU/dD$ ). O objetivo é manter a variação de J constante ao longo do ensaio. Para ilustrar a aplicação dessa abordagem, será realizado um estudo de caso investigando o comportamento cíclico do *UHMWPE*.

#### 1.3.1 Objetivos específicos

1. Estudar, através dos ensaios já existentes: controle de deslocamento ( $u$ ), controle de carga ( $F$ ), e *DMA*, o comportamento dos parâmetros envolvidos do *UHMWPE*, em especial o módulo complexo ( $E^*$ );
2. Desenvolver uma rotina de ensaio para implementá-la no MTS Acumen<sup>1</sup>, capaz de monitorar simultaneamente os sinais de carga e deslocamento controlando a variação da energia dissipada em relação ao dano ao longo de um ensaio cíclico;
3. Realizar ensaios experimentais no equipamento MTS Acumen, do *UHMWPE* com rotina desenvolvida para o novo tipo de controle (J);
4. Propor uma nova metodologia de caracterização de materiais viscoelásticos utilizando um novo tipo de controle (J).

<sup>1</sup> <https://www.mts.com/en/products/materials/dynamic-materials-test-systems/acumen-electrodynamic>

## 1.4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A justificativa para a realização desta pesquisa é baseada em duas razões principais. Em primeiro lugar busca-se abrir uma nova discussão no campo da mecânica da fratura e fadiga, promovendo o uso de um tipo alternativo de controle para a execução de ensaios cíclicos. Nesse sentido a proposta desta pesquisa é explorar uma abordagem diferente para caracterizar um material viscoelástico.

Em segundo lugar, a relevância do comportamento mecânico do *UHMWPE* é destacada, uma vez que muitas pesquisas vêm sendo realizadas nesse campo, com foco na busca por estratégias que aumentem a vida de fadiga desse material. No entanto, observa-se que todas essas pesquisas mencionam as preocupações relacionadas às variáveis que afetam a vida de fadiga, mas ainda utilizam o controle de deslocamento ou, o controle de carga como os principais métodos de ensaio. Assim, a necessidade de explorar uma abordagem alternativa além das tradicionais mencionadas na literatura é a principal justificativa para a realização desta pesquisa, visando contribuir para o avanço do conhecimento na área do comportamento da fadiga de materiais poliméricos, em particular o *UHMWPE*.

Após conduzir uma pesquisa sobre o fenômeno da fadiga, foram encontradas várias patentes relacionadas ao assunto, conforme detalhado no Apêndice B; identificou-se na revisão bibliográfica que só existem de fato duas abordagens para executar o ensaio cíclico, até os tempos de hoje.

Também foi identificado que os ensaios utilizados para caracterizar o comportamento mecânico de materiais poliméricos sob solicitações cíclicas levam em consideração a tensão e a deformação como grandezas de interesse. No entanto, essas grandezas são calculadas independentemente, o que significa que durante a execução do ensaio, somente uma variável pode ser monitorada na saída, ou a tensão ou a deformação.

Considerando a importância do tema da fadiga e o fato de que a maioria das falhas de peças e componentes em serviço estão relacionadas a esse fenômeno, e que os materiais viscoelásticos têm sido cada vez mais utilizados na indústria para componentes de alto desempenho, é necessário contribuir para a correta caracterização desses materiais, a fim de identificar suas propriedades e comportamento mecânico nas solicitações cíclicas.

## 1.5 METODOLOGIA

A metodologia adotada consistiu em propor uma nova abordagem para caracterizar o comportamento cíclico de materiais viscoelásticos, utilizando o método experimental com foco no controle J. O material escolhido para a realização dos experimentos foi o *UHMWPE*.

Inicialmente, foi realizado um trabalho preliminar para estabelecer uma base sólida para os ensaios posteriores. Nessa etapa, uma série de experimentos em laboratório foi conduzida, incluindo ensaios monotônicos, ensaios DMA, ensaios cíclicos com controle de deslocamento e ensaios cíclicos com controle de carga. Essa variedade de ensaios permitiu compreender o comportamento mecânico e viscoelástico do material sob diferentes condições de sollicitação.

Após a conclusão do estudo preliminar e a obtenção dos resultados relevantes, deu-se continuidade aos ensaios com o método de controle J. Esse método específico foi aplicado para analisar e caracterizar o comportamento cíclico do *UHMWPE*. O equipamento MTS Acumen foi utilizado para realizar esses ensaios.

Após a obtenção dos dados, foram conduzidas análises detalhadas e interpretações relevantes para melhor compreender a resposta do material aos diferentes níveis de sollicitação.

Finalmente, a nova abordagem para caracterizar o comportamento cíclico de materiais viscoelásticos, baseada no controle J, foi validada e discutida com base nos resultados obtidos.

## 1.6 LIMITAÇÕES DA TESE

A principal contribuição deste trabalho é a apresentação de uma nova abordagem para a caracterização do comportamento de materiais poliméricos sob sollicitações cíclicas, que difere das duas abordagens atualmente empregadas. No entanto, é importante destacar que essa proposta não soluciona completamente a questão abordada mas, em vez disso abre caminho para a questão central, que é a necessidade de personalizar os ensaios com esse novo tipo de controle. Portanto, este estudo se concentra em uma investigação preliminar sobre como implementar essa nova abordagem nos ensaios de fadiga.

Nesse aspecto, é importante ressaltar que este trabalho não tem como objetivo realizar comparações com outras metodologias existentes ou avaliações baseadas

em resultados de estudos anteriores. Isso se deve ao fato de que essa abordagem de ensaio é nova e ainda não foi extensivamente investigada. O foco principal deste trabalho é propor e implementar uma nova abordagem para a caracterização do comportamento cíclico de materiais viscoelásticos, bem como demonstrar a viabilidade de sua implementação em uma máquina de ensaios.

## 1.7 ESTRUTURA DA TESE

Para realizar o tema proposto, este trabalho divide-se em seis capítulos delineados da seguinte forma:

**Capítulo 1 - INTRODUÇÃO:** Fornece uma introdução do assunto proposto, seguida pelas considerações iniciais da pesquisa, o problema levantado, seus objetivos, a justificativa, a metodologia para alcançar os objetivos, as limitações da tese e, ainda, a estrutura da tese.

**Capítulo 2 - REVISÃO TEÓRICA:** Apresenta uma revisão teórica abordando o modo de falha por fadiga, descrevendo o comportamento físico, características e parâmetros de entrada necessários para executar um ensaio de fadiga. Além disso, é relatada uma breve história sobre os ensaios de fadiga ao longo do tempo, incluindo o controle de carga e o controle de deslocamento os quais são empregados até os tempos atuais. Em seguida, são explanadas algumas teorias referentes à evolução do dano na fadiga. Após essa revisão, aborda-se a mecânica da fratura e fadiga para chegar ao conceito da integral J. Em seguida, é feita uma discussão envolvendo os conceitos de energia dissipada durante uma sollicitação cíclica. Explica-se também o módulo complexo e seu estudo através do plano Cole-Cole. Por último, aplica-se esse conhecimento em um modelo fracionário, mostrando a interpretação do modelo de Huet-Sayegh.

**Capítulo 3 - METODOLOGIA:** Apresenta a metodologia empregada para alcançar os objetivos propostos. Nele são descritos detalhadamente os ensaios realizados ao longo do estudo, que foram fundamentais para a obtenção do conhecimento necessário e para a abordagem do conceito do controle J. Além disso, o capítulo explora a abordagem específica do ensaio destacando aspectos importantes, como o critério de parada e a definição dos parâmetros iniciais antes da realização do ensaio. Por fim, são apresentados os procedimentos planejados para a análise dos ensaios com controle J, com uma descrição minuciosa da metodologia para o cálculo do ângulo

de fase - uma parte fundamental desta pesquisa. Adicionalmente, o capítulo propõe uma metodologia geral para a caracterização de um material viscoelástico, utilizando o controle J. Essa abordagem inclui a descrição detalhada dos passos a serem seguidos para a análise, o que é crucial para o sucesso do estudo.

**Capítulo 4 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS:** São revelados os principais resultados obtidos a partir das abordagens utilizadas.

**Capítulo 5 EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS:** São discutidos dois resultados que foram considerados mais relevantes. O primeiro resultado aborda a interpretação dos ensaios dinâmicos DMA, que trouxeram uma contribuição adicional ao estudo ao implementar o fator de dano  $D$  no modelo viscoelástico fracionário de Huet-Sayegh. O segundo resultado explorado foi o ensaio com o controle J, o qual revelou informações importantes sobre a evolução dos parâmetros ao longo do experimento.

**Capítulo 6 - CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS:** São apresentadas as conclusões a partir dos resultados experimentais e colocam-se algumas sugestões de possíveis pesquisas a serem desenvolvidas no futuro.

Finalmente são apresentados os apêndices com algumas informações relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os assuntos mais relevantes que foram estudados e amplamente utilizados ao longo desta pesquisa. Ele aborda a revisão da literatura sobre os princípios do fenômeno de fadiga e da mecânica da fratura.

O fenômeno de fadiga tem sido objeto de estudo desde 1829, quando August Wöhler iniciou suas pesquisas. No entanto, mesmo com essa longa trajetória de estudo, ainda persistem desafios na realização de ensaios de laboratório e na estimativa da vida de fadiga de certos materiais poliméricos, como é o caso do *UHMWPE*, que é o material em foco desta pesquisa. Essas dificuldades são particularmente preocupantes quando se trata de materiais utilizados na área da saúde, onde é crucial obter uma caracterização do material. Existe um interesse significativo em compreender o processo de nucleação de falhas e sua evolução em nível microscópico, mas é importante reconhecer que há uma grande quantidade de variáveis envolvidas, desde o processo de fabricação do material até o seu uso final.

Nesta revisão teórica, destaca-se o modo de falha por fadiga, e os dois tipos de controle amplamente utilizados para realizar ensaios cíclicos. Além disso, será explorada outra metodologia experimental empregada, o ensaio dinâmico DMA.

### 2.2 MODO DE FALHA: FADIGA

Cerca de 90% de todas as falhas estruturais decorrem de um mecanismo de fadiga. Essas falhas ocorrem quase sempre sem aviso prévio, podendo ter consequências catastróficas no momento da ruptura. Durante o processo de fadiga, ocorre um dano cumulativo e geralmente irrecuperável no material, tornando quase impossível detectar quaisquer mudanças progressivas em seu comportamento ao longo desse processo (ROSA, 2002).

Alguns pesquisadores mencionam que o objetivo de um ensaio de fadiga é determinar a vida ou o local de ruptura de uma peça quando está sendo solicitada ciclicamente, definindo a fadiga como o ponto de ruptura do material em duas ou mais partes, sendo que se deve usar corpos de provas em condições de ensaios muitas vezes simplificados ou aproximados, sendo importante que a carga aplicada seja uma

sequência de amplitudes de tensão variáveis, destinadas a simular o histórico de tensão encontrado no serviço real, (WEIBULL, 1961).

Outros pesquisadores focam em estudar em seus trabalhos a fadiga térmica, mencionando que um material polimérico ensaiado ciclicamente é um material com comportamento fortemente viscoelástico explicando que a falha por fadiga nesses materiais acontece de duas maneiras: a primeira devido a uma falha térmica; e a segunda devido a uma falha mecânica, acontecendo logo nos primeiros ciclos da fadiga (CRAWFORD; BENHAM, 1975).

No Apêndice C é apresentada uma descrição do principal material em estudo desta pesquisa, o *UHMWPE*, incluindo conceitos e comportamentos que podem ser observados em diferentes faixas de solicitação e temperatura durante a fadiga. Também são abordadas características quanto à velocidade de resfriamento, fatores que podem influenciar e afetar o comportamento cíclico. No Apêndice D pode ser observado de maneira geral as falhas por fadiga nos polímeros.

Para uma melhor compreensão do fenômeno da fadiga é importante mencionar algumas definições que caracterizam a fadiga como um processo que resulta em falha mecânica local (trinca ou ruptura completa após um número suficiente de ciclos). Como por exemplo, a fadiga pode ser interpretada como um processo de falha progressiva que envolve a iniciação e propagação de uma trinca até atingir um tamanho instável, desencadeando uma súbita separação catastrófica da parte afetada em duas ou mais partes (COLLINS, 1993),.

De acordo com (ROSA, 2002), a fadiga pode ser definida como uma redução gradual da capacidade de carga de um componente quando submetido a solicitações abaixo do limite de escoamento do material. Ainda segundo (ROSA, 2002), essas solicitações podem ser de tração, flexão, compressão e/ou cisalhamento cíclico, resultando em uma ruptura lenta no material devido ao avanço quase infinitesimal e progressivo das fissuras que se formam em seu interior ao longo do tempo. Esse crescimento das fissuras ocorre a cada flutuação do estado de tensões .

Uma outra definição do ponto de vista técnico, define a fadiga como um processo de alteração estrutural permanente, localizado e progressivo, que ocorre em materiais sujeitos a condições de solicitação não constantes em um ou vários pontos que podem originar uma trinca ou fratura completa após um número suficiente de variações de solicitações cíclicas conforme exposto na norma (ASTM-E1823-96, 2002).



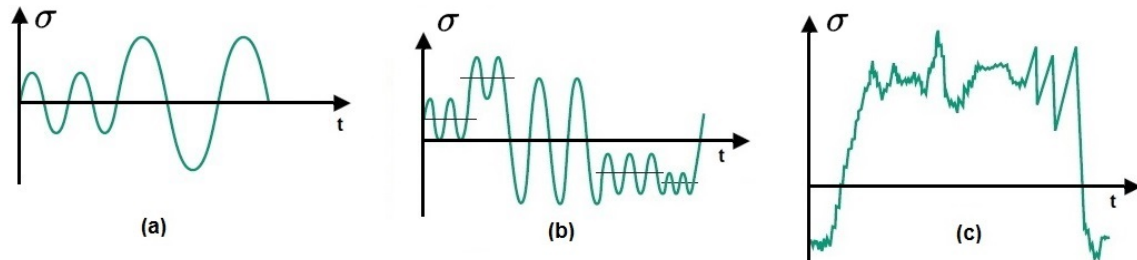
### 2.3 SOLICITAÇÕES CÍCLICAS NO ENSAIO DE FADIGA

Na prática da engenharia moderna solicitações cíclicas repetidas, cargas flutuantes e aplicação rápida são muito mais comuns do que as cargas estáticas ou quase-estáticas.

Existem padrões de tensão mais complexos conforme ilustrados na Figura 1. Por exemplo na Figura 1a a tensão média é zero, mas há duas (ou mais) diferentes amplitudes de tensão misturadas. Na Figura 1b não apenas a amplitude da tensão varia, mas também a magnitude da tensão média muda periodicamente, aproximando-se de uma condição mais realista. A Figura 1c ilustra um padrão de tensão ainda mais realista, que pode ocorrer em uma estrutura ou material (COLLINS, 1993).

Nessa Figura 1c é possível observar uma amplitude de oscilação não simétrica, caracterizada por ciclos de tensões aleatórias com amplitude e frequência variáveis. Essa representação reflete de forma mais fiel as condições reais que um material pode enfrentar quando submetido a solicitações cíclicas.

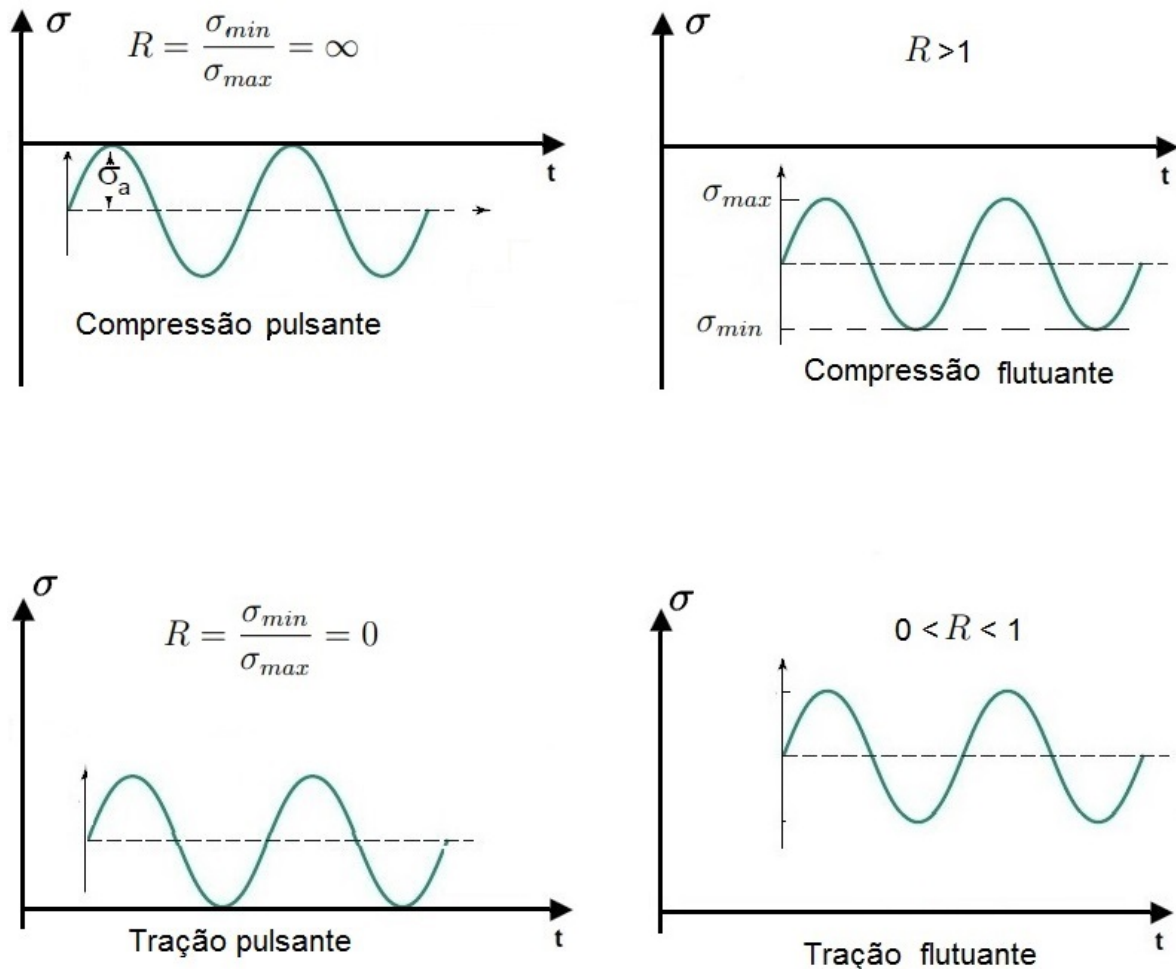
Figura 1 – Diferentes padrões de solicitação cíclica na fadiga



Fonte: Adaptado de (COLLINS, 1993)

Existem também diferentes tipos de solicitações cíclicas na fadiga como pode ser observados na Figura 2. Para determinar o tipo de solicitação, seja este alternante, pulsante ou flutuante, são utilizados fatores de simetria do ciclo ou também chamados como razão de tensões.

Figura 2 – Tipos de solicitações cíclica na fadiga e seus parâmetros



Fonte: Adaptado de (COLLINS, 1993)

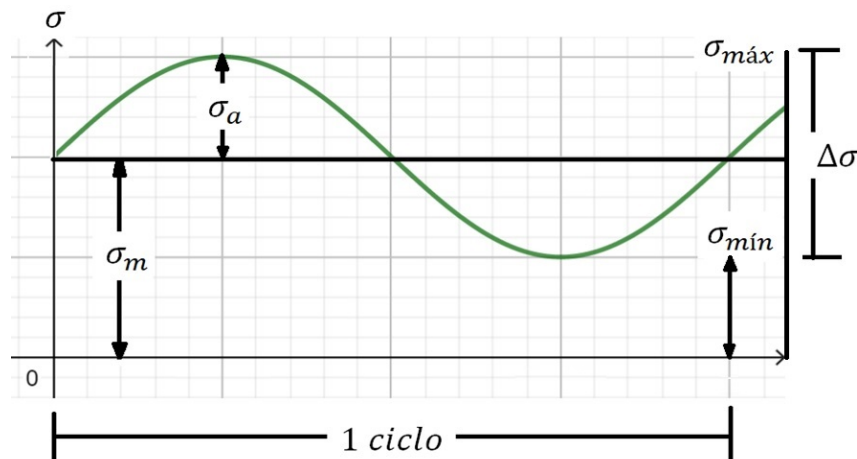
Para um ensaio com controle de carga, por exemplo, a razão de tensões cíclicas ( $R$ ), é definida como a razão entre a tensão mínima e tensão máxima, conforme representado pela equação (1). Na solicitação de tração flutuante,  $R$  varia de  $0 < R < 1$ .

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1)$$

Na Figura 3 são mostrados os parâmetros típicos de solicitações cíclicas e a nomenclatura dos mesmos, onde:  $\sigma_m$ , corresponde à tensão média;  $\sigma_{max}$ , à tensão máxima;  $\sigma_{min}$ , à tensão mínima;  $\Delta\sigma$ , à faixa de variação de Tensão; e,  $\sigma_a$ , à tensão alternada

Os resultados dos ensaios cíclicos são geralmente representados em curvas de tensão alternante versus número de ciclos, conhecidas como curva de Wöhler.

Figura 3 – Parâmetros típicos de solicitações cíclicas



Fonte: Adaptado de (COLLINS, 1993)

## 2.4 AUGUST WÖHLER

August Wöhler ganhou reconhecimento por seus estudos pioneiros sobre a resistência à fadiga. Seus artigos abordaram o tema e incluíram medições de carga em eixos de trem em operação real, assim como testes de fadiga realizados em eixos e amostras feitas de aço, ferro e cobre. Os resultados dessas pesquisas permitiram a Wöhler demonstrar que a fadiga é influenciada não apenas pelas tensões cíclicas, mas também pelas tensões médias. Essas descobertas contribuíram significativamente para o entendimento e o desenvolvimento posterior de estudos sobre fadiga e resistência dos materiais (ZENNER; HINKELMANN, 2019).

Uma das principais contribuições de Wöhler para a compreensão da fadiga foi a introdução da chamada curva  $(\sigma - N)$ , onde é representado o número de ciclos ( $N_f$ ) na abcissa versus a amplitude de tensão na ordenada. A curva  $(\sigma - N)$  de Wöhler permite realizar uma previsão do número de ciclos de vida de um material baseado nos esforços mecânicos aos quais ele está submetido. Quanto maior for a tensão aplicada, menor o número de ciclos necessários para levar o material à fratura por fadiga.

Wöhler usou para levantar suas curvas  $(\sigma - N)$  a máquina de flexão rotativa, onde aplica-se um momento fletor a um corpo de prova que gira sobre o seu eixo, desta forma, cada ponto da superfície do corpo de prova vai sendo solicitado cíclica e consecutivamente em tração e em compressão a cada revolução.

Este tipo de ensaio é capaz de fornecer dados na chamada fadiga sob reversão total, ou seja, com  $(\sigma_m = 0)$ .

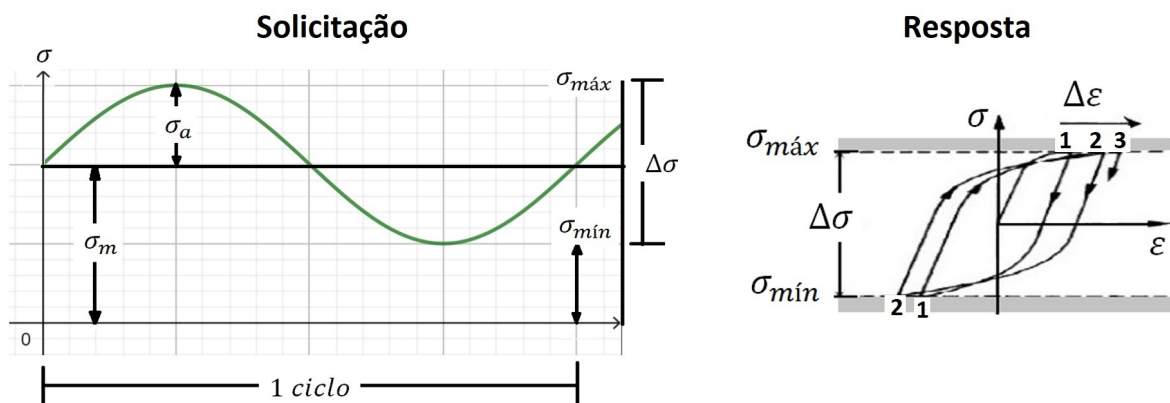
Nesse tipo de ensaio e em outros similares utilizados nos primórdios do estudo da fadiga, é comum submeter o corpo de prova a um ciclo de tensão. Nesse caso, diz-se que o ensaio é executado em controle de carga. Com o passar do tempo uma nova era inicia-se, migrando para os ensaios de cargas axiais de forma controlada. Quando uma carga é aplicada ao corpo de prova, toda a área resistente da seção transversal à solitação é submetida ao mesmo nível de tensão.

Dessa forma os ensaios controlados se tornaram a abordagem dominante na realização de ensaios de fadiga até os dias atuais. A principal vantagem desses ensaios é a obtenção de valores confiáveis de tensão ( $\sigma$ ) ou deformação ( $\varepsilon$ ). No entanto, como a desvantagem está no fato que o material é submetido a oscilações cíclicas dentro de limites pré-estabelecidos e fixos.

#### 2.4.1 Ensaio com controle de carga

Neste ensaio aplica-se o modelo ( $\sigma - N$ ), e o fenômeno do comportamento de um corpo de prova solitado por uma carga cíclica ( $\sigma_a$ ) pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Ensaio de fadiga com controle de carga



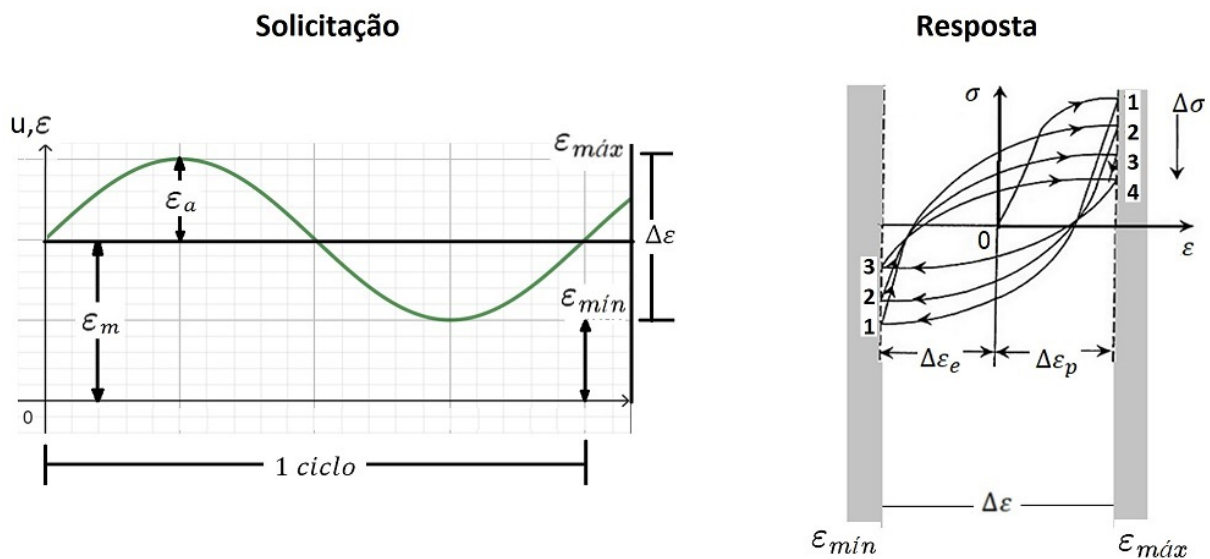
Fonte: Adaptado de (SCHIJVE, 2009)

Se o material sofre amolecimento cíclico, observa-se na Figura 4 o tempo avança, a parcela da deformação ( $\Delta\varepsilon$ ) aumenta. A parcela da deformação elástica ( $\Delta\varepsilon_e$ ) é constante, e a parcela da deformação plástica ( $\Delta\varepsilon_p$ ) aumenta.

### 2.4.2 Ensaio com controle de deslocamento

Neste ensaio aplica-se o modelo  $(\varepsilon - N)$ , indicado para modelar a nucleação de trinca com baixo ciclo. O fenômeno do comportamento de um corpo de prova solicitado por uma carga cíclica  $(\varepsilon_a)$  pode ser observado na Figura 5, (LEE, 2005), ou seja, a tensão apresenta um amolecimento cíclico. Neste tipo de ensaio, a variável interna monitorada é a deformação  $(\varepsilon)$ .

Figura 5 – Ensaio de fadiga com controle de deslocamento



Fonte: Adaptado de (LEE, 2005)

Se o material sofre amolecimento cíclico, observa-se na Figura 5, a medida que o tempo avança, a parcela de  $\Delta\sigma$  diminui. A parcela da deformação elástica ( $\Delta\varepsilon_e$ ) diminui, e, a parcela da deformação plástica ( $\Delta\varepsilon_p$ ) aumenta.

Conforme Rosa (2002), na maioria das vezes o componente mecânico quando solicitado ciclicamente, seja por controle de carga ou por controle de deslocamento, sofrem cargas variáveis, de amplitude não necessariamente constante, ao longo da vida de fadiga, dificultando sobremaneira a análise de fadiga do material. Em muitos casos, a sequência com que a magnitude da carga varia é aleatória.

No laboratório é prática realizar ensaios em corpos de prova com amplitude constante, obtendo assim as curvas  $(\sigma - N)$  ou  $(\varepsilon - N)$ . No entanto, em condições de serviço, as solicitações no componente variam consideravelmente. Surge então a questão de como utilizar essas curvas no projeto de um componente que precisa resistir a uma condição de trabalho com solicitações de amplitude variável, e como calcular o dano que o componente sofre.

## 2.5 EVOLUÇÃO DO DANO NA FADIGA

Um processo proposto por Palmgren e rerepresentado por Miner (1945), é conhecido como a regra de Palmgren-Miner ou regra linear de acúmulo de dano. De acordo com esta regra, o dano que o componente mecânico sofreu sob a ação de uma dada amplitude da tensão cíclica é diretamente proporcional ao número de ciclos em que atuou aquela amplitude de tensão. Cada ciclo de tensão de amplitude superior ao limite de resistência produz um dano irreversível sobre a estrutura. O dano  $D_i$ , é produzido por  $n_i$ , ciclos de amplitude  $\sigma_{ai}$ , e está ligado ao número total de ciclos  $N_i$ , que leva à ruptura por fadiga sob a tensão de amplitude ( $\sigma_{ai}$ ).

Para estimar o dano parcial,  $D_i$ , produzido por,  $n_i$  ciclos, Miner (1945) propôs a relação da equação (2):

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

sendo  $n_i$  o número de ciclos atuantes, para uma amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ). O dano total da peça ou componente é dado por,  $D$ , conforme equação (3) (MINER, 1945).

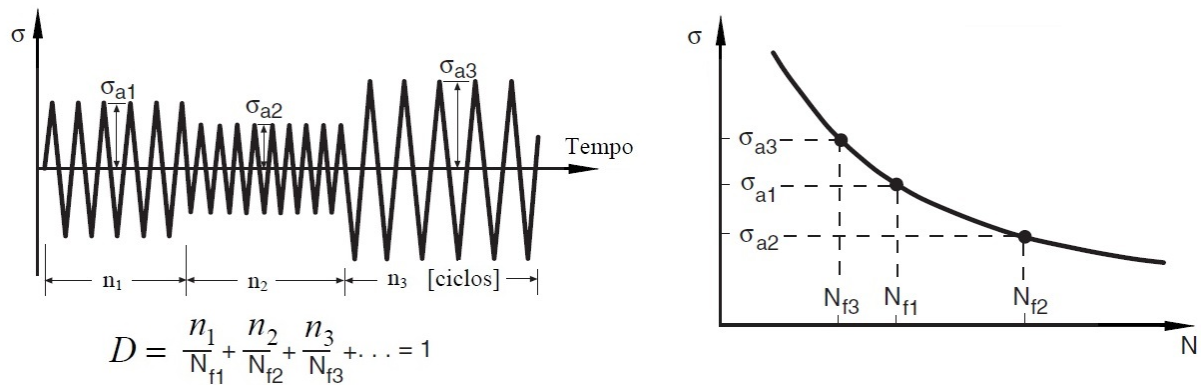
$$D = \sum_k \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

O critério de falha por fadiga em uma situação com acúmulo de dano, indica um dano máximo de  $D = 1$ . O principal inconveniente da lei de acúmulo de dano de Palmgren-Miner é que ela não leva em conta a ordem de aplicação dos ciclos de tensão.

A fratura é caracterizada por um valor unitário do dano,  $D = 1$ . A Figura 6 mostra a maneira de processar o cálculo.

Outras leis de acúmulo de dano foram propostas considerando a ordem de aplicação dos ciclos e inúmeros estudos comparativos foram realizados, concluindo que para o caso onde as solicitações são aleatórias, as estratégias baseadas na ordem de aplicação dos ciclos perdem a eficiência. Portanto, a lei de Palmgren-Miner ainda é considerada a mais utilizada. Entretanto, quando as tensões se tornam aleatórias, é necessário dispor de métodos capazes de extrair os ciclos causadores de danos para poder explorar uma lei de acúmulo. Esses outros métodos são chamados de Métodos de Contagem de Ciclos, (LAMBERT; E.; KHALIJ, 2010). O dano nos polímeros não é

Figura 6 – Estimativa do dano de fadiga com base na Lei de Miner



Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2006)

necessariamente linear com o número de ciclos, podem existir tensões residuais que ficam nos pontos críticos, que a regra de Miner não leva em consideração.

Quando  $D = 1$  é intuitivo considerar uma sollicitação com apenas um nível, no qual a falha ocorre quando  $n_i = N_i$ . Esse critério é caracterizado pela perda de rigidez relativa entre o módulo inicial e o módulo em um determinado tempo. (FATEMI; YANG, 1998), fornecem uma revisão das teorias de dano por fadiga, destacando as abordagens desenvolvidas desde o início dos anos 1970 até o início dos anos 1990.

Essas abordagens são importantes para compreender o comportamento do material sujeito à fadiga e suas consequências em termos de dano acumulado. Dentro das teorias estudadas de dano encontra-se um conceito dado como a relação entre a redução do módulo  $E_0$  em relação ao módulo  $E_N$ , conforme equação (4) (FATEMI; YANG, 1998).

$$D = \frac{E_0 - E_N}{E_0}, \quad (4)$$

sendo  $E_0$  o módulo inicial e  $E_N$  o módulo no ciclo da sollicitação atual.

Assim como as teorias de dano mencionadas anteriormente, também surgiram as teorias de dano não linear. No entanto, como proposta de abordagem do dano utilizou-se a equação (4).

Como já mencionado, cada ciclo de tensão aplicado ao material produz um dano irreversível que, por sua vez, leva a um processo de ruptura do material. Essa ruptura ocorre pelo crescimento lento de uma trinca ou, no caso específico desta pesquisa, que envolve um material polimérico sem uma trinca definida, não ocorrendo propriamente uma ruptura por uma trinca, mas sim uma perda considerável da rigidez do material, afetando todo o volume ensaiado do CP devido às sollicitações cíclicas.

Desta maneira se o material ensaiado apresenta uma trinca já definida, uma forma de avaliar a resistência estática do material à propagação da trinca é pelo levantamento das chamadas curvas de resistência à propagação da trinca, ou curvas R. Conforme (ROSA, 2002), estas curvas caracterizam o crescimento da trinca em função da sollicitação no material, a qual pode ser medida pelo fator de intensidade de tensão  $K_I$ , pela taxa de liberação de energia, pelo deslocamento de abertura da trinca, ou mesmo pela integral J, onde J é definida como a variação da energia em relação a um crescimento de uma trinca (RICE, 1968).

A ruptura final de um CP pode ocorrer de um modo dúctil ou frágil, dependendo do material e do nível de sollicitação. No caso de uma ruptura frágil, esta ocorre quando o fator de intensidade de tensão atinge um valor crítico, maior que a tenacidade à fratura. Assim este critério indica  $K \geq K_C$  para a falha, que se aplica quando a tensão nominal for inferior à tensão de escoamento. No caso de uma ruptura dúctil, fica caracterizada por um valor crítico do deslocamento de abertura do extremo da fissura (ROSA, 2002), ou equivalentemente por um valor crítico da integral J, definida por (RICE, 1968).

A mecânica da fratura elasto plástica (MFEP) utiliza um parâmetro para caracterizar a intensidade de tensão – deformação do extremo da trinca, a integral J. J define a intensidade da tensão e deformação plástica na região que rodeia o extremo da trinca. É uma função da tensão, deformação, tamanho de trinca, e geometria da trinca. É análogo a  $K_I$  utilizado na mecânica da fratura elástica linear (MFEL). A maior diferença é que J representa a intensidade do campo elasto-plástico que rodeia o extremo da trinca, enquanto  $K_I$  é a intensidade do campo elástico circundante (ROSA, 2002).

### 2.5.1 Integral J

A integral J (RICE, 1968), segundo a norma (E1820-23, 2023), é um parâmetro de resistência à fratura, que pode ser aplicado quando um material apresenta um comportamento dúctil, que acompanha a deformação na ponta da trinca no processo da fratura. Ela representa uma maneira de calcular a taxa de liberação de energia de deformação, ou trabalho por unidade de área de superfície de fratura, em um material (COLLINS, 1993).

A proposta de J por Rice (1968), com base num pressuposto de comportamento



não linear elástico do material, consiste na definição mostrada na equação (5).

$$J := \int_{\Gamma} \left( W dy - \mathbf{T} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} ds \right), \quad (5)$$

sendo:

- **W**: a densidade de energia de deformação,
- **T**: o vetor tração,
- **u**: o vetor deslocamento,
- **ds**: um elemento infinitesimal do contorno,
- $\Gamma$ : um contorno que começa no lado inferior da trinca e termina no lado superior da trinca, conforme observa-se na Figura 7.

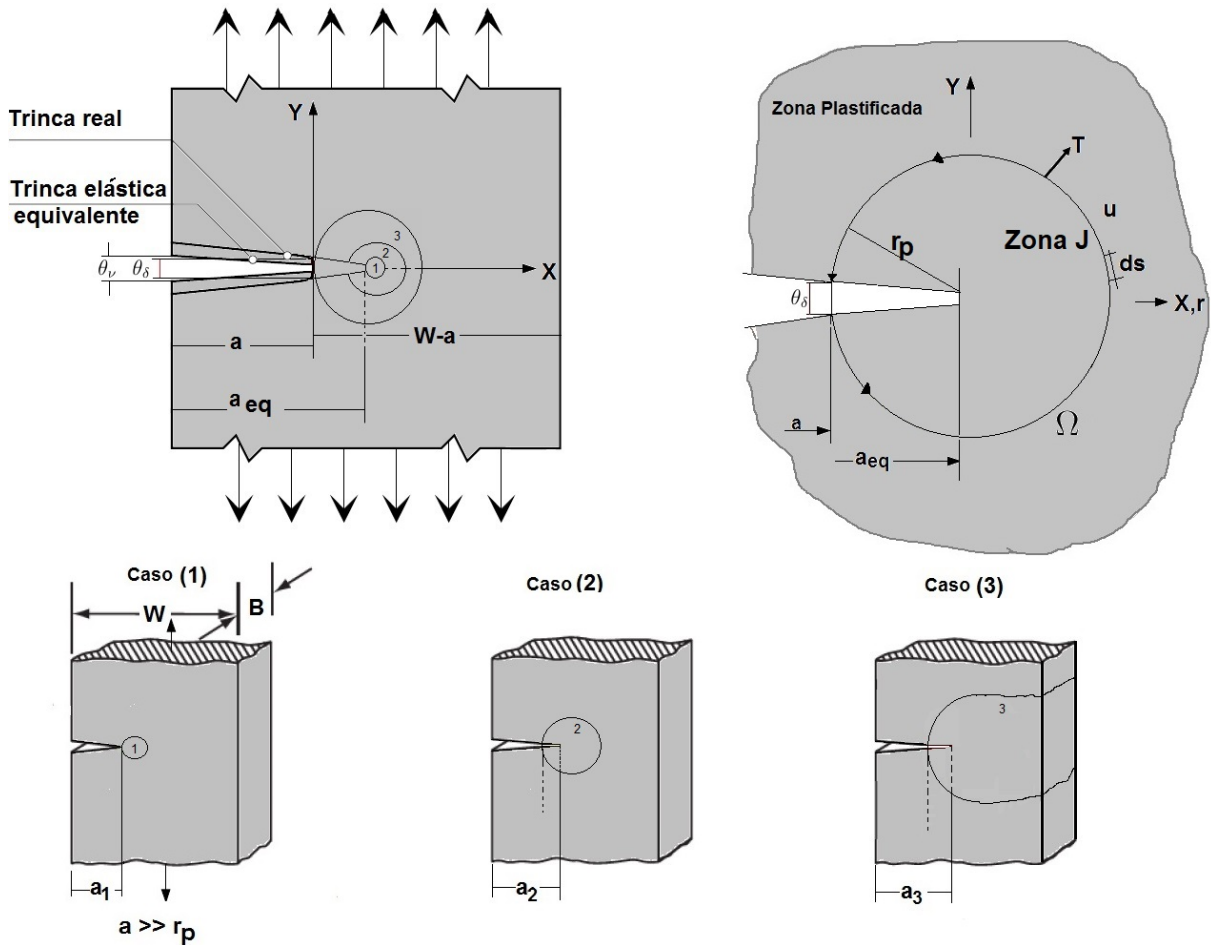
Essa figura 7 mostra o comportamento de uma trinca em três níveis, para um material elástico não linear, onde observa-se que podem ocorrer diferentes graus de plasticidade, conforme os casos indicados nos casos 1, 2 e 3.

Caso 1: Indica um comportamento ainda elástico, o que significa que a zona plástica causada pela trinca é menor (em magnitude) que a geometria do material que a contém.

Caso 2: Indica um comportamento elástico-plástico, ou seja, a zona plástica aumentou devido ao crescimento do tamanho da trinca para  $a_2$ .

Caso 3: Indica um comportamento de escoamento generalizado, isto é, toda a seção resistente está plastificada.

Figura 7 – Representação da trinca conforme a sua deformação



Fonte: Adaptado de (COLLINS, 1993)

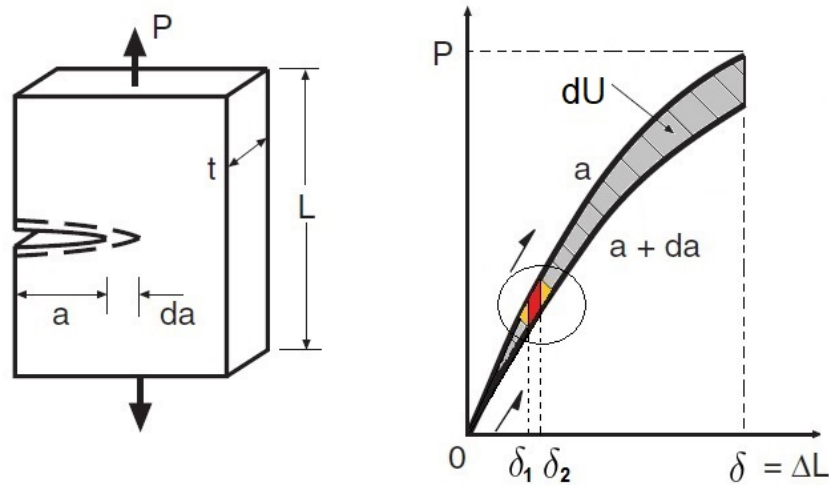
Na norma (ASTM-E-1820-08A, 2009), são apresentados os procedimentos para determinação da integral J. O método dessa norma aplica-se especificamente a geometrias que contêm trincas já definidas. A taxa da solitação deve ser aplicada lentamente. Além disso, Rice (1968) demonstrou que a integral J pode ser interpretada como a diferença de energia potencial entre dois corpos carregados de forma idêntica, mas com tamanhos de trincas distintas, **a**, e **a+da**. Essa interpretação é fundamentada pela equação (6) e visualmente representada na Figura 8.

$$J = -\frac{dU}{da}, \quad (6)$$

sendo:

- **U**: a energia potencial,
- **a**: o tamanho da trinca.

Figura 8 – Solicitação monotônica - Energia de deformação na integral J



Fonte: Adaptado de (DOWLING, 2013)

A equação (6) utilizada para calcular  $J$  com base em resultados experimentais, confirma que o dano no material está relacionado à presença de um defeito macroscópico, modelado como uma trinca de dimensão característica  $a$ , conforme indicado nas Figuras 7 e 8. Esse defeito ou trinca vai aumentando pressupondo um volume de controle cujo contorno é definido por  $\Omega$ .

No contexto específico deste estudo, que envolve ensaios cíclicos com um material polimérico, o *UHMWPE* em particular, e pelo fato do corpo de prova ensaiado não ter uma trinca definida como mencionado acima, o nosso volume de controle passa a ser todo o CP que encontra-se sob solicitação cíclica.

Nos ensaios experimentais observa-se uma alta resistência à fadiga do material, o que impede a nucleação e propagação de trincas como normalmente ocorre em outros polímeros. Portanto, a equação (6) deve ser generalizada para definir  $J$  como uma medida de variação de energia em relação ao dano causado ao material devido à carga cíclica. No caso do *UHMWPE*, o dano será caracterizado pela redução de módulo complexo, e portanto,  $J$  será definida de acordo com a equação (7), o dano conforme a equação (4), e a energia dissipada será calculada conforme mostra-se na seguinte seção.

$$J = \frac{dU}{dD} \quad (7)$$

## 2.6 ENERGIA DISSIPADA DURANTE UM CICLO DE SOLICITAÇÃO

Existem diversas abordagens para estudar a energia dissipada durante um ciclo de solicitação. Uma dessas abordagens é a análise das propriedades dinâmicas por meio da avaliação de parâmetros associados, como o cálculo da área da histerese. Essa área entre a curva de carga e a curva de descarga representa a energia dissipada durante o ciclo, sendo fundamental para compreender o comportamento viscoelástico do material.

Conforme (JRAD *et al.*, 1979), a compreensão do fenômeno da energia dissipada pode ser aprimorada por meio da consideração de um material sujeito a um deslocamento cíclico senoidal de frequência angular  $\omega$ , conforme expresso na equação (8):

$$x(t) = x_0 \sin(\omega t), \quad (8)$$

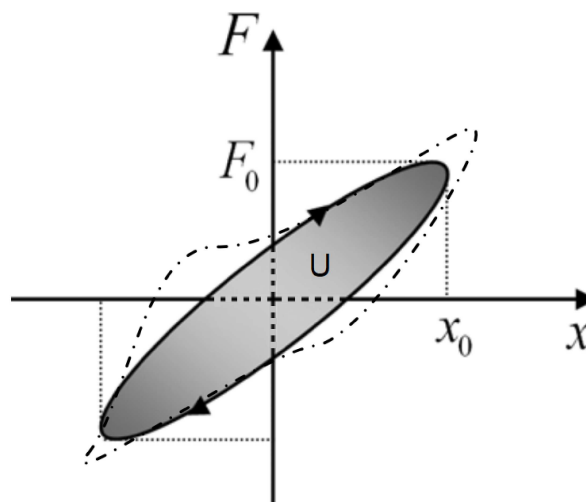
sendo  $X_0$ , representa a amplitude do deslocamento por ciclo.

Assumindo que a resposta da força também seja senoidal na mesma frequência, mas com um ângulo de fase  $\varphi$ , como mostrado na equação (9):

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (9)$$

e  $F_0$  representa a amplitude da força por ciclo. Esses valores:  $X_0$ ,  $F_0$  podem ser identificados na Figura 9.

Figura 9 – Parâmetros do ciclo de histerese

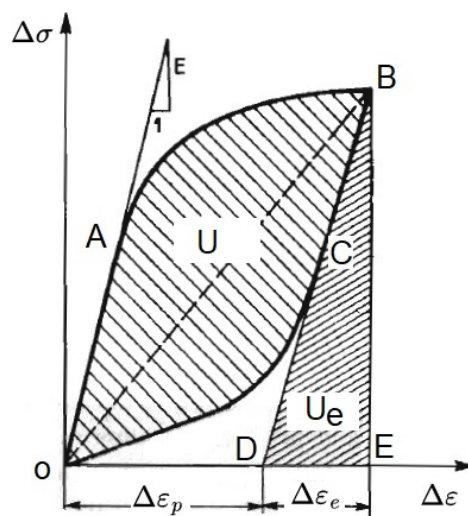


Fonte: Adaptado de (JRAD *et al.*, 1979)

Na Figura 9 também é possível observar a área cinza, que corresponde ao comportamento viscoelástico linear, caracterizado por uma forma elíptica, e a linha tracejada e pontilhada, que corresponde à resposta não linear (JRAD *et al.*, 1979).

De acordo com (ELLYIN; KUJAWSKI, 1984), na Figura 10 é possível observar um ciclo de histerese estável quando um material é submetido a uma solitação de amplitude de deslocamento constante ( $\Delta\varepsilon$ ). A energia por ciclo é representada pela área do laço de histerese formado pelos pontos **OABCO**.

Figura 10 – Ciclo de histerese estável



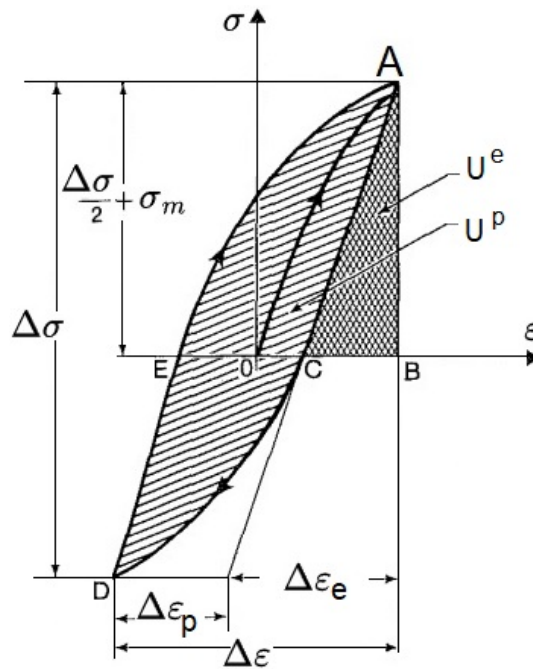
Fonte: Adaptado de (ELLYIN; KUJAWSKI, 1984)

Seguindo a linha de pesquisa (GOLOS; ELLYIN, 1988) apresentaram uma teoria de energia cíclica. Essa teoria demonstrou que a falha por fadiga, tanto em regimes de baixo ciclo quanto de alto ciclo, bem como o dano cumulativo e a sequência da solitação, podem ser expressos em termos de um único parâmetro de dano. O critério de dano é baseado na densidade total de energia por ciclo, que corresponde, segundo os autores, à soma da energia plástica e elástica conforme mostra-se na equação (10). Tanto as fases de iniciação quanto de propagação de trinca durante a vida útil por fadiga são contempladas nessa abordagem. Os Parâmetros dessa pesquisa envolvendo a energia plástica e a energia elástica, podem ser observadas na Figura 11.

$$U^t = U^p + U^e \quad (10)$$

Outro modelo desenvolvido por (CHENG; ZHONG; YONGCHANG, 2019) foi baseado em princípios de energia para previsão de crescimento de trincas por fadiga. De acordo com a relação de equilíbrio entre a energia liberada e a energia armazenada

Figura 11 – Energia elástica e energia plástica



Fonte: Adaptado de (GOLOS; ELLYIN, 1988)

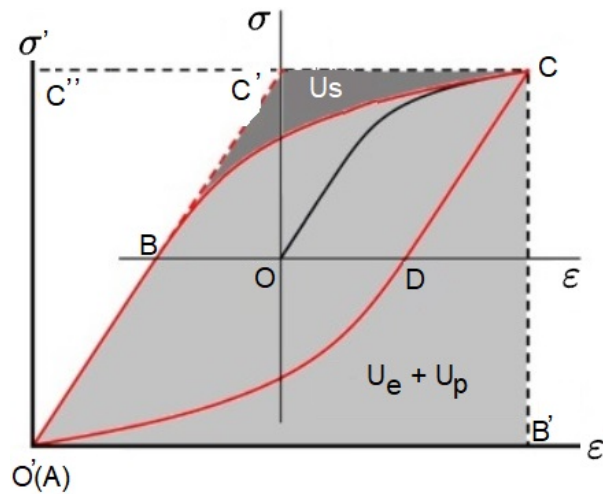
ao longo do comprimento da zona de processo da fratura, a taxa do crescimento de trincas por fadiga é calculada dividindo a energia armazenada pela energia liberada em cada ciclo de carga. A energia liberada é determinada a partir da taxa de liberação de energia cíclica. A energia armazenada é obtida integrando as tensões de ponta de trinca dentro do comprimento da zona de processo da fratura.

De acordo com os autores a energia é dividida em dois tipos: energia recuperável e energia irrecuperável. A energia recuperável corresponde à parte elástica da energia armazenada durante o processo da solitação. Já a energia irrecuperável engloba a parte restante da energia armazenada, incluindo a energia dissipada. Os ensaios foram realizados utilizando corpos de prova com trincas. À medida que a trinca cresce sob solitações cíclicas, a energia armazenada do material é liberada. Nessas situações, a energia de histerese, representada pela área delimitada por **ABCD** na Figura 12 é considerada como a medida da energia irrecuperável.

É  $U_s$  a energia armazenada, que corresponde apenas ao seu meio ciclo de tensão do *loop* de histerese, conforme ilustrado na Figura 12 pela área sombreada em cinza forte.  $U_e$ , corresponde à energia elástica e  $U_p$ , à energia plástica

Ao analisar o ciclo de histerese estável durante uma solitação cíclica, podemos obter uma compreensão mais profunda de diversos aspectos importantes relacionados

Figura 12 – Energia requerida para que o material falhe



Fonte: Adaptado de (CHENG; ZHONG; YONGCHANG, 2019)

à fadiga dos materiais. Essa análise proporciona *insights* valiosos para o estudo das propriedades do material, destacando dois aspectos fundamentais: sua capacidade de dissipar energia e sua resposta não linear.

A capacidade da variação da energia dissipada em relação ao dano é um fator crítico na fadiga dos materiais. Durante os ciclos de solitação, o material sofre deformações e tensões alternadas, levando a perdas de energia devido a mecanismos de atrito interno e dissipação viscoelástica. A quantificação dessa variação de energia é crucial, uma vez que materiais que apresentam altas taxas de dissipação tendem a ter menor resistência à fadiga e, conseqüentemente, menor vida útil sob solitações cíclicas.

Além disso, a resposta não linear do material durante os ciclos de solitação é outro aspecto relevante. Materiais viscoelásticos, como muitos polímeros, podem apresentar uma resposta não linear significativa sob solitações repetidas. Essa resposta não linear pode ser caracterizada pelo desfasamento entre tensão e deformação, representado pelo ângulo de fase ( $\varphi$ ).

Desta maneira, percebe-se que o cálculo da energia dissipada pode ser realizado de diferentes maneiras, dependendo das propriedades do material e do tipo de ciclo de solitação aplicada. Alguns métodos incluem a integração numérica das curvas tensão-deformação, o cálculo da área sob a curva do ciclo de histerese ou o uso de modelos matemáticos específicos. O cálculo da energia dissipada sendo função da tensão e da deformação, envolve a integração do trabalho realizado ao longo desse período ( $T$ ), conforme apresenta-se na equação (11):

$$U_{\text{ciclo}} = \int_0^T \sigma(t) d\varepsilon(t) = \pi \varepsilon_0 \sigma_0 \sin(\varphi), \quad (11)$$

A variável  $\varepsilon_0$  representa a amplitude da deformação por ciclo, enquanto  $\sigma_0$  corresponde à amplitude da tensão por ciclo. Nesse contexto, a variável  $U$  assume o papel de representar a energia dissipada por ciclo.

O ângulo de fase ( $\varphi$ ) é fundamental para compreender o comportamento do material sob solitação cíclica. No capítulo 3 é concedida uma atenção especial ao cálculo do ângulo de fase utilizado no novo método de controle proposto. Isso se deve ao fato de que esse ângulo de fase será calculado ciclo a ciclo, permitindo a identificação do estado do material no ensaio em cada ciclo específico.

Nesta pesquisa foi necessária a utilização da técnica DMA (Dynamic Mechanical Analysis) para estudar o ângulo de fase ( $\varphi$ ) entre a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\varepsilon$ ) e, dessa forma, compreender o comportamento viscoelástico do material. Através da análise do módulo complexo, é possível obter informações detalhadas sobre as propriedades mecânicas do polímeros especialmente em relação à sua resposta a cargas dinâmicas.

## 2.7 MÓDULO COMPLEXO

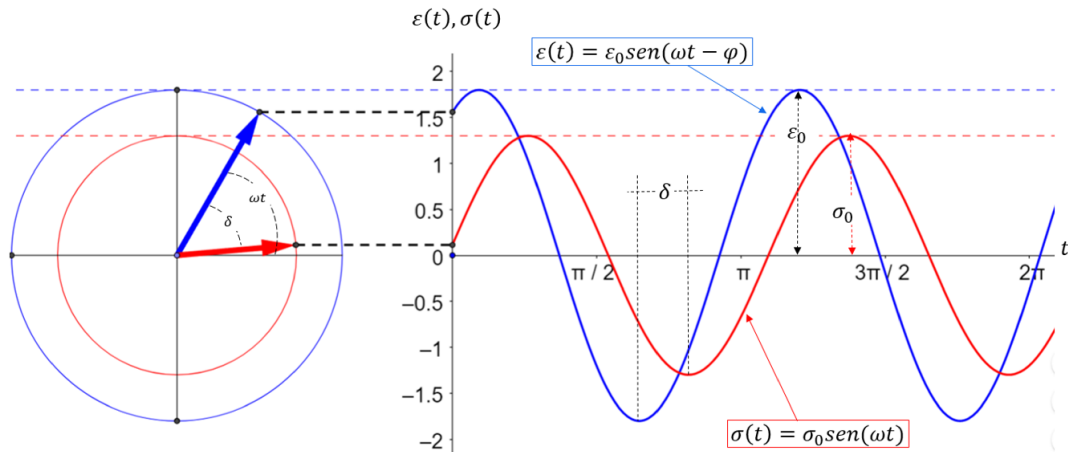
Através da técnica DMA é possível determinar as propriedades termomecânicas dos materiais poliméricos, incluindo o módulo de armazenamento e o módulo de perda em função do tempo, temperatura e frequência  $E(t, T, \omega)$ . Além disso, é possível obter o módulo complexo  $E^*(t, T, \omega)$ , usando uma quantidade reduzida de corpos de provas. No ensaio DMA, uma tensão oscilante inicial ( $\sigma_0$ ) é aplicada no CP para obter como resultado a deformação em uma determinada frequência, durante um tempo específico. A Figura 13 ilustra o princípio do ensaio do módulo complexo utilizando solitações senoidais. Para obter mais detalhes sobre a técnica DMA, consulte o Apêndice E.

No ensaio de DMA, conforme norma (ASTM-D-4065-01, 2019), o sinal de solitação pode ser conforme a equação (13). A razão entre o módulo de perda e módulo de armazenamento resulta na  $(\tan\varphi)$ , (amortecimento), a qual mede a energia de dissipação do material. A terminologia padrão usada nos materiais poliméricos é mostrada na norma (ASTM-D-4092-01, 2019).

A razão entre o módulo de perda e o módulo de armazenamento é determinada por meio da equação (12), e está relacionada com o ângulo de fase do ciclo ( $\varphi$ ), que



Figura 13 – Comportamento de um material viscoelástico em um ensaio cíclico



Fonte: Adaptado de (EVARISTO, 2000) , (Z.Y.ZHANG; RICHARDSON, 2005) , (QUINTERO, C. F. Q., 2011)

resulta entre a tensão aplicada e a deformação resultante, conforme mostra a Figura 14.

A  $(\tan\varphi)$ , conforme a equação (12), ajuda a encontrar a diferença de fase entre as componentes elástica e viscosa do material.

$$\tan\varphi = \frac{E_2}{E_1} \quad (12)$$

Dado um material solicitado ciclicamente conforme expresso pela equação (13), pode-se observar que:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen}(\omega t) = \text{Im}(\sigma^*) \longrightarrow \sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (13)$$

A resposta senoidal do material viscoelástico é conforme a equação (14).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \text{sen}(\omega t - \varphi) = \text{Im}(\varepsilon^*) \longrightarrow \varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}, \quad (14)$$

A equação (15) representa o módulo complexo.

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos\varphi + i\text{sen}\varphi) = E_1 + iE_2 = |E^*| e^{i\varphi} \quad (15)$$

A análise de ensaios ao longo do tempo pode ser demorada na fase de compilação dos resultados. No entanto, uma forma de reduzir esse tempo é submeter o material a uma solicitação em que a tensão ou deformação varie harmonicamente com o tempo. Esse tipo de solicitação possibilita identificar de forma mais eficiente o que

é armazenado e perdido em cada ciclo de deformação, permitindo também a determinação do ângulo de fase entre a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\varepsilon$ ). Essa abordagem é essencial para caracterizar o comportamento viscoelástico do material (NAVARRO, 2017).

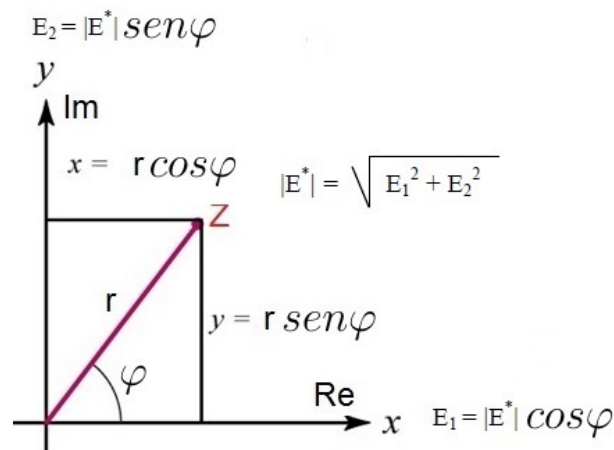
Com relação à fase ( $\varphi$ ), pode-se dizer que um material é idealmente elástico quando a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\varepsilon$ ) estão em fase, ou seja ( $\varphi = 0$ ). Essa condição demonstra que todo o esforço aplicado é armazenado no material e toda a deformação resultante será totalmente recuperada após a remoção da carga.

Por outro lado um material com comportamento viscoso irá apresentar uma tensão ( $\sigma$ ) e uma deformação ( $\varepsilon$ ) defasadas entre  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ , caracterizando  $\varphi = 90^\circ$  um processo 100% irreversível. Portanto, um material viscoelástico irá apresentar uma defasagem representada por ( $\varphi$ ). Os esforços harmônicos, geralmente, são apresentados conforme a equação (16). Sendo ( $r$ ) a amplitude e ( $\varphi$ ) a fase (NAVARRO, 2017).

$$Z = re^{i\varphi} = (x + iy) = r\cos\varphi + ir\sin\varphi \quad (16)$$

Com ajuda da Figura 14 podem ser escritos conforme a identidade de Euler a equação (17) os parâmetros do módulo de perda e o módulo de armazenamento.

Figura 14 – Representação da excitação e resposta dinâmica de um material viscoelástico - módulo complexo linear no plano complexo



Fonte: Elaborado pelo autor

$$Z = r(\cos\varphi + i\sin\varphi), \quad (17)$$

e visto na forma cartesiana:

$$Z = x + iy, \quad (18)$$

onde  $r$  é o valor absoluto ou módulo de  $Z$ , onde  $|Z| = r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , sendo que:

$$x = r \cos \varphi; \quad \sigma'_0 = \sigma_0 \cos \varphi, \quad (19)$$

e

$$y = r \sin \varphi; \quad \sigma''_0 = \sigma_0 \sin \varphi \quad (20)$$

O módulo de armazenamento ( $E_1$ ) é definido como a relação entre a tensão em fase com a deformação e a própria deformação. Esse módulo pode ser determinado em função do tempo ( $E_1 = E_1(t)$ ) ou da frequência aplicada ( $E_1 = E_1(\omega)$ ). Ele representa a quantidade de energia absorvida (armazenada) e recuperada em cada ciclo de carga ou frequência, sob uma mesma amplitude de tensão. O módulo de armazenamento é uma medida reversível e corresponde à resposta elástica do material.

A equação (21) mostra como calcular o ( $E_1$ ) utilizando a razão trigonométrica da equação (19). Essa equação permite obter uma representação do módulo de armazenamento com base nos parâmetros de interesse.

$$E_1 = \frac{\sigma'_0}{\varepsilon_0} \quad (21)$$

O módulo de perda ( $E_2$ ) é obtido através da razão entre a tensão fora de fase e a deformação, como expresso na equação (22) (FLUGGE, 1975).

O módulo de perda representado em função do tempo ou da frequência ( $E_2(t)$  ou  $E_2(\omega)$ ), é definido como a tensão que se encontra desfasada em  $90^\circ$  em relação à deformação, e é dividido pela própria deformação. Em outras palavras,  $E_2$  mede a energia que é dissipada ou perdida na forma de calor durante o ciclo de solitação.

Diferentemente do módulo de armazenamento ( $E_1$ ), o módulo de perda  $E_2$  é uma medida irreversível e corresponde à resposta viscosa do material, indicando a quantidade de energia que é dissipada durante o processo de deformação.

$$E_2 = \frac{\sigma''_0}{\varepsilon_0} \quad (22)$$

Finalmente, o cálculo do módulo complexo requer submeter o material a solitações do tipo senoidal em diversas frequências e temperaturas. Essa análise é conduzida no domínio das pequenas deformações, no qual o polímero se comporta como um material viscoelástico linear.

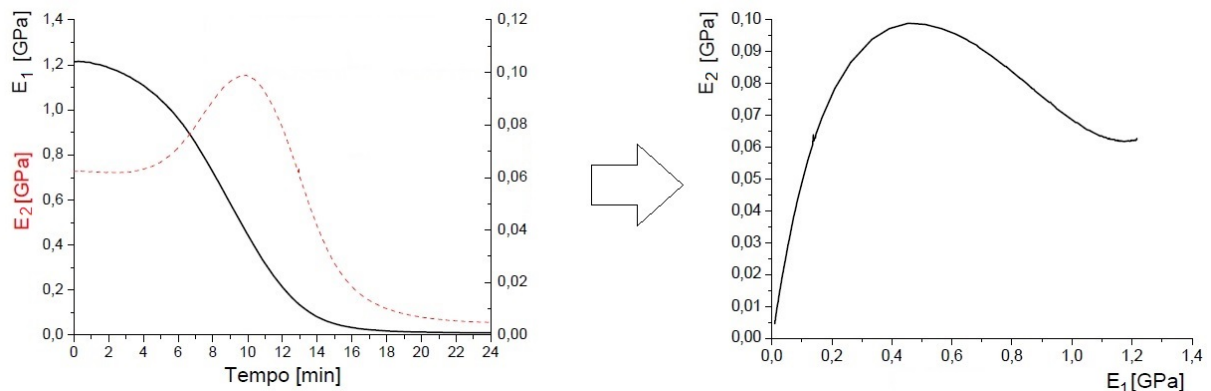
O módulo complexo pode ser interpretado de várias maneiras, e suas componentes variam em função da temperatura e da frequência aplicada nas solitações.

Portanto, o módulo complexo pode apresentar variações quando são realizados ensaios em diferentes temperaturas e frequências.

Nos resultados obtidos por DMA conforme apresentados por (COSTA, 2007), os módulos  $E_1$  e  $E_2$  são exibidos na Figura 15. Observa-se que no final da curva, em temperaturas mais baixas, surge um comportamento peculiar. Esse fenômeno é descrito e analisado em detalhes em (MELO *et al.*, 2006), o que despertou atenção para a importância da preparação adequada dos corpos de prova.

No estudo realizado o material investigado foi o poliuretano, composto por dois componentes: o pré-polímero 329L e o polioliol 47. O autor preparou essas amostras para trabalhar com corpos de prova de acordo com a norma (ANSI-ASTM-D-638-03, 2012), do tipo I. É perceptível na representação do comportamento do módulo complexo que há um comportamento particular do material no início do ensaio, o qual será cuidadosamente considerado nesta pesquisa durante a avaliação dos resultados do ensaio DMA. Os resultados foram representados no plano Cole-Cole, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Resultados DMA -  $E_1$  ,  $E_2$



Fonte: Adaptado de (COSTA, 2007)

O plano Cole-Cole é uma técnica de caracterização de materiais amplamente utilizada na análise dos resultados, que relaciona o módulo de armazenamento ( $E_1$ ) e o módulo de perda ( $E_2$ ) em coordenadas cartesianas, formando uma curva única com formato semelhante a um arco de círculo. Essa curva pode variar com base na frequência e temperatura aplicadas durante o ensaio DMA. Além disso, essa representação é valiosa para ajustar um modelo de comportamento reológico do material.

Por meio do plano Cole-Cole, é possível também analisar o comportamento do módulo complexo, o ângulo de fase e a influência da temperatura e variação da frequên-

cia no ensaio cíclico. Em suma, essa técnica oferece uma visualização mais clara e abrangente do comportamento viscoelástico do material, facilitando a compreensão de suas propriedades reológicas.

A representação do módulo complexo no plano Cole-Cole fornece informações cruciais sobre o comportamento mecânico do material. Nessa representação, a componente real do módulo de armazenamento ( $E_1$ ) geralmente diminui à medida que a temperatura aumenta. Por outro lado, a componente imaginária do módulo de perda ( $E_2$ ) apresenta um ponto de valor máximo, que é considerado como a temperatura crítica (QUINTERO, C. F. Q., 2011). O autor do estudo utiliza o modelo de Huet-Sayegh para descrever o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas investigadas, em três diferentes consistências de ligantes.

## 2.8 MODELO DE HUET-SAYEGH

Os materiais poliméricos apresentam propriedades mecânicas que em determinados aspectos se assemelham a um sólido elástico que obedece à lei de Hooke para a elasticidade; e em outros, à lei de Newton para a viscosidade, comportamento viscoelástico. A parcela viscosa é responsável pela energia dissipada, enquanto a parcela elástica armazena energia. A ocorrência de propriedades viscoelásticas em um material depende em grande parte das condições do ambiente, principalmente da temperatura e frequência (FINDLEY; LAI; ONARAN, 1976a), (FINDLEY; LAI; ONARAN, 1976b).

Como mencionado anteriormente, os ensaios cíclicos têm sido realizados considerando um parâmetro de entrada, seja uma solicitação de carga ( $F$ ) ou uma solicitação de deslocamento ( $u$ ). No entanto, pretende-se implementar uma outra abordagem para realizar o ensaio cíclico, o que requer um estudo aprofundado e análise dos parâmetros relacionados à fadiga do *UHMWPE* no plano complexo.

Para isso, é essencial investigar o fenômeno da viscoelasticidade e examinar um modelo viscoelástico capaz de representar o comportamento do módulo complexo de um material viscoelástico. Um exemplo de modelo que pode ser utilizado é o proposto por (HUET, 1963). Essa análise envolve compreender a influência dos parâmetros de frequência e temperatura, a partir de dados experimentais, a fim de obter uma caracterização mais completa e precisa do comportamento viscoelástico do material.

Os materiais poliméricos podem apresentar diferentes tipos de comportamento

em função da temperatura e da frequência; a baixas temperaturas e elevadas frequências o comportamento é predominantemente elástico; a altas temperaturas a baixas frequências, o comportamento é predominantemente viscoso; a temperaturas intermediárias podem apresentar comportamento viscoelástico.

O comportamento viscoelástico é uma combinação de um sólido elástico e um fluido viscoso, conforme mostra a equação (23), sendo esta equação uma expressão para um sólido viscoelástico não linear.

$$\sigma = f(\varepsilon, t) = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (23)$$

Em pequenas deformações ( $\varepsilon < 1\%$ ), a relação entre tensão e deformação em qualquer instante é frequentemente linear. Nesse caso a deformação e a resposta no tempo podem ser separadas, fornecendo a equação para um material viscoelástico linear, conforme visto, sendo  $E(t)$  o módulo do material, que depende do tempo, conforme a equação (24), (FLUGGE, 1975).

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)E(t) \quad (24)$$

Os materiais viscoelásticos podem ser caracterizados a partir do módulo complexo, que corresponde ao vetor do módulo representado pela soma das componentes real associada à energia armazenada e a componente imaginária associada à energia dissipada por ciclo de solitação.

A combinação de elementos mecânicos, como molas e amortecedores, podem ser utilizados para formar um modelo reológico do material com propriedades viscoelásticas (FLUGGE, 1975), (CHRISTENSEN, 1982).

Os modelos viscoelásticos não incorporam informações detalhadas sobre os fenômenos físicos e moleculares que ocorrem nos materiais poliméricos. No entanto, esses modelos são extremamente úteis para prever a resposta de um material em condições de solitações cíclicas, oferecendo uma visão geral da natureza viscoelástica do comportamento do material.

Ao revisar os modelos viscoelásticos lineares unidimensionais, representados pela combinação de elementos de mola (representando parcelas elásticas) e amortecedor (representando parcelas viscosas), observou-se que as derivadas presentes nesses modelos são valores inteiros, sendo eles 0 ou 1.

No entanto, ao investigar as derivadas de ordem fracionária, abre-se a possibilidade de identificar uma ordem de derivação que não seja um número inteiro. Esse enfoque em derivadas não inteiras é relevante para compreender o comportamento viscoelástico de materiais que exibem respostas complexas e não lineares. Essa abordagem mais avançada ajuda a melhor compreender e caracterizar a resposta viscoelástica de materiais poliméricos em situações mais complexas e realistas.

### 2.8.1 Viscoelasticidade fracionária

Conforme mencionado por (KOELLER, 1984) em sua pesquisa, o parâmetro  $\beta$  é definido como um parâmetro de ordem fracionária, que representa a ordem da derivada fracionária e está compreendido no intervalo de  $0 \leq \beta \leq 1$ . Essa abordagem permite considerar ordens de derivação que não são números inteiros, abrindo caminho para analisar comportamentos viscoelásticos mais complexos e detalhados em materiais poliméricos.

O elemento reológico conhecido como *spring-pot* (SP) ou mola generalizada ajuda a compreender o comportamento que ocorre entre um material elástico e um material viscoso.

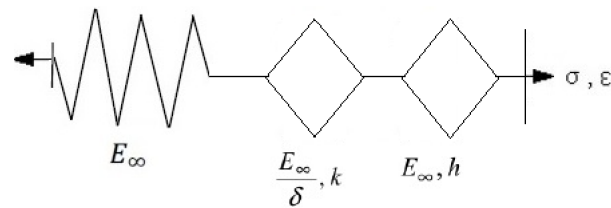
(HUET, 1963), em um estudo, propôs esse elemento representado por  $(\beta)$  e o designou como  $(h)$  e  $(k)$  em seu modelo fracionário. Essa proposta é relevante para a análise de sistemas viscoelásticos complexos, pois permite uma representação mais precisa e detalhada do comportamento do material, considerando a ordem fracionária das derivadas. Essa abordagem será considerada e utilizada visando compreender de forma mais completa o comportamento viscoelástico do material em estudo.

A teoria viscoelástica fracionária, aqui apresentada, se dará considerando as referências (HUET, 1963), (FLUGGE, 1975), (GUEDES, 1997), (DOWLING, 2013), (NAVARRO, 2017), (QUINTERO, C. F. Q., 2011), (QUINTERO *et al.*, 2016), entre outros.

(HUET, 1963) expressou o módulo formulado na equação (25) onde mostra o comportamento no domínio da frequência de um material viscoelástico descrito por um modelo de fluência bi-parabólico associado a uma mola em série conforme mostra a Figura 16 e representado no plano Cole-Cole conforme a Figura 17.

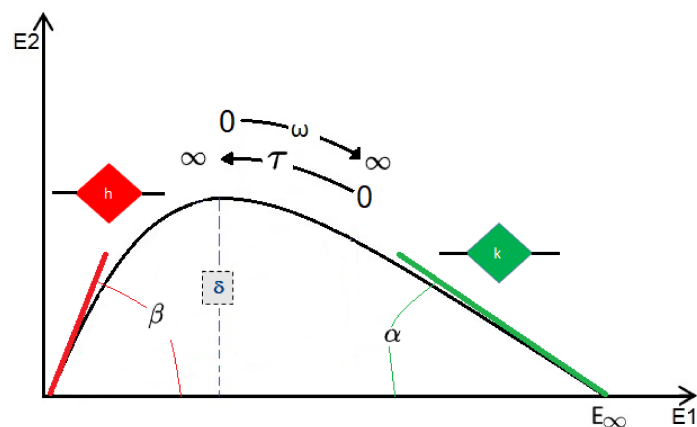
$$E^*(\omega, \tau) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (25)$$

Figura 16 – Representação do modelo de Huet



Fonte: Adaptado de (HUET, 1963)

Figura 17 – Plano Cole-Cole - Modelo de Huet



Fonte: Adaptado de (HUET, 1963)

O modelo proposto por (HUET, 1963), adaptado por Sayegh conforme ilustrado na Figura 18, demonstra a capacidade de abranger uma ampla gama de frequências, sendo caracterizado pela associação em paralelo de duas partes.

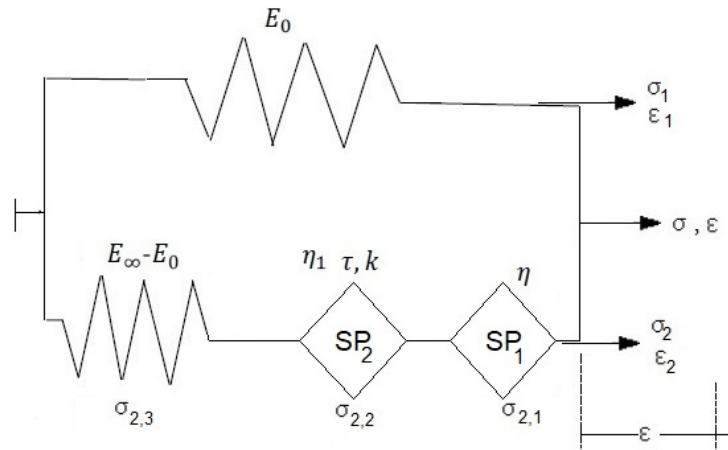
A primeira parte inclui uma mola de módulo  $E_0$ , enquanto a segunda parte é composta por um conjunto em série formado por uma mola de módulo  $E_L = E_\infty - E_0$ , juntamente com dois *spring-pot*  $h$  e  $k$ .

A equação (26) representa o modelo de Huet-Sayegh. A identificação dos parâmetros desse modelo é realizada através de ensaios de módulo complexo sob solicitações muito baixas e frequências também baixas.

$$E^*(\omega, \tau) = \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} + E_0 \quad (26)$$



Figura 18 – Interpretação do modelo Huet-Sayegh



Fonte: Adaptado de (HUET, 1963)

O modelo de Huet-Sayegh possui 8 parâmetros a serem calibrados, sendo eles:

- $h$  e  $k$ : Dois *spring-pot* de viscosidade variável com constantes, de modo que  $0 < k < h < 1$ ,  $h = \frac{2B}{\pi}$ ,  $k = \frac{2A}{\pi}$  (PRONK, 2006).
- $A_0, A_1, A_2$ : São constantes determinadas a partir dos dados experimentais e estão relacionadas com  $\tau(\theta)$ , que representa o tempo de relaxação dos *spring-pot*  $h$  e  $k$ . Esse valor é calculado pela fórmula  $\tau(\theta) = e^{(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)}$ .
- $E_0$ : Representa o módulo estático, obtido nas baixas frequências e elevadas temperaturas
- $E_\infty$ : Representa o módulo elástico instantâneo nas elevadas frequências e baixas temperaturas
- $\delta$ : Constante adimensional

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo detalha a metodologia desenvolvida e os aspectos experimentais para alcançar o objetivo geral de controlar o ensaio de fadiga por meio de uma nova abordagem chamada controle J. É importante ressaltar que foi realizado um trabalho preliminar que consistiu na realização de uma série de experimentos, incluindo ensaios monotônicos, ensaios DMA, ensaios cíclicos com controle de deslocamento e ensaios cíclicos com controle de carga. Após a conclusão do estudo preliminar descrito, foram realizados os ensaios com controle J.

Os detalhes desses ensaios estão descritos a seguir.

A seção 3.3 apresenta os ensaios monotônicos realizados, que fornecem informações essenciais para o estudo. Esses ensaios permitem obter as curvas de tensão-deformação do material, após o tratamento dos dados. A partir dessas curvas, foram derivados valores representativos de parâmetros importantes que descrevem o comportamento do material.

A seção 3.4 descreve os ensaios DMA, os quais fornecem uma visão macro do comportamento do material permitindo trabalhar com frequências de 1 a 25 Hz e temperaturas desde -20 a 170 °C, obtendo principalmente os valores do módulo de perda e o módulo de armazenamento. O objetivo deste ensaio foi estudar e analisar a representação do módulo complexo no plano Cole-Cole. Os ensaios foram realizados conforme norma (ASTM-D-4065-01, 2019) .

A seção 3.5 mostra os ensaios com controle de carga (F), demonstrando da mesma maneira que o controle de deslocamento (u), a possibilidade de construção de curvas do comportamento do material em diferentes condições de solicitação.

A seção 3.6 apresenta os ensaios com controle de deslocamento (u), os ensaios realizados disponibilizam a possibilidade de construção de curvas do comportamento do material em diferentes condições de solicitação.

Por último a a seção 3.7 apresenta os ensaios com controle J, que permitem monitorar simultaneamente os sinais de carga e deslocamento do material. A ideia central consiste na caracterização do material viscoelástico, por meio do controle variação da energia dissipada em relação ao dano.

## 3.2 MATÉRIA PRIMA

A matéria prima utilizada foi o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (*UHMWPE*), e os corpos de prova foram confeccionados a partir de uma barra de seção circular com diâmetro de  $70 \pm 0,1$  mm e comprimento de  $1000 \pm 1$  mm.

O *UHMWPE* é uma matéria prima em forma de pó, podendo ser prensado, o que caracteriza boa tolerância ao desgaste (abrasão) e ao impacto. É muito utilizado na indústria química, alimentícia, farmacêutica e de mineração em itens para sistema de envase, perfis, guias de desgaste, roletes para esteiras, roscas sem fim, revestimentos, produtos médico-cirúrgicos e placas de desgaste, entre outros. Os dados do material fornecidos pelo fabricante são apresentados na Tabela (1).

Tabela 1 – Propriedades do *UHMWPE*

|                        |                           |        |
|------------------------|---------------------------|--------|
| Resistência a tração   | 30 [MPa]                  | D53455 |
| Alongamento à ruptura  | 350%                      | D53457 |
| Módulo de elasticidade | 800 [MPa]                 | D53455 |
| Densidade              | 0,93 [g/mm <sup>3</sup> ] | D53479 |
| Absorção de água       | 0                         | D53715 |

Fonte: <https://www.nylonville.com.br/portfolio-item/polietileno-uhmw/>

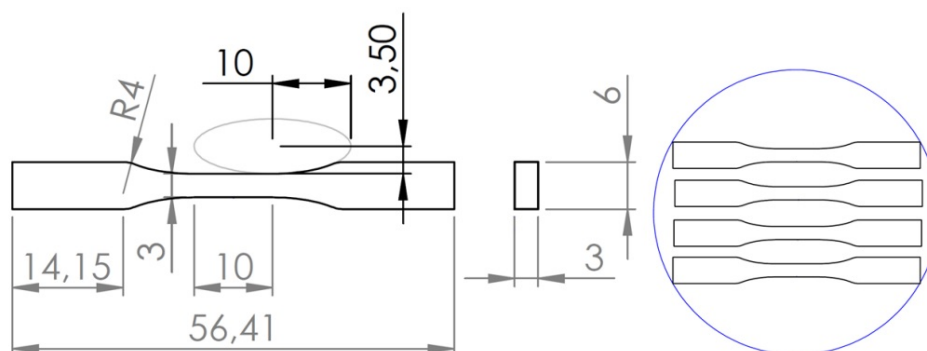
### 3.2.1 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram produzidos com seção retangular sugerida em normas de ensaios de polímeros baseando-se no trabalho desenvolvido por Carvalho (2016). Os corpos de prova foram confeccionados após uma avaliação numérica das geometrias propostas pelas normas ASTM D638 e ISO37. Como resultado, o autor obteve uma geometria com melhores características entre as quatro avaliadas e melhor adequação à extração dos corpos de prova da barra de *UHMWPE* disponível.

A Figura 19 mostra o desenho com dimensões da geometria utilizada nesta pesquisa. A fabricação dos corpos de prova foi realizada com o corte de discos extraídos da barra de *UHMWPE*.

A preparação dos discos foi realizada em um torno com uma rotação de 250 rpm. Após a extração de discos, com uma espessura de 3 mm, é realizado o processo de

Figura 19 – Desenho e dimensões do corpo de prova



Fonte: (CARVALHO, 2016)

corte, mas, antes os discos passaram por um processo de acabamento superficial com lixas 80, 120, 220, 400, 600 e 1200 progressivamente até a retirada de imperfeições e aproximação da espessura projetada do corpo de prova, conforme a Figura 19.

Após a conclusão da fabricação dos discos de *UHMWPE*, utilizou-se um dispositivo de corte, conforme ilustrado na Figura 20, juntamente com uma prensa hidráulica manual de 15 toneladas, para extrair os corpos de prova individualmente. Uma vez obtidos os corpos de prova, realizou-se um ajuste no acabamento de superfície por meio de lixamento.

### 3.2.2 Condicionamento dos corpos de prova

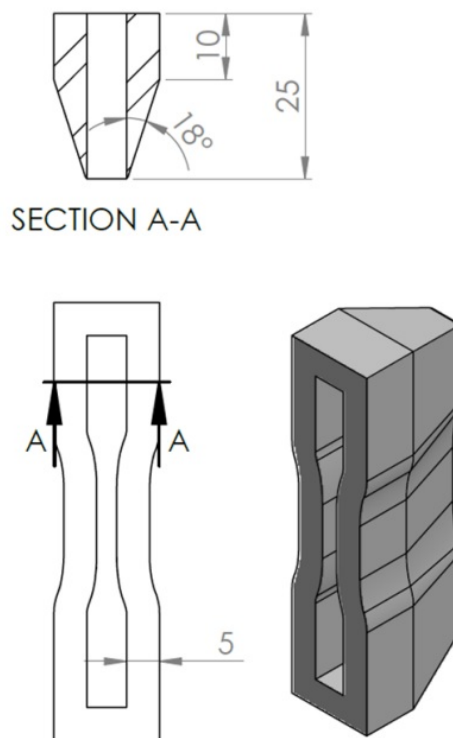
O condicionamento das amostras para os ensaios mencionados nas seções 3.3, 3.6, 3.5 e 3.7, foi efetuado à temperatura de 23°C por cerca de 24 horas. Este tempo de aclimação foi escolhido com base em trabalhos de autores como Liu *et al.* (2008), Lu *et al.* (2014) e Chen *et al.* (2016), (CARVALHO, 2016).

A seguir, serão explanados os ensaios realizados para atingir o objetivo desta pesquisa.

## 3.3 ENSAIOS MONOTÔNICOS

Ensaio monotônicos foram realizados para a caracterização mecânica do *UHMWPE* para a obtenção das relações entre tensão e deformação do material. O equipamento utilizado foi da marca MTS Acumen, modelo 807003. A célula de carga utilizada para o controle foi de 3000 N de capacidade. Para a aquisição dos dados, foi utilizado o sistema de aquisição *FlexTest40* digital controlador da mesma marca

Figura 20 – Dispositivo de corte



Fonte: (CARVALHO, 2016)

MTS. A taxa de aquisição é de 512 pontos/s. Os ensaios foram conduzidos a uma temperatura de 23°C com uma taxa de 0,085 mm/s.

### 3.4 ENSAIO DMA

Foram realizados ensaios cíclicos com um tipo de ensaio de tração, com um modo de operação de multifrequência e uma amplitude de deslocamento de 100  $\mu\text{m}$ ., no equipamento DMA 242 da marca *NETZSCH*. No Apêndice E, mostra-se o procedimento para estimar o valor da sollicitação aplicada de 100  $\mu\text{m}$ .

Esta técnica têm-se mostrado boa para avaliar as propriedades de materiais poliméricos, ajudando a trabalhar com os parâmetros viscoelásticos em função do tempo, temperatura e frequência, observando de maneira mais clara e com uma ampla margem desses parâmetros, o comportamento do material. Propriedades importantes como módulo de armazenamento ( $E_1$ ), módulo de perda ( $E_2$ ) foram avaliadas para obter informações prévias do comportamento viscoelástico do material ensaiado.

Os corpos de prova foram preparados com as seguintes dimensões: comprimento de 13,69 mm, largura de 3,32 mm e espessura de 2,37 mm.

Foram realizados dois grupos de ensaios, nos quais a temperatura foi configurada a cada intervalo de 10 °C. No primeiro grupo, os ensaios foram conduzidos em temperaturas que variaram de 30 °C a 160 °C. Para cada temperatura, foram realizados ensaios com frequências de 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz.

Já no segundo grupo de ensaios, as temperaturas variaram de -20 °C a 160 °C. Para cada temperatura, foram conduzidos ensaios com frequências de 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 25 Hz.

Os resultados obtidos dos ensaios realizados a uma frequência de 1 Hz no segundo grupo foram utilizados como dados de referência para o modelo de Huet-Sayegh. Esses resultados estão detalhados no Apêndice F.

### 3.5 ENSAIO COM CONTROLE DE CARGA

Foram realizados ensaios cíclicos com controle de carga, o formato de onda utilizado foi o triangular. Os ensaios foram realizados no equipamento MTS Acumen. Os ensaios foram programados para um total de 1 milhão de ciclos e realizados conforme o delineamento indicado no quadro (1). A força mínima foi fixada em 15 N, a força máxima em 92 N.

Quadro 1 – Delineamento dos experimentos, controle de carga

| Variáveis         | Nível 1    |
|-------------------|------------|
| $F_{max}$ [N]     | $F_1 = 92$ |
| Temperatura [ °C] | $T_1 = 23$ |
| Frequência [Hz]   | 5          |

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.6 ENSAIO COM CONTROLE DE DESLOCAMENTO

Foram realizados ensaios cíclicos randomizados com controle de deslocamento. O equipamento utilizado foi da marca MTS Acumen. Os ensaios foram programados para um total de 1 milhão de ciclos e executados conforme o delineamento indicado no quadro (2).

Cabe ressaltar que nos ensaios com controle de deslocamento ( $u$ ), a solicitação ( $\varepsilon(t)$ ) geralmente não é senoidal, sendo preferida uma onda triangular, o que proporciona uma velocidade de deformação constante. No caso de materiais que são sensíveis

à taxa de deformação este cuidado é essencial, pois caso contrário o laço de histerese resultante se apresenta com os extremos arredondados (ROSA, 2002).

Quadro 2 – Delineamento dos experimentos, controle de deslocamento

| Variáveis         | Nível 1      | Nível 2     | Nível 3      |
|-------------------|--------------|-------------|--------------|
| $u$ , [mm]        | $u_1 = 0,15$ | $u_2 = 0,2$ | $u_3 = 0,25$ |
| Temperatura, [°C] | $T_1 = 23$   |             |              |
| Frequência, [Hz]  | 3            | 5           | 7            |

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 – Planejamento dos experimentos, controle de deslocamento

| Ordem dos ensaios | $u_{max}$ , [mm] | Temperatura, [°C] | Frequência, [Hz] |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| CP # 9            | $u_3$            | $T_1$             | $f_2$            |
| CP # 2            | $u_1$            | $T_1$             | $f_3$            |
| CP # 1            | $u_1$            | $T_1$             | $f_1$            |
| CP # 3            | $u_3$            | $T_1$             | $f_3$            |
| CP # 7            | $u_2$            | $T_1$             | $f_1$            |
| CP # 4            | $u_3$            | $T_1$             | $f_1$            |
| CP # 8            | $u_2$            | $T_1$             | $f_3$            |
| CP # 5            | $u_1$            | $T_1$             | $f_2$            |
| CP # 6            | $u_2$            | $T_1$             | $f_2$            |

Fonte: Elaborado pelo autor

## 3.7 ENSAIO COM CONTROLE J

### 3.7.1 Introdução

Essa nova abordagem permite o cálculo contínuo, ciclo a ciclo, da energia dissipada em relação ao dano, denominado nesta pesquisa como J, como uma variável de controle durante o ensaio.

Ao optar pelo controle J, é essencial calcular a energia dissipada, através do trabalho realizado, ciclo a ciclo, em tempo real. Além disso, é necessário quantificar o dano atuante no material, que na mecânica da fratura é tradicionalmente caracterizado pelo tamanho da trinca existente, a qual gradualmente aumenta.

No caso específico do *UHMWPE*, o comportamento viscoelástico leva a um dano no material que não se caracteriza necessariamente como uma trinca, mas sim como uma alteração na estrutura das macromoléculas. Essa alteração resulta na perda de rigidez do material, que pode ser calculada através de mudanças no módulo complexo. Uma maneira de quantificar isso é calculando o dano relativo, expressando a perda de rigidez do material em relação ao módulo complexo inicial.

Devido ao comportamento viscoelástico do *UHMWPE*, é essencial separar as componentes do módulo complexo através do ângulo de fase, usando uma transformada discreta de Fourier (DFT). Esse cálculo é realizado em tempo real e foi especialmente desenvolvido para o equipamento MTS Acumen, utilizando a linguagem de programação *Python*. Essa abordagem possibilita o cálculo do controle J, ciclo a ciclo, e permite que ele seja tratado como a variável de controle do ensaio. O parâmetro físico de controle, neste caso, o controle de deslocamento para iniciar o ensaio, é corrigido ao longo do procedimento para manter constante a variação da energia dissipada em relação ao dano, medida por J.

Para realizar essa tarefa, emprega-se um sistema de *feedback* calculado instantaneamente, retroalimentando o sistema do ensaio. Esse *feedback* tem a capacidade de alterar a solicitação de entrada de acordo com critérios pré-estabelecidos na programação da rotina implementada. Ressalta-se que, devido à ausência de uma metodologia estabelecida para esta nova abordagem, a rotina do ensaio foi primeiramente idealizada para ser aplicada nos ensaios realizados. Inicialmente, foi planejada uma metodologia para o cálculo do ângulo de fase. Posteriormente, essa metodologia de caracterização foi implementada no equipamento MTS Acumen para ser utilizada durante os ensaios.



### 3.7.2 Planejamento dos experimentos, controle J

Foram realizados ensaios cíclicos, seguindo três princípios básicos, deve-se ter em conta: Duplicação de experimentos: Realizar três experimentos para cada nível, Randomização: Realizar os experimentos em uma sequência aleatória; Definição de blocos: Realizar o experimento em: (1 semana, 4 semanas, 8 semanas, 12 semanas, 16 semanas e 24 semanas).

O planejamento do experimento é baseado no projeto fatorial de múltiplos níveis, considerando três níveis para a variável frequência, 1 nível para a temperatura e ( $U$ ). As variáveis controláveis são: frequência; temperatura e deslocamento, conforme mostrado no Quadro 3. Assim, o experimento será realizado com 9 ensaios randômicos. Considerando pelo menos três pontos para cada ensaio o número de ensaios aumenta para 27, eles serão divididos em três blocos, o que levou a um planejamento de ensaios e relatórios de aproximadamente 8 meses.

Quadro 3 – Delineamento dos experimentos, controle J

| Variáveis       | Nível 1    | Nível 2 | Nível 3 |
|-----------------|------------|---------|---------|
| $J, J/mm^3$     | $J_1$      | $J_2$   | $J_3$   |
| Temperatura, °C | $T_1 = 23$ |         |         |
| Frequência, Hz  | 3          | 4       | 5       |

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 – Planejamento dos experimentos, controle J

| Ordem dos ensaios | $J [J/mm^3]$ | Temperatura, [°C] | Frequência, [Hz] |
|-------------------|--------------|-------------------|------------------|
| CP # 6            | $J_3$        | $T_1$             | $f_2$            |
| CP # 2            | $J_1$        | $T_1$             | $f_3$            |
| CP # 1            | $J_1$        | $T_1$             | $f_1$            |
| CP # 5            | $J_3$        | $T_1$             | $f_3$            |
| CP # 3            | $J_2$        | $T_1$             | $f_1$            |
| CP # 9            | $J_3$        | $T_1$             | $f_1$            |
| CP # 7            | $J_2$        | $T_1$             | $f_3$            |
| CP # 4            | $J_1$        | $T_1$             | $f_2$            |
| CP # 8            | $J_2$        | $T_1$             | $f_2$            |

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.7.3 Critério de parada para o controle J

Entende-se que, para uma metodologia de ensaio, como o controle J, que é uma nova abordagem, não existe uma norma específica disponível para determinar um critério de parada do ensaio. Dada a natureza dinâmica do ensaio de controle J e as características do material, é crucial considerar critérios que se apliquem especificamente a esse tipo de ensaio. Com base nas informações fornecidas, foram adotadas três alternativas como critérios de parada no ensaio com controle J:

Uma alternativa é definir um número máximo de ciclos a serem aplicados no ensaio. Isso assegura que o ensaio não seja executado indefinidamente e seja interrompido após um certo número de ciclos. Neste estudo, esse número foi estipulado em 1 milhão de ciclos.

Outra opção é estabelecer um limite para o aumento do deslocamento máximo. Quando o material atingir esse limite, o ensaio seria interrompido. Esse critério leva em conta o fato de que a sollicitação de entrada tende a aumentar continuamente após um número específico de ciclos. Por exemplo, por meio de ensaios monotônicos, foi estimada a tensão de escoamento do material em 17 MPa, ocorrendo quando o material atinge uma deformação de 3,8%, equivalente a um deslocamento de 0,7 mm. Esse valor é o limite para parar o ensaio.

A terceira alternativa de critério de parada baseia-se na variação da perda de rigidez do material, que pode ser avaliada quando o módulo complexo atingir 50% do valor inicial.

### 3.7.4 Definição dos parâmetros iniciais do ensaio com controle J

Após pesquisas realizadas baseadas no levantamento de patentes (B.1) chegou-se a conclusão que não existia algum equipamento com uma rotina já preestabelecida para realizar este tipo de ensaio. Por este motivo o equipamento selecionado para realizar os ensaios com controle J foi o MTS Acumen.

Antes de iniciar o ensaio, conforme a metodologia de caracterização descrita na Figura 22, é fundamental considerar algumas definições de parâmetros importantes. Essas definições podem variar de acordo com as preferências do ensaio e estão apresentadas a seguir:

- O tipo de sollicitação adotada foi a rampa triangular, com flutuação sob tração.
- O valor de deslocamento mínimo foi fixado em 0,1 mm para todos os ensaios, enquanto o valor de deslocamento máximo inicial variou de 0,11, a 0,15 mm, ( $R > 0$ ).
- O número de ciclos para as etapas iniciais foi de 1 ciclo.
- O *looping* de  $J_N$  foi configurado para 1 milhão de ciclos.
- O critério de parada apresenta três alternativas já mencionadas na seção 3.7.3.
- A frequência para todos os ensaios foi programada em 5 Hz.
- O controle de deslocamento foi definido como ensaio inicial que corresponde aos três primeiros ciclos: A, B, C, para levantar as propriedades iniciais do material.

O ciclo A, o primeiro ciclo, obtém o módulo complexo.

O ciclo B, o segundo ciclo, obtém as propriedades para o primeiro valor do dano  $D_0$ , e o primeiro valor da energia  $U_0$ .

O ciclo C, corresponde ao terceiro ciclo que irá calcular e armazenar o primeiro valor de  $J_C$ , sendo esse valor o de referência para comparação com os ciclos seguintes .

- O critério de comparação dos ciclos durante o *feedback loop* foi estabelecido em 1%. É o limite de alteração de J, para não exigir correção para os ciclos seguintes.
- O *feedback* foi programado para ser realizado a cada 50 ciclos. Esse *feedback* , consiste no seguinte: se o cálculo do *looping* for menor ou igual a 1%, o ensaio prossegue com o mesmo deslocamento máximo anterior.
- Por último, Os valores predefinidos para  $u_{max1}$  e  $u_{max2}$  foram estabelecidos em 0,001 e -0,001 mm, respectivamente, estes valores dependem do equipamento utilizado.

No entanto, se esse valor exceder 1%, o programa considera duas possibilidades: se  $J_C \leq J_N$ , é aplicada uma redução ao valor de  $u_{max2}$  no deslocamento máximo subsequente. Por outro lado, se  $J_C > J_N$  for verdadeiro, o valor de  $u_{max1}$  é adicionado ao próximo deslocamento máximo.

### 3.7.5 Rotina para análise dos ensaios com controle J

Um dos principais desafios para desenvolver a nova abordagem de controle J, foi a implementação de uma metodologia em que calcula-se a variação da energia em relação ao dano. E um dos pontos mais importantes é o cálculo de fase do sinal da saída em relação ao sinal de entrada, isto é, o cálculo do ângulo de fase  $\varphi$ .

A solução para encontrar o ângulo de fase foi a implementação da transformada discreta de Fourier (DFT), conforme mostra-se nas equações (27) e (28), essa última equação ajuda a converter uma sequência de amostras, neste caso de 94 pontos, igualmente espaçadas por 0,001953 s, de uma função, em uma sequência do mesmo comprimento de amostras, resultando em um valor complexo em função da frequência.

A metodologia para o cálculo do ângulo de fase no controle J, já implementado no equipamento MTS Acumen, está exposta na Figura 21.

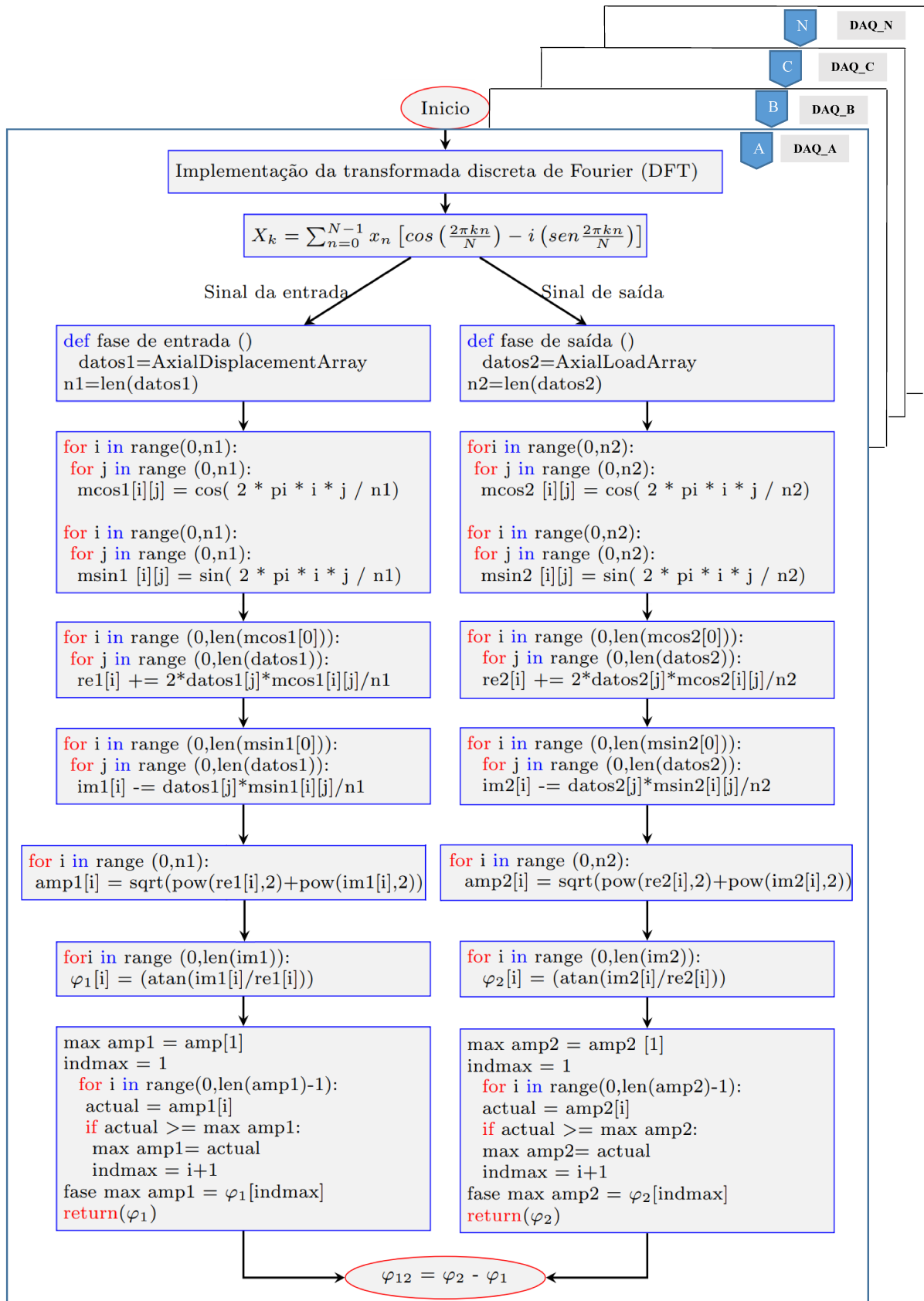
A metodologia de caracterização de materiais viscoelásticos utilizando o novo tipo de controle J está apresentada na Figura 22.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}kn}, \quad (27)$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left[ \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - i \left( \operatorname{sen}\frac{2\pi kn}{N} \right) \right], \quad (28)$$

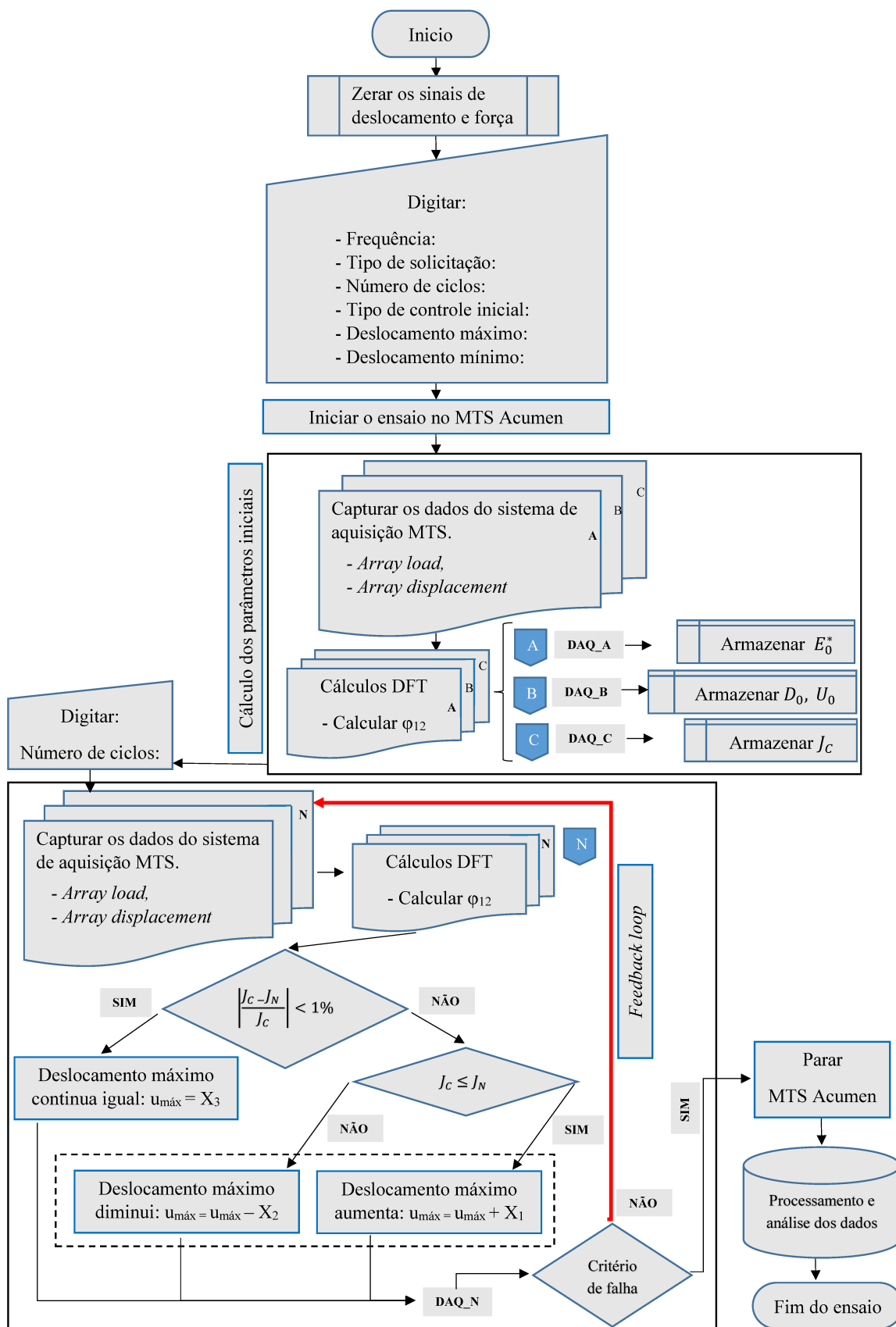
sendo, N o número de dados, n número de ordem na sequência.

Figura 21 – Metodologia para o cálculo do ângulo de fase no controle J



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 – Metodologia de caracterização de materiais viscoelásticos utilizando o novo tipo de controle J



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos via experimental conforme sequência descrita no capítulo (3).

Os corpos de prova avaliados nas seções 3.6 e 3.5 não apresentaram ruptura, portanto, os resultados foram analisados até o módulo complexo atingir o valor do 50% do seu valor inicial.

### 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÔNICOS

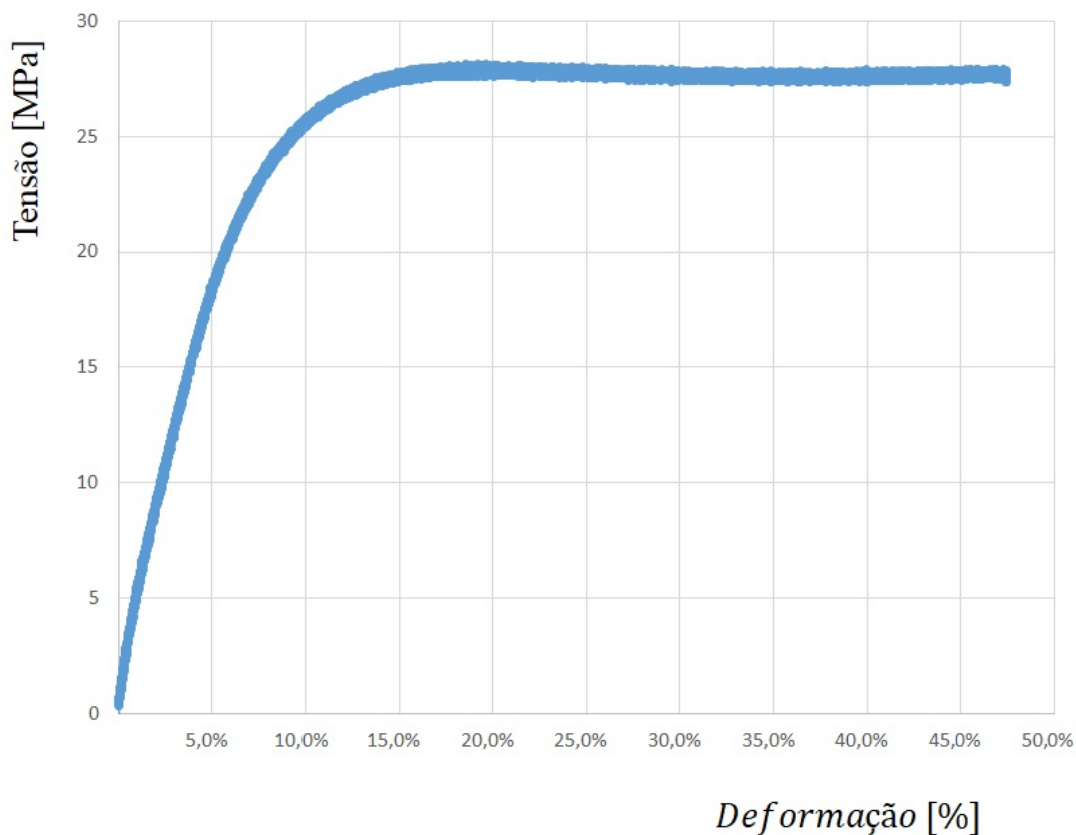
O principal objetivo de realizar este ensaio monotônico foi gerar informações que, após o tratamento dos dados, possibilita-se a geração da curva tensão deformação, de onde retira-se o valor referente aos parâmetros associados do *UHMWPE*.

Da análise experimental, conforme a Figura 23, o valor de 17 MPa foi estimado experimentalmente de acordo com a norma (ANSI-ASTM-D-638-03, 2012) em temperatura de 23 °C a seco, e utilizado como referência para a tensão de escoamento do *UHMWPE* nos ensaios. Nesse ponto, também foi estimada uma deformação de 3,8%, para um deslocamento máximo aproximado de 0,7 mm.

Para determinar o módulo de elasticidade, foi usada a Norma (ISO 527-1:2012), que recomenda analisar a inclinação da curva tensão-deformação dentro do intervalo compreendido entre as deformações:  $\varepsilon_1 = 0,05\%$  e  $\varepsilon_2 = 0,25\%$ . Foi realizado um estudo nesse intervalo com uma amostra de cinco grupos, contendo cada grupo cinco valores do módulo de elasticidade. Primeiramente, calculou-se a média de cada grupo e, posteriormente, somaram-se os resultados e dividiram-se pelo número total de grupos. O resultado final encontrado foi de 850,61 MPa.

Nos ensaios monotônicos foi observado, que à medida que é aumentada a taxa de deformação, a tensão de escoamento tende a aumentar, por outro lado, nota-se que aumentando a temperatura a tensão de escoamento diminuí. Resultados semelhantes foram identificados em estudos anteriores conduzidos por (CARVALHO, 2016) e (KURTZ *et al.*, 1998).

Figura 23 – Resultado do ensaio monotônico no MTS Acumen



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS USANDO A TÉCNICA DMA

Os resultados dos ensaios apresentados na Figura 24 foram conduzidos com uma amplitude de deslocamento constante de  $100\mu\text{m}$ . Essa amplitude foi selecionada conforme informação que encontra-se no Apêndice E. O ensaio foi realizado com frequências de 1, 5 e 10Hz respectivamente. As temperaturas foram tomadas desde 30 até 160 °C.

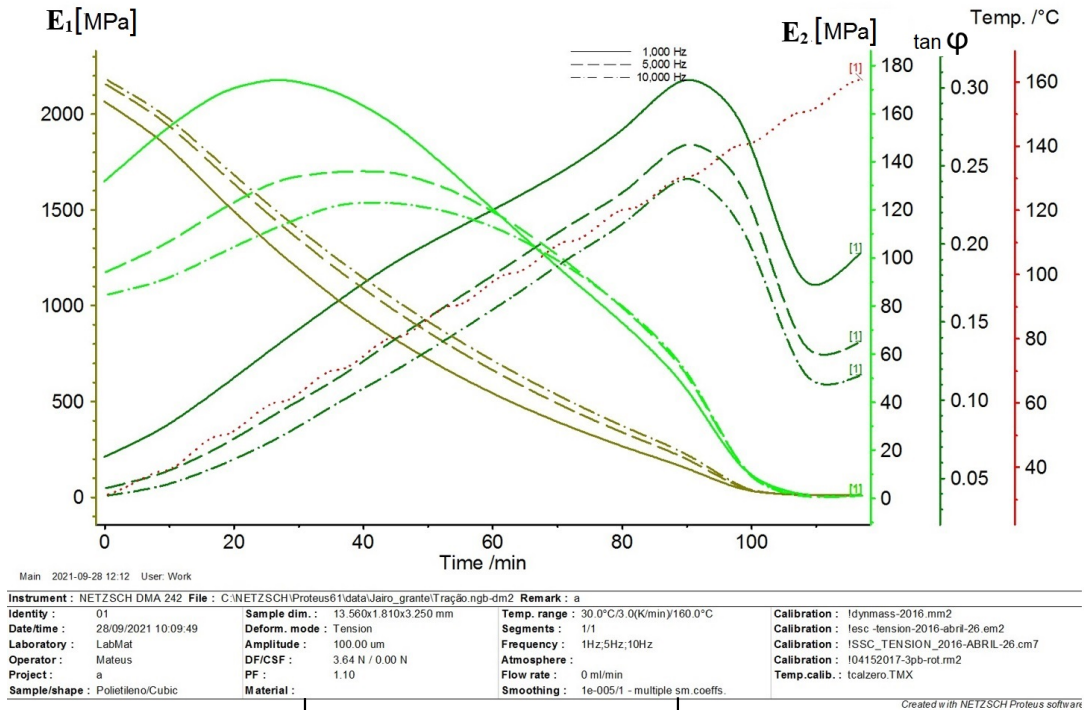
Os resultados apresentados na Figura 25 foram ensaios conduzidos com uma amplitude de deslocamento constante de  $100\mu\text{m}$ , com frequências de 1, 5 10, 20, 25 Hz respectivamente. As temperaturas foram tomadas desde -20 a 170 °C. Os resultados obtidos para 1Hz são expostos no Apêndice F.

O módulo complexo determinado no ensaio DMA pode ser representado usando a equação (25), do modelo de Huet-Sayegh.

A representação gráfica dos resultados expostos na Figura 26, do módulo complexo no plano Cole-Cole consiste em relacionar os módulos  $E_1$  e  $E_2$ , a temperatura, e

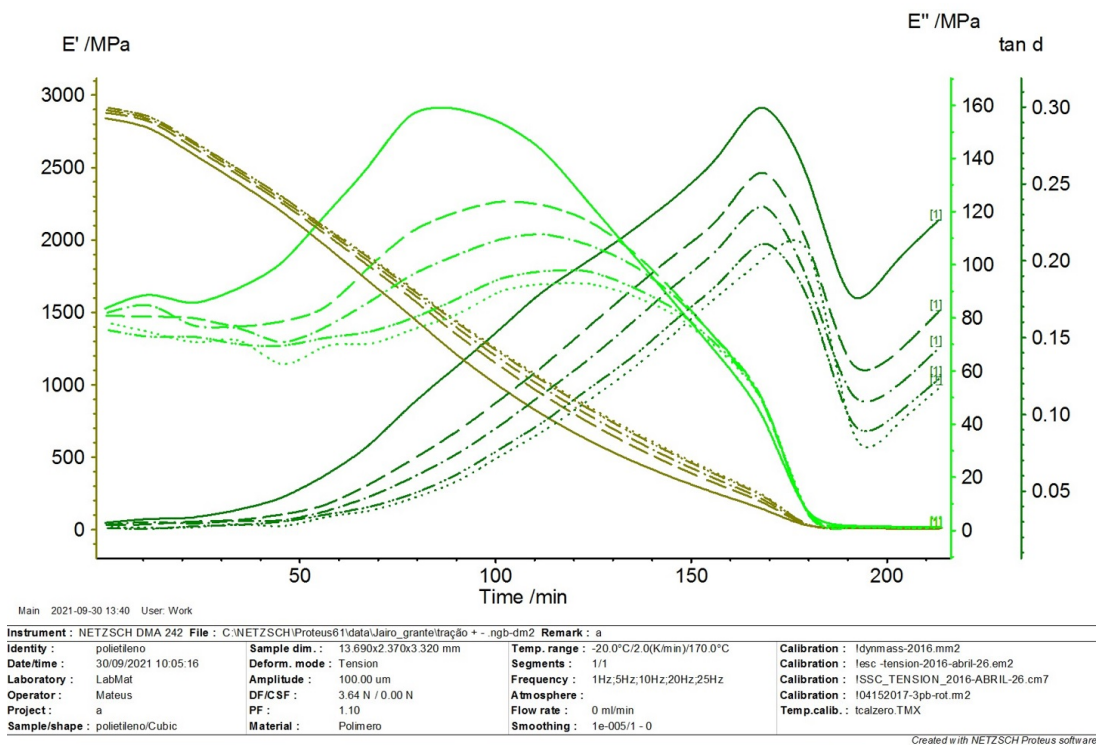


Figura 24 – Ensaio DMA 100 μm 1,5,10 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

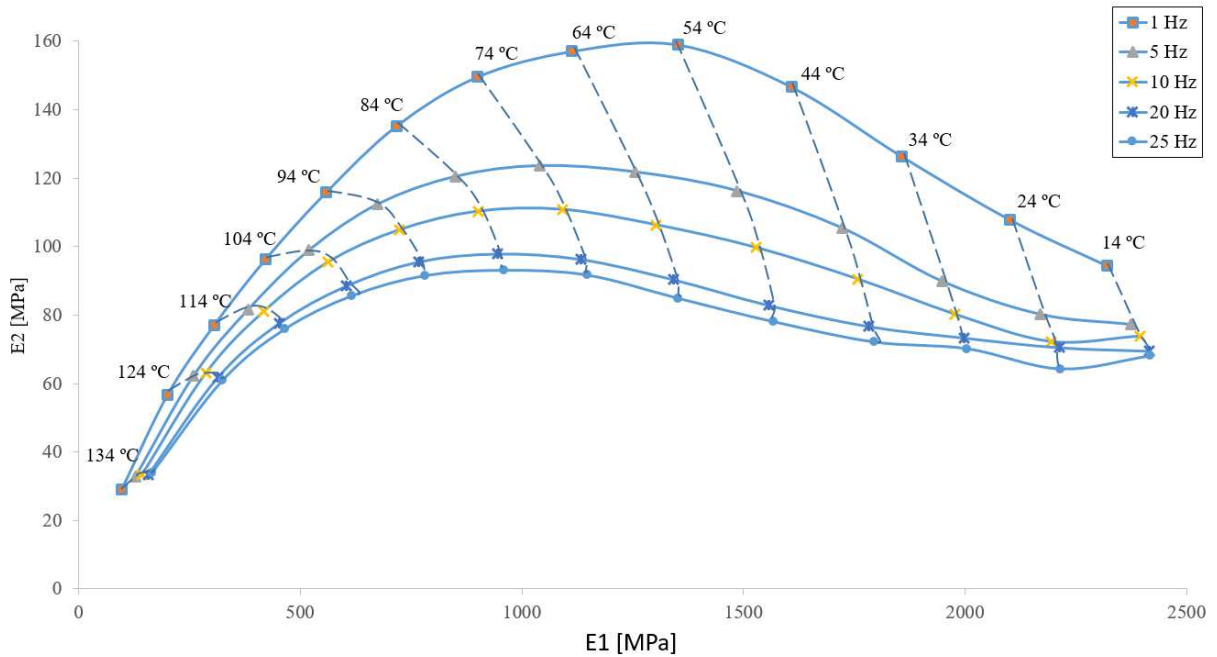
Figura 25 – Ensaio DMA 100 μm, a: 1,5,10,20,25 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

frequência. Os resultados mostram o avanço desde uma região fria de 14 °C até uma região mais quente de 134 °C. Os resultados do ensaio de módulo complexo para 1 Hz são apresentados na tabela do Apêndice F.

Figura 26 – Resultados do ensaio DMA, frequências de 1, 5, 10, 20, 25 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

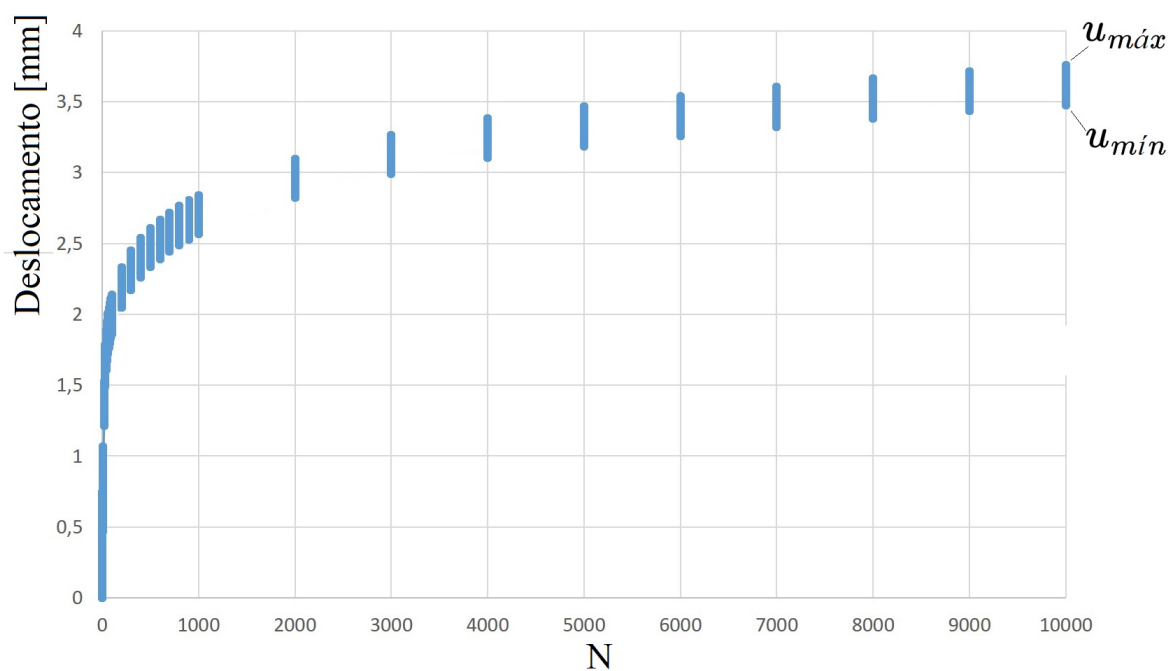
Com base nessa representação é possível entender melhor e acompanhar os parâmetros envolvidos em função da temperatura e da frequência. Salienta-se que a curva representada no plano Cole-Cole da Figura 26 é usada para calibrar o modelo do comportamento reológico do Huet-Sayegh. Pode-se observar que houve deslocamento do parâmetro  $E_2$ . Esse fenômeno pode estar apresentando a diminuição da rigidez do material, portanto o fenômeno de dano.

#### 4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CONTROLE DE CARGA

Um dos resultados obtidos no ensaio com controle de carga é o deslocamento resultante, que pode ser observado na Figura 27. Além disso, a Figura 28 mostra o laço de histerese, que representa a deformação incremental sofrida pelo material.

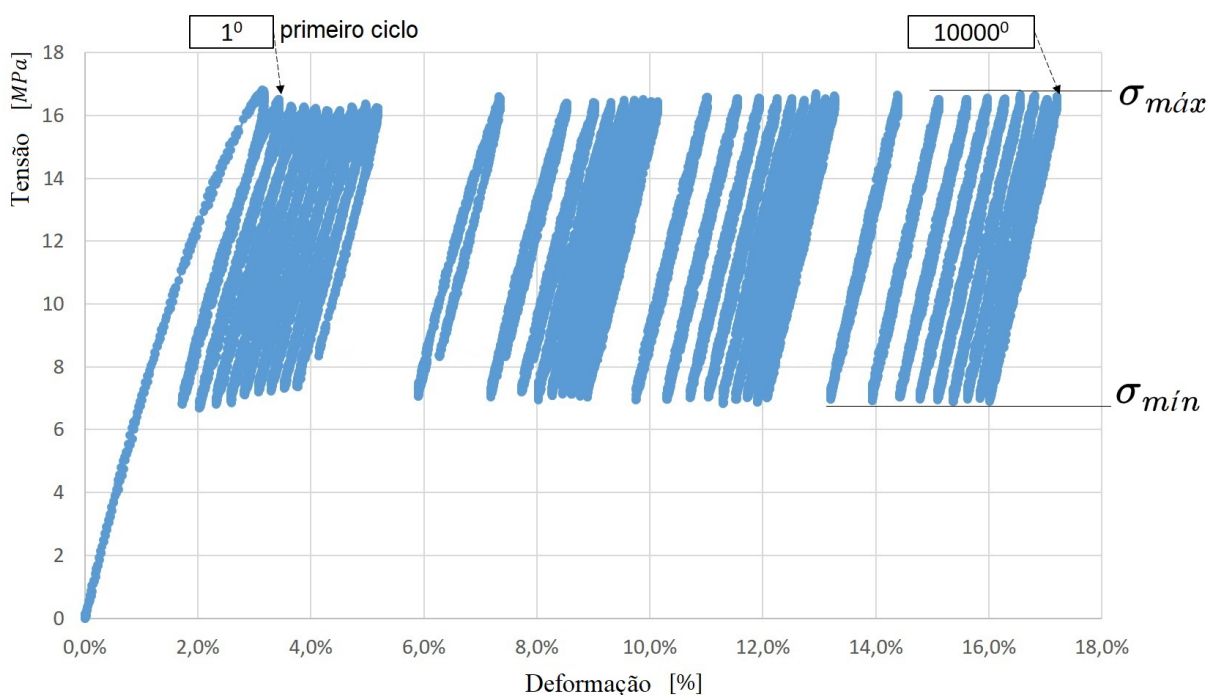
Para fins de comparação e com o propósito de demonstrar a deformação incremental progressiva, foram apresentados na Figura 28 os laços de histerese correspondentes às curvas de tensão-deslocamento do 1º ciclo ao ciclo 10000º.

Figura 27 – Comportamento da variável monitorada: deslocamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 – Resultados dos ensaios com controle de carga mostrando os laços de histerese com deformação incremental



Fonte: Elaborado pelo autor

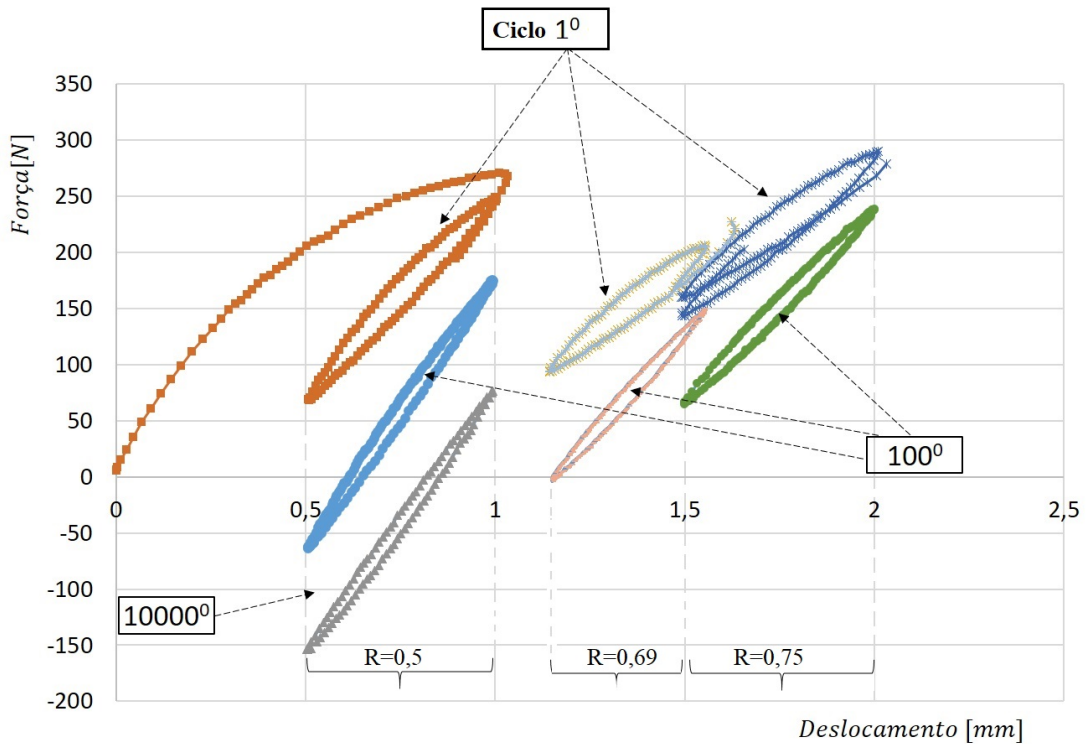
#### 4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CONTROLE DE DESLOCAMENTO

Na Figura 29 são mostrados três dos resultados obtidos dos laços de histerese para os ensaios com controle de deslocamento. Nesses ensaios foram variados os valores dos limites de deslocamento mínimo e deslocamento máximo.

Para efeito comparativo com o propósito de mostrar a relaxação progressiva dos laços de histerese correspondentes às curvas de força - deslocamento dos ciclos 1 e 199357 respectivamente, são apresentados na Figura 30.

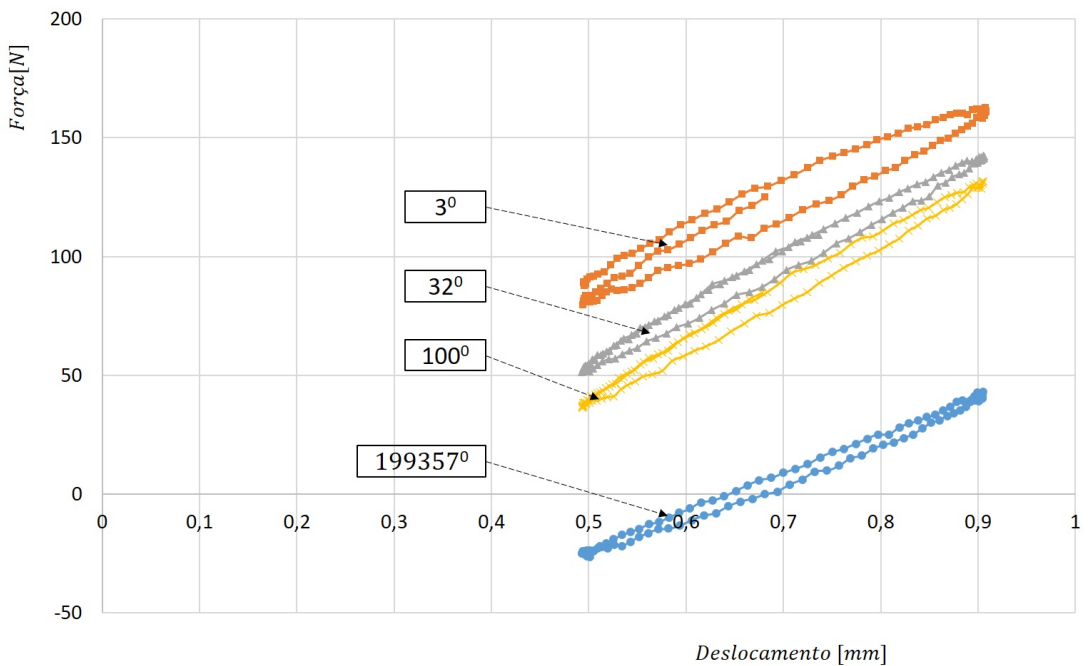
No Apêndice G, apresenta-se um estudo adicional conduzido utilizando o ensaio com controle de deslocamento. O objetivo dessa análise foi observar o comportamento do material em relação a um potencial aquecimento quando submetido a solicitações cíclicas. Por meio desse ensaio, busca-se compreender como o material responde termicamente diante das cargas dinâmicas aplicadas, o que é crucial para avaliar sua estabilidade e desempenho em condições reais de uso. Esse estudo contribui para uma abordagem mais abrangente na caracterização das propriedades viscoelásticas do material e pode fornecer informações valiosas.

Figura 29 – Compilação dos resultados com controle de deslocamento, com  $R = 0,5$   $R = 0,69$   $R = 0,75$ , mostrando o comportamento de amolecimento da força



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 – Comparação dos laços de histerese do ensaio com controle de deslocamento



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CONTROLE J

O controle J, baseado em energia, foi desenvolvido a partir da combinação simultâneas de força e deslocamento para comportamentos de solicitações cíclicas contínuas usando como controle a equação (7), onde ciclo a ciclo é avaliado o comportamento do material, ou seja, é realizado um *feedback* em um instante  $i$ , logo este *feedback* serve como retroalimentação ao programa que está executando o ensaio cíclico.

A equação (7), representa a respectiva relação cíclica levando em consideração a variação da energia dissipada em relação ao dano ao longo da vida do material. Os parâmetros para a equação (7) são definidos da seguinte forma:  $dU$  representa a energia dissipada em um ponto ( $i$ ), menos a energia dissipada em um ponto ( $i+1$ ), ao longo do ensaio. Dessa mesma maneira  $dD$  representa a evolução do dano comparado com o dano calculado logo no primeiro ciclo. O método de controle  $J$  consiste em manter uma margem de tolerância para o valor de variação da energia em relação ao dano, nesta pesquisa foi estipulado em 1%, representada conforme a equação (29).

$$\left| \frac{J_C - J_N}{J_C} \right| < 1\%, \quad (29)$$

sendo  $J_C$  o valor de J que será levada em consideração como referência como ponto inicial, esse valor é calculado no ciclo C, conforme observa-se na Figura 22. Logo  $J_C$  será comparado com um ponto ( $i+1$ ) que corresponde ao valor de  $J_N$ . O valor de 1% pode ser trocado conforme critério de desenho. O sistema de aquisição, ao realizar o cálculo, faz uma pausa muito breve antes de prosseguir para o próximo ciclo. Os valores que estão acima da variação escolhida de 1% correspondem exatamente ao momento em que o cálculo é realizado, ou seja, esses valores não são levados em consideração para o próximo ciclo.

A energia dissipada durante um processo cíclico é determinada com a equação (11) sendo  $\varphi$  o ângulo de fase por ciclo representando a variável que precisa o uso da transformada discreta de Fourier. Internamente é calculado o respectivo valor da amplitude que corresponde ao ciclo, se escolhe o índice desse ciclo e imediatamente calculada a fase correspondente para esse índice. Percebe-se na relação mostrada para a energia dissipada que independe da temperatura do ensaio e do tipo de solicitação.

A continuação serão apresentados os resultados dos parâmetros obtidos no

ensaio com controle J.

As Figuras: 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37 ilustram o comportamento da amplitude do sinal, o módulo de armazenamento ( $E_1$ ), o módulo de perda ( $E_2$ ), o módulo complexo ( $E^*$ ), a energia (U), o dano (D), e a variação da energia em relação ao dano ( $J_N$ ), em um ensaio com controle J.

A partir dos resultados das máximas amplitudes ciclo a ciclo obtidos é possível calcular a máxima amplitude do sinal da saída, este resultado é usado para calcular o ângulo de fase. Isto é, cada ciclo tem uma amplitude de saída diferente o qual vai sempre diminuindo. Os parâmetros módulo de armazenamento ( $E_1$ ), módulo de perda ( $E_2$ ), módulo complexo ( $E^*$ ), (U), (D), dano ( $J_N$ ), são consequentes do cálculo do ângulo de fase.

No resultado do módulo de perda ( $E_2$ ) apresentado na Figura 33 e na energia mostrada na Figura 35, é possível notar uma tendência e um padrão diferentes em comparação ao ensaio com controle de deslocamento, ou mesmo ao mesmo ensaio DMA ilustrado nas Figuras 24 e 25. O Apêndice E apresenta várias curvas que mostram esse comportamento.

O módulo de perda exibe uma característica de crescimento no início do ciclo, alcançando um ponto onde é capaz de dissipar mais energia e, em seguida, começa a diminuir. Porém, no ensaio com controle J, esse parâmetro também aumenta no início, mas após um determinado número de ciclos, ele começa a diminuir. No entanto, ao contrário do controle de deslocamento, esse padrão mantém-se constante nos resultados, como mostrado na Figura 33.

A variação da energia em relação ao dano ( $J_N$ ) apresenta o comportamento constante conforme esperado, como pode ser observado na Figura 37.

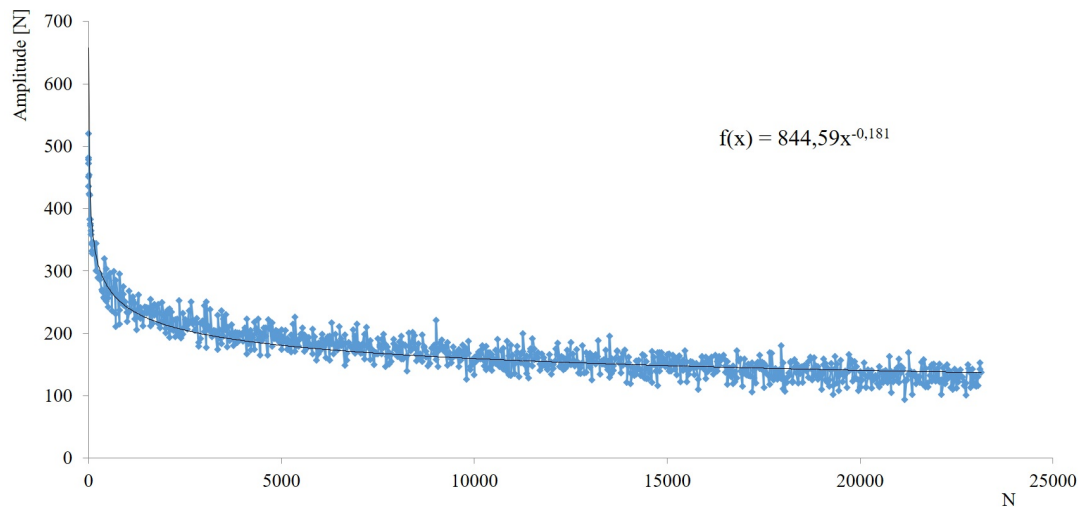
Na Figura 31 é possível observar o registro da amplitude do sinal para cada leitura de dados, realizadas a cada 50 ciclos até 20000 ciclos.

Além disso, na Figura 32 pode-se visualizar o comportamento da diminuição do módulo de armazenamento  $E_1$  ao longo do ensaio. Todos os ensaios com controle J apresentaram esse comportamento para o módulo.

Esses resultados indicam que o controle J está influenciando consistentemente o comportamento do material ao longo do ensaio, mantendo a variação de energia constante e afetando diretamente o módulo de armazenamento  $E_1$ . Esses fatos são fundamentais para a compreensão do desempenho e da integridade do material em

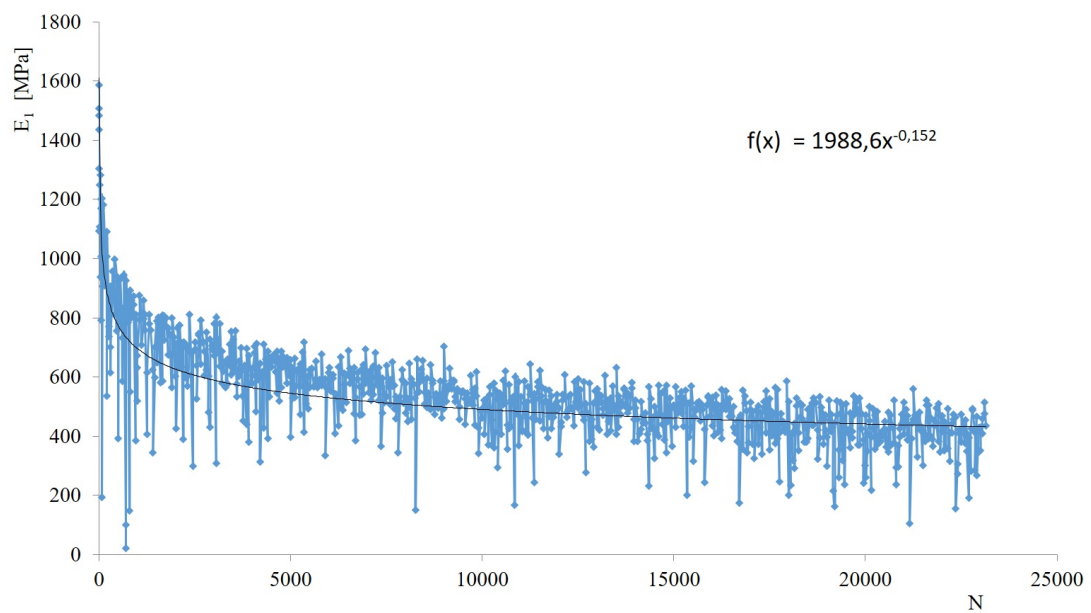
estudo.

Figura 31 – Resultado da amplitude do sinal com controle J



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32 – Resultado do módulo de armazenamento  $E_1$  com controle J

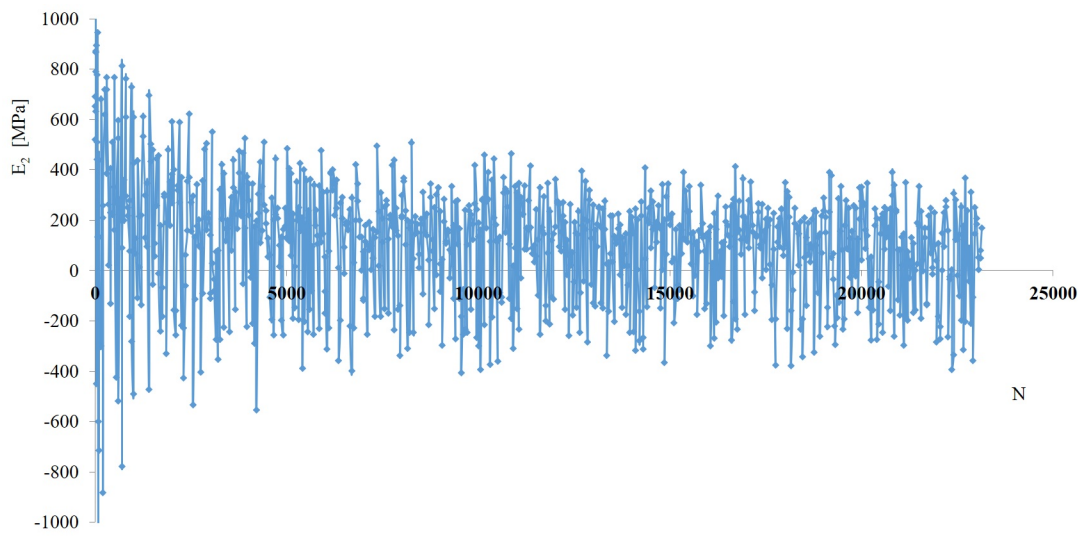


Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 38 pode-se observar que, a partir de um momento da solicitação o deslocamento máximo começa a aumentar, o que, por consequência, resulta em um aumento do deslocamento médio ao longo do tempo.

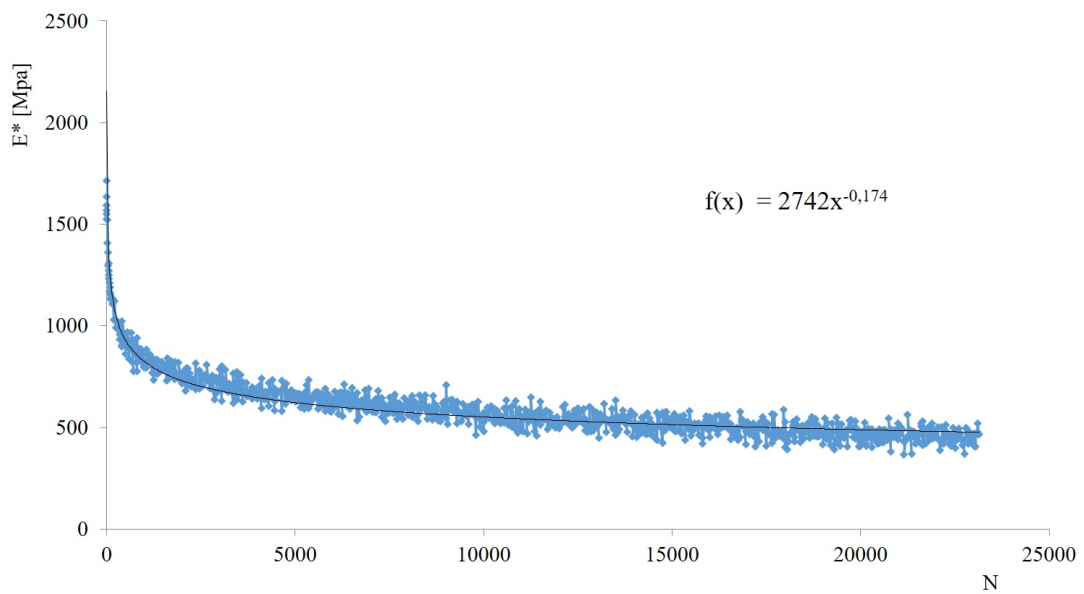


Figura 33 – Resultado do módulo de perda  $E_2$  com controle J



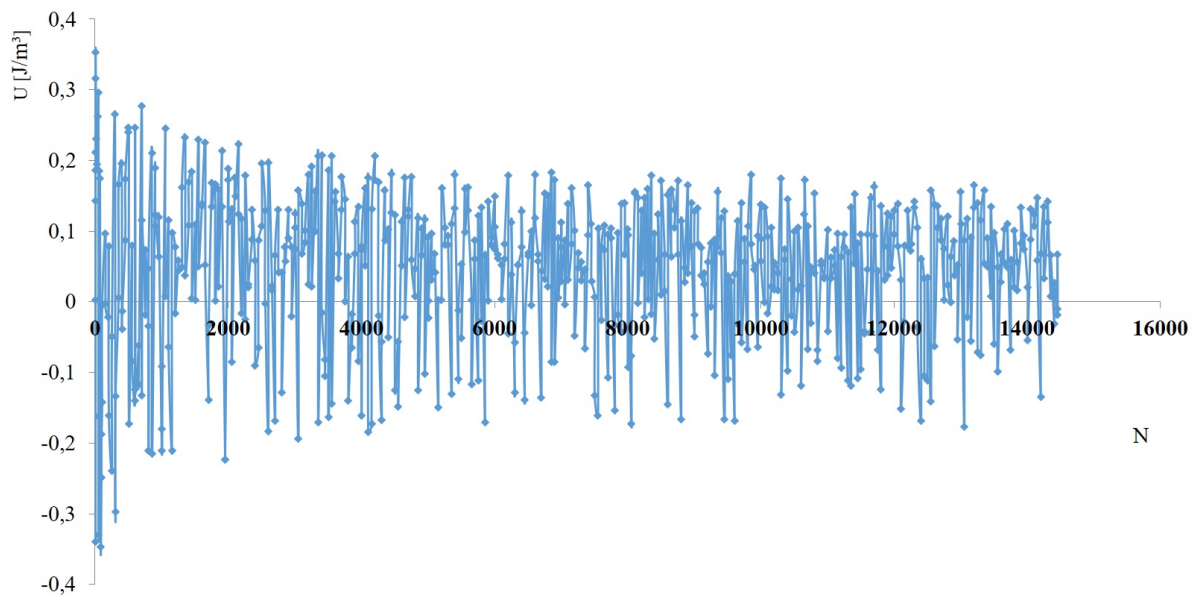
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 – Resultado do módulo complexo  $E^*$  com controle J



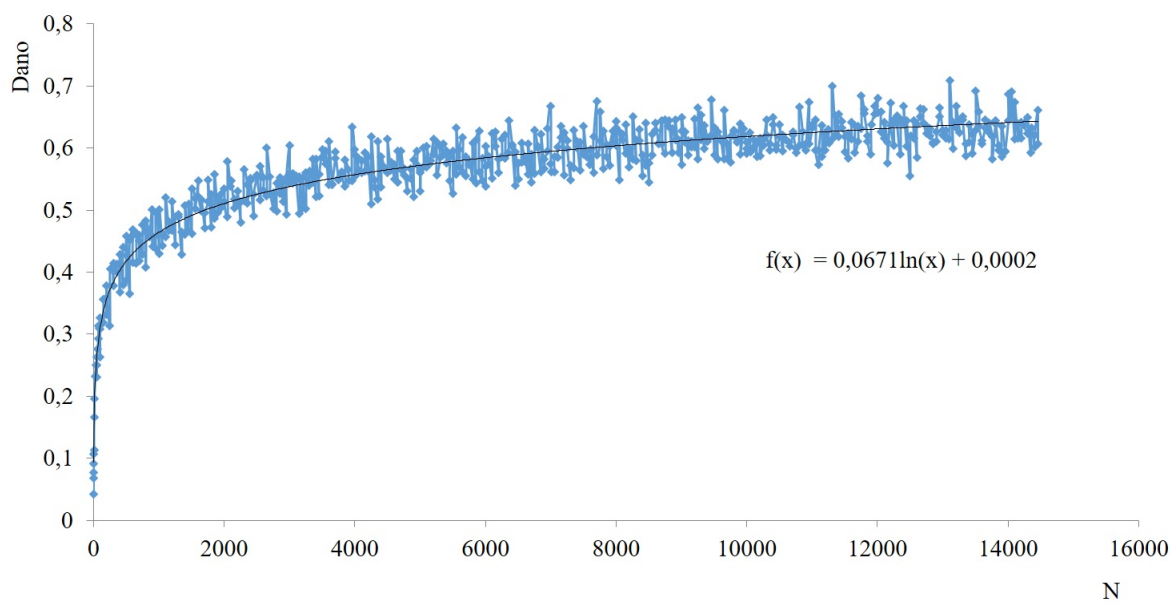
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 – Resultado da energia dissipada com controle J



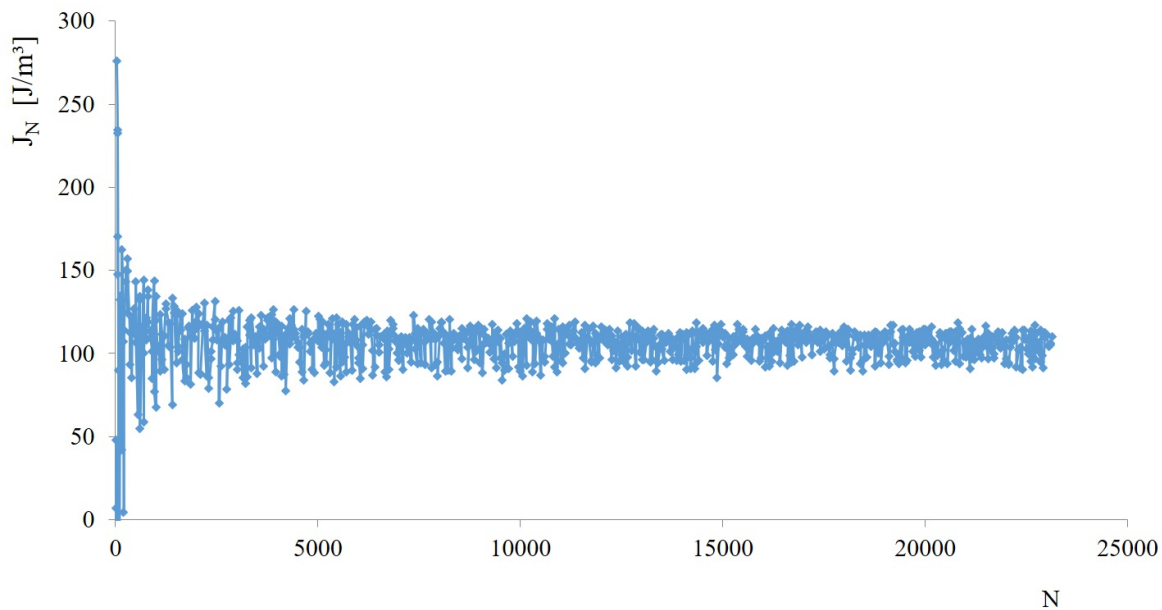
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 – Resultado do dano com controle J



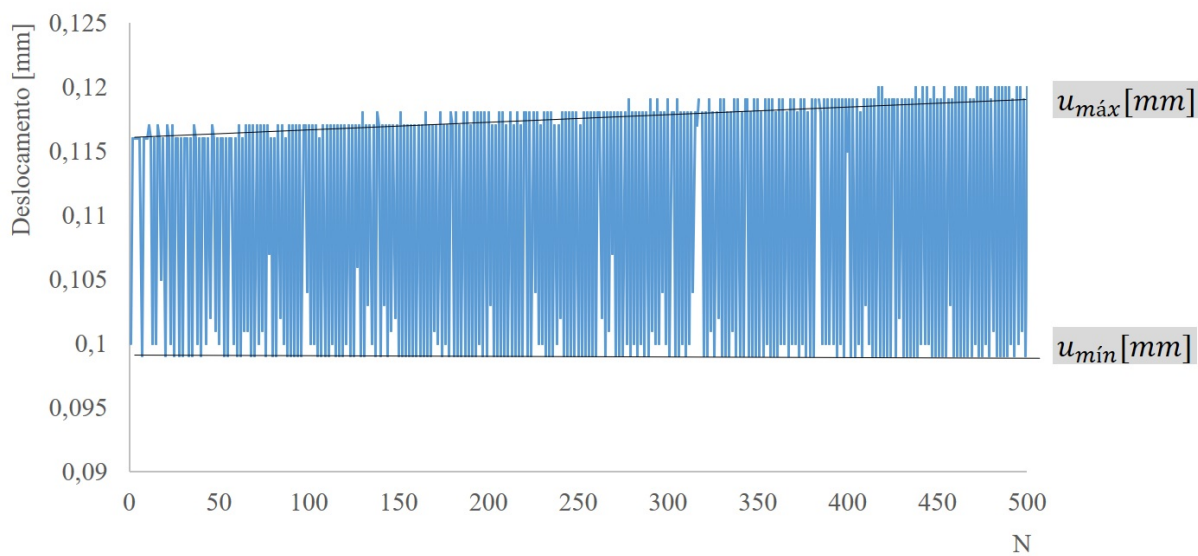
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 37 – Resultado de  $J_n$  com controle J



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38 – Resultado do  $u_{max}$  com controle J



Fonte: Elaborado pelo autor

## 5 ANÁLISE E EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a exploração dos resultados laboratoriais de duas análises distintas:

Na primeira análise, são explorados os resultados do ensaio cíclico utilizando a nova abordagem de controle J, comparando-os com os obtidos no ensaio com controle de deslocamento convencional. Ressalta-se a resposta do comportamento de  $E_2$ , onde se vê claramente que permanece constante logo após um número de ciclos, muito diferente à resposta com controle de deslocamento, ou à resposta vista nos ensaios DMA.

Na segunda análise, são explorados os resultados dos ensaios DMA, avaliando o comportamento do módulo complexo do material em diferentes frequências e temperaturas, bem como sua resistência às solicitações cíclicas. É conveniente apresentar a exploração dos resultados, uma vez que foi identificada outra contribuição significativa. Após as pesquisas preliminares realizadas no ensaio DMA, surgiu um estudo paralelo. A ideia principal foi compreender o comportamento do módulo complexo, o que levou a esta contribuição que consiste na implementação do fator dano no modelo fracionário de Huet-Sayegh.

### 5.1 EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO COM CONTROLE J

#### 5.1.1 Introdução

A seguir é discutida a compilação dos resultados que permite verificar se a técnica é capaz de controlar a energia dissipada em relação ao dano sofrido pelo material ciclo a ciclo.

Através da análise do módulo complexo, é possível verificar se a técnica de controle J está efetivamente controlando a energia dissipada em relação ao dano sofrido pelo material. Conforme mostrado na Figura 34 percebe-se que o material sempre apresenta uma perda de rigidez, indicada pela diminuição do módulo complexo.

Além disso, é possível observar, como ilustrado na Figura 36, que à medida que o material perde rigidez, há um avanço do dano, o que se reflete no aumento do dano ao longo do tempo. Essas informações sugerem que a técnica de controle J está influenciando diretamente na dissipação de energia e no comportamento de dano do material, mostrando-se promissora na análise e avaliação do desempenho do material

em estudo.

A análise dos resultados obtidos a partir do novo tipo de controle J é fundamental para caracterizar o comportamento de um material quando submetido a solicitações cíclicas e entender a efetividade da técnica de controle J. Através da compilação dos resultados que será apresentada a seguir, é possível verificar se a técnica está controlando adequadamente a energia dissipada em relação ao dano e como ela se comporta em comparação com outras técnicas de controle, como o controle de deslocamento.

Na Figura 21, está exposto qual foi a Metodologia para o cálculo do ângulo de fase no controle J. Na Figura 21 pode-se apreciar o cálculo completo para encontrar o ângulo de fase. No início da rotina pode ser visualizado a maneira como são extraídos os dados da máquina MTS Acumen, tanto o sinal proveniente da célula de carga como também o sinal de deslocamento do equipamento. Os dados são convertidos a um vetor que possa ser lido (*ValueArray*). Logo com o auxílio da DFT é calculada tanto para a entrada como para a saída o ângulo de fase. A partir do valor do ângulo de fase é possível realizar todos os cálculos do ensaio. Ressalta-se que esses cálculos foram realizados para esta pesquisa a cada 50 ciclos.

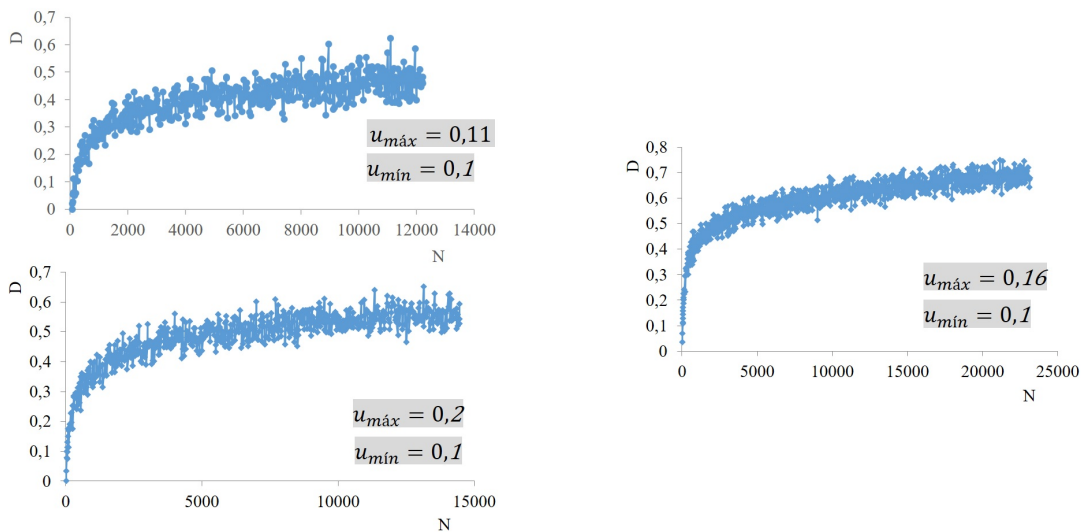
A abordagem desta pesquisa foi manter a energia dissipada constante e consequentemente a componente viscosa. Se a energia dissipada se mantém constante para que exista dano, o ângulo de fase deverá aumentar, se o ângulo de fase aumenta o módulo de armazenamento  $E_1$  deverá diminuir.

No ensaio com controle J, para manter a energia dissipada constante, a solicitação de entrada do ensaio deverá diminuir ou aumentar dependendo do estado atual do material. Isto é, deve-se modificar uma variável para satisfazer a condição de tentar manter constante a energia dissipada ao longo do ensaio, neste caso essa variável foi  $u_{max}$ . Como resultado foi encontrado que o dano do material definido como a perda de rigidez inicial em relação à perda de rigidez atual, sempre aumentará como mostrado na Figura 39, desde que esteja solicitado ciclicamente, isto devido ao fato que sempre haverá perda da rigidez do material como mostrado na Figura 40. Por outra parte, a energia dissipada, análoga ao módulo  $E_2$  terá uma resposta com o mesmo formato que  $J_n$  mostrado na Figura 41.

Ressalta-se que esta resposta é totalmente diferente da resposta que se encontra com um ensaio realizado com controle de deslocamento e inclusive à resposta

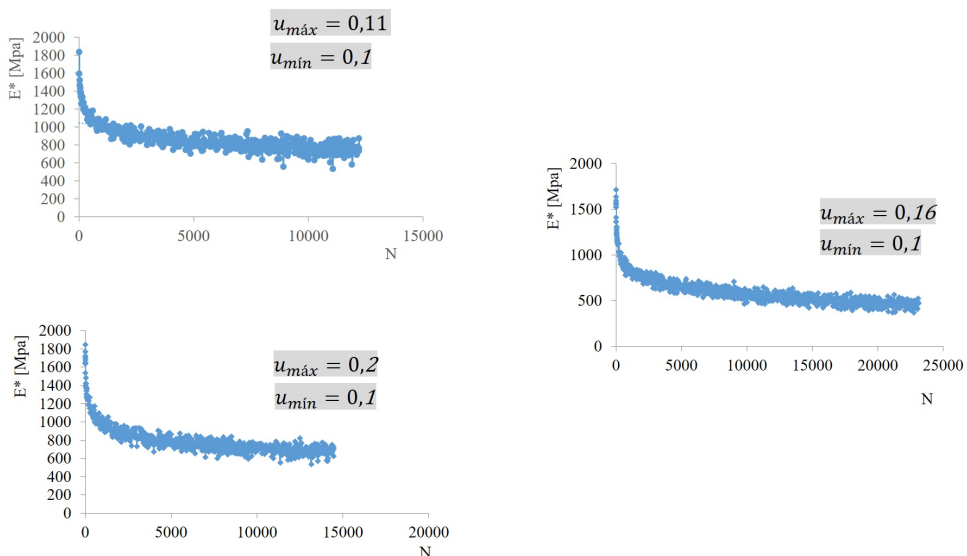
apresentada nos ensaio DMA, onde o comportamento deste parâmetro aumenta em certa região e logo diminui de maneira acentuada. Neste ensaio com controle J, o parâmetro  $E_2$  apresentou um comportamento constante após um determinado número de ciclos. Por último é ressaltado que satisfatoriamente foi conseguido o objetivo de manter constante a energia dissipada em relação ao dano como mostra-se na Figura 42, onde se aprecia que independe da solicitação inicial.

Figura 39 – Compilação dos resultados do dano com controle J



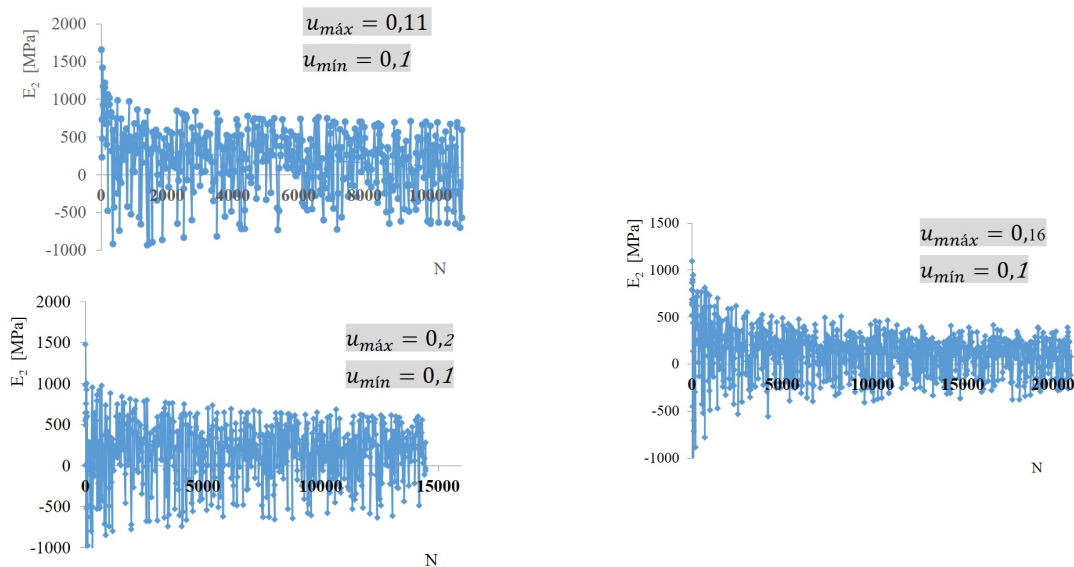
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40 – Compilação dos resultados do módulo complexo com controle J



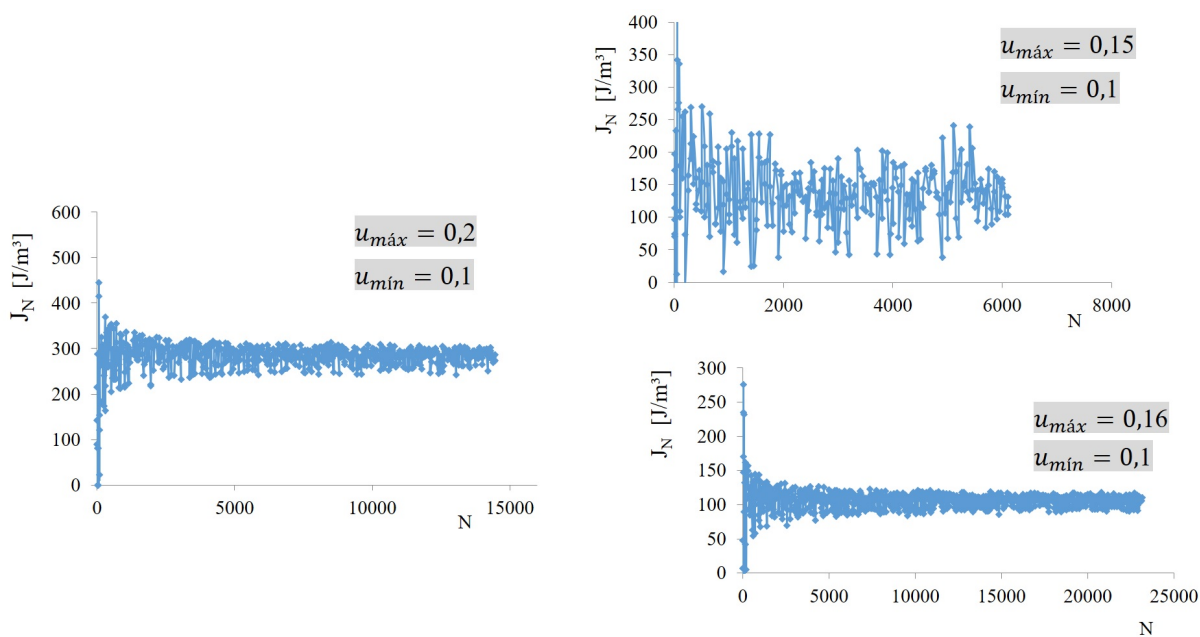
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41 – Compilação dos resultados do módulo  $E_2$  com controle J



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42 – Compilação dos resultados  $J_N$  com controle J



Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.2 EXPLORAÇÃO DOS RESULTADOS DMA

### 5.2.1 Interpretação do modelo de Huet-Sayegh

Conforme observa-se na Figura 18, ao aplicar uma solicitação ao modelo, ocorre o seguinte:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2, \quad (30)$$

onde:

$$\sigma_2 = \sigma_{2,1} = \sigma_{2,2} = \sigma_{2,3}, \quad (31)$$

e,

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2, \quad (32)$$

onde:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{2,1} + \varepsilon_{2,2} + \varepsilon_{2,3}, \quad (33)$$

substituindo  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  em (30), tem-se:

$$E\varepsilon = E_0\varepsilon_1 + \sigma_2, \quad (34)$$

sabendo que  $\varepsilon_1 = \varepsilon$ , obtém-se:

$$E\varepsilon = E_0\varepsilon + \sigma_2, \quad (35)$$

se a equação anterior é dividida por  $\varepsilon$ , obtém-se:

$$E = E_0 + \sigma_2/\varepsilon, \quad (36)$$

como  $\varepsilon = \varepsilon_2$ , a equação (36) passa a ser:

$$E = E_0 + \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}, \quad (37)$$

ou,

$$E = E_0 + E_{2Serie}, \quad (38)$$

de (33):

$$\frac{\sigma_2}{E_{2Serie}} = \frac{\sigma_{2,1}}{SP_1} + \frac{\sigma_{2,2}}{SP_2} + \frac{\sigma_{2,3}}{E_\infty - E_0}, \quad (39)$$

de (31), e substituindo em (39), têm-se:



$$\frac{\sigma_2}{E_{2Serie}} = \frac{\sigma_2}{SP_1} + \frac{\sigma_2}{SP_2} + \frac{\sigma_2}{E_\infty - E_0},$$

$$\frac{1}{E_{2Serie}} = \frac{1}{SP_1} + \frac{1}{SP_2} + \frac{1}{E_\infty - E_0}, \quad (40)$$

$$\frac{1}{E_{2Serie}} = \frac{1}{\frac{1}{SP_1} + \frac{1}{SP_2} + \frac{1}{E_\infty - E_0}},$$

substituindo (40) em (38) tem-se o módulo complexo, conforme:

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{1}{\frac{1}{SP_1} + \frac{1}{SP_2} + \frac{1}{E_\infty - E_0}} \quad (41)$$

Conforme (PRONK, 2006), (GUEDES, 1997), (41), (HEYMANS; BAUWENS, 1994) a equação (41) pode ser escrita com os *spring-pot*  $SP_1$  e  $SP_2$  conforme a equação (42).

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{1}{\frac{1}{(i\omega\tau_1)^k} + \frac{1}{(i\omega\tau_2)^h} + \frac{1}{E_\infty - E_0}}, \quad (42)$$

(GUEDES, 1997), supõe  $(\tau_1/\tau_2)$  independente da temperatura e escreve  $(\tau_1/\tau_2)^{-K} = \delta$

Finalmente a equação (43) corresponde à equação que representa o modelo de Huet-Sayegh.

$$E^*(\omega, \tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (43)$$

### 5.2.2 Aplicação do modelo reológico de Huet-Sayegh

A aplicação do modelo (HUET, 1963), com base nos resultados experimentais do ensaio DMA não é uma tarefa simples, devido ao fato que o modelo é constituído por vários parâmetros, sendo eles: dois módulos  $E_\infty$  e  $E_0$ , dois coeficientes parabólicos (ordem das derivadas fracionárias) ( $h$ ) e ( $k$ ), uma constante adimensional ( $\delta$ ), uma constante de temperatura  $\tau$ , que contém três componentes térmicas ( $A_0, A_1, A_2$ ) que foram obtidas a partir dos dados experimentais e estão em função do parâmetro  $\tau$ , correspondendo ao tempo de relaxação dos *spring-pot* (SP).

Para calibrar o modelo da equação (43) e conseguir representar os dados no plano Cole-Cole, para obter os valores de  $E_1$  e  $E_2$  e conseqüentemente entender o comportamento do módulo complexo é realizado de forma manual, buscando o melhor ajuste do modelo com os valores experimentais, usando as equações a seguir: para encontrar o valor de  $E_1$  usa-se a equação (44), para encontrar o valor de  $E_2$  usa-se a equação (45), para calcular  $D_1$  é usada a equação (46), para calcular  $D_2$  é usada a equação (47) e para encontrar o tempo de retardo característico associado à variação da temperatura é usada a equação (48) (QUINTERO, C. F. Q., 2011).

$$E_1 = E_0 + \frac{D_1}{D_1^2 + D_2^2} \quad (44)$$

$$E_2 = \frac{D_2}{D_1^2 + D_2^2} \quad (45)$$

$$D_1 = \frac{1 + \delta (i\omega\tau)^{-h} \cos\left(\frac{h\pi}{2}\right) + (i\omega\tau)^{-k} \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right)}{E_\infty - E_0} \quad (46)$$

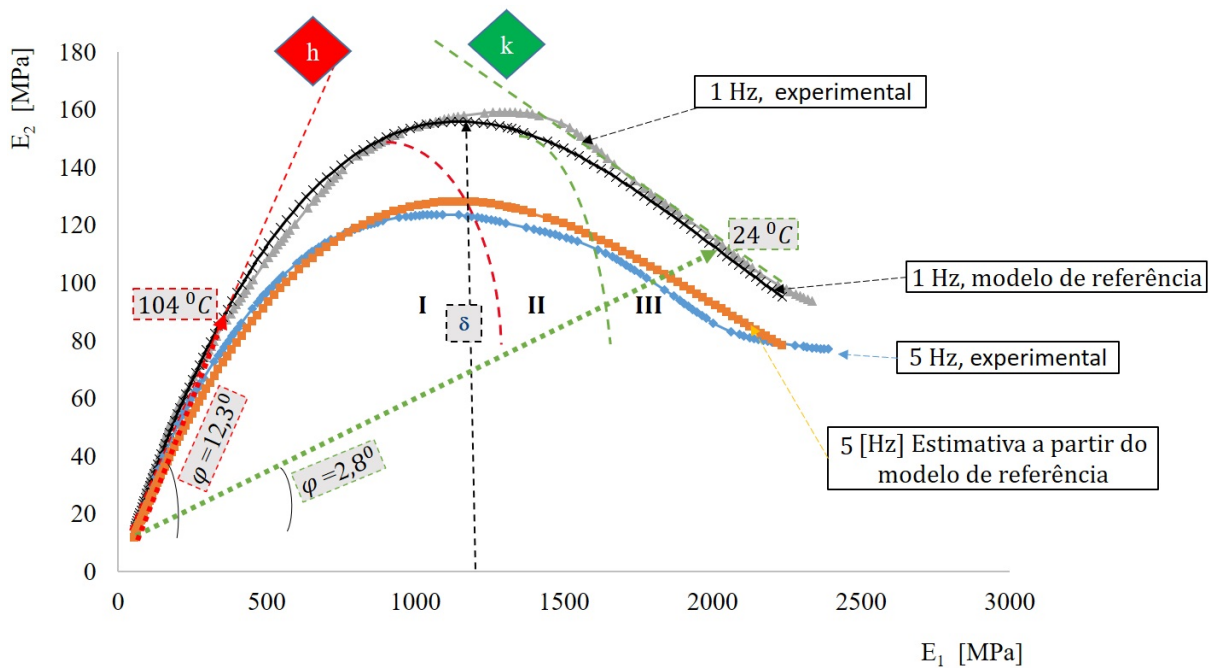
$$D_2 = \frac{\delta (i\omega\tau)^{-h} \sen\left(\frac{h\pi}{2}\right) + (i\omega\tau)^{-k} \sen\left(\frac{k\pi}{2}\right)}{E_\infty - E_0} \quad (47)$$

$$\tau(\theta) = e^{(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)} \quad (48)$$

A representação dos dados experimentais e o modelo de Huet-Sayegh do plano Cole-Cole pode ser observada na Figura 43.

Ressalta-se que os dados experimentais  $E_1$ ,  $E_2$  mostrados na Figura 26, que ajudam a mostrar no plano Cole-Cole representando a variação do  $E^*$  são usados para calibrar o modelo reológico fracionário de Huet-Sayegh. Os parâmetros do modelo estão colocados no Quadro (4).

Figura 43 – Representação dos dados experimentais e o modelo Huet-Sayegh no plano Cole-Cole do UHMWPE a 1 Hz e 5 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

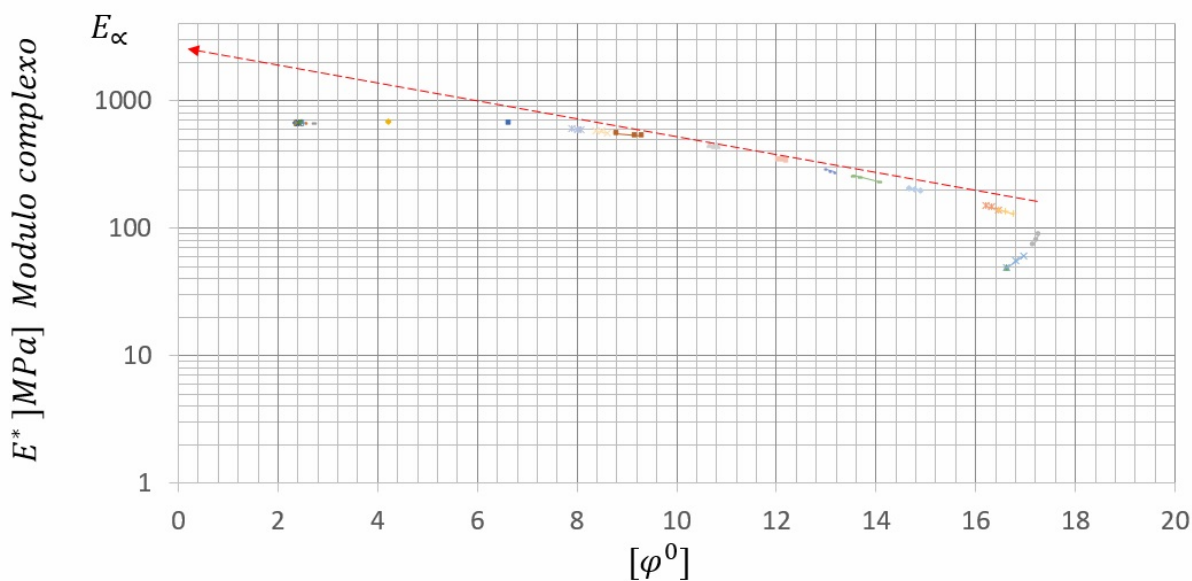
Quadro 4 – Parâmetros do modelo Huet-Sayegh

| Parâmetros                    |
|-------------------------------|
| $E_0 = 10 \text{ MPa}$        |
| $E_\infty = 3800 \text{ MPa}$ |
| $h = 0,05$                    |
| $k = 0,2$                     |
| $\delta = 1,085$              |
| $A_0 = 15,1$                  |
| $A_1 = -0,29$                 |
| $A_2 = 0,00013$               |

Fonte: Elaborado pelo autor

Para encontrar o valor do parâmetro  $E_\infty$  pode-se representar a variação do ângulo de fase e o módulo complexo com a temperatura, conforme mostra-se na Figura 44.

Figura 44 – Resultados das curvas isotermas do ensaio DMA



Fonte: Elaborado pelo autor

Após estudar o comportamento do módulo complexo, analisando as componentes do módulo de armazenamento e o módulo de perda, surgiu a ideia de implementar o fator dano no modelo de Huet-Sayegh. Essa implementação foi motivada pela evidência experimental do comportamento do *UHMWPE* em múltiplos ensaios, que corrobora a formulação explicada a seguir.

### 5.2.3 Implementação do fator dano (D) no modelo de Huet-Sayegh

(KURTZ *et al.*, 1999) realizam uma revisão dos avanços tecnológicos no processamento, fabricação, esterilização e reticulação de *UHMWPE* para substituições totais de articulações. Os autores mencionam a importância de estudar o comportamento do *UHMWPE*, eles indicam que no mundo, aproximadamente um milhão de componentes de *UHMWPE* são implantados anualmente. Somente nos Estados Unidos, cerca de meio milhão de substituições totais de articulações foram realizadas em 1995, representando bilhões de dólares.

Um ponto que chama a atenção e que foi mencionado pelos autores é que o desgaste é um grande obstáculo que limita a longevidade dos componentes de *UHMWPE* implantados. Portanto, entende-se a importância de um estudo mais aprofundado do *UHMWPE* quando está sob solicitações cíclicas, devido ao fato que estas solicitações podem estar ocasionando o desgaste levando eventualmente a danos indesejáveis ou prejudiciais.

Assim, uma pequena contribuição é expor resultados de metodologias diferentes ou interpretações diferentes das já existentes a fim de entender o comportamento do *UHMWPE*. Nesta pesquisa um dos focos foi realizar ensaios experimentais com as metodologias já existentes como por exemplo o ensaio DMA e estudar o comportamento do módulo complexo. Pois bem, a maneira de contribuição que deve ser verificada em trabalhos futuros, é exposto que no modelo viscoelástico fracionário de Huet Sayegh, é possível introduzir o parâmetro dano (D), conforme observa-se na equação (59), consiste em introduzir o parâmetro dano como (1 - D) sendo esta diferença o dano residual até atingir o critério de falha.

Esta implementação é possível pela observação experimental, pois ao realizar um ensaio com um material com menor rigidez as curvas do módulo complexo não sobrepõem. Observou-se também que o parâmetro dano ajusta-se melhor quando implementado ao parâmetro  $E_2$ , este fenômeno foi verificado sobrepondo os resultados experimentais conforme mostra a Figura 45, onde mostra-se a primeira curva superior como a referência, mostra-se também o modelo de Huet-Sayegh sobrepondo-se aos ensaios experimentais. Ao implementar o dano no modelo de Huet-Sayegh todos os parâmetros envolvidos como  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E^*$ ,  $\delta$ ,  $\omega$ ,  $\tau$ , assim como os *spring-pot* (h) e (k) tem uma mudança significativa se comparados com o primeiro estado do material, neste caso com a frequência inicial executada no ensaio.

Observou-se experimentalmente que na equação (49) de Huet-Sayegh, pode-se implementar o parâmetro dano como  $D = (1 - D)$ . Quando um material é submetido a esforços cíclicos, pode ocorrer uma perda progressiva e irreversível de sua rigidez. Para avaliar a integridade do material ao longo do tempo, pode-se adotar a convenção de que o dano (D) final é igual a 1 ( $D = 1$ ), o que caracteriza a falha do material. Dessa forma, a expressão (1 - D) pode ser utilizada para avaliar a porcentagem da integridade do material que ainda resta antes da falha. Por exemplo, se o valor de D for igual a 0,5, isso significa que o material já perdeu metade de sua rigidez e a expressão (1-D) indicaria que apenas 50% de sua integridade ainda permanece antes da falha.

$$E^*(\omega, \tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (49)$$

O primeiro passo é separar as componentes real e imaginária. (GUEDES, 1997) na sua pesquisa realiza este procedimento chegando à equação (50) e posteriormente às equações (51) e (52).

$$E^*(\omega, \tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i)^{-k}(\omega\tau)^{-k} + (i)^{-h}(\omega\tau)^{-h}} \quad (50)$$

$$i^{-h} = \cos\left(\frac{h\pi}{2}\right) - i\text{sen}\left(\frac{h\pi}{2}\right) \quad (51)$$

$$i^{-k} = \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) - i\text{sen}\left(\frac{k\pi}{2}\right) \quad (52)$$

Logo (GUEDES, 1997) ordena as equações (51) e (52) conforme equações (53), (54):

$$A = \delta(i\omega\tau)^{-h} \cos\left(\frac{h\pi}{2}\right) + (i\omega\tau)^{-k} \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) \quad (53)$$

$$B = \delta(i\omega\tau)^{-h} \text{sen}\left(\frac{h\pi}{2}\right) + (i\omega\tau)^{-k} \text{sen}\left(\frac{k\pi}{2}\right) \quad (54)$$

Ao substituir (53) e (54) em (49) tem-se:

$$E^*(\omega, \tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + A - iB} \quad (55)$$

Conforme (GUEDES, 1997), multiplicando a equação (55) pelo seu conjugado conforme (56).

$$\left( \frac{(1 + A) + (iB)}{(1 + A) + (iB)} \right) \quad (56)$$

E logo resolvendo conforme (GUEDES, 1997), tem-se a parcela  $E_1$  conforme equação (57) e  $E_2$  na equação (58).

$$E_1(\omega, \tau) = E_0 + \frac{(E_\infty - E_0)(1 + A)}{(1 + A)^2 + B^2} \quad (57)$$

$$E_2(\omega) = \frac{(E_\infty - E_0)B}{(1 + A)^2 + B^2} \quad (58)$$

Nos ensaios experimentais realizados no DMA, conforme a secção (3.4), e realizados conforme (4.3) foi observado que ao aplicar o dano à componente  $E_2$  esta apresenta uma estimativa do comportamento muito aproximado ao ensaio experimental, das respostas dos ensaios a diferentes frequências; isto é, após estudar os resultados DMA, foi verificado que o módulo  $E_2$  diminuí após aumentar a frequência, mas o

módulo de armazenamento  $E_1$  aumentava um pouco em relação à primeira frequência. Foram realizados mais ensaios para ter certeza deste fenômeno.

A programação dos novos ensaios é a mesma dos utilizados na seção 3.4, os ensaios foram realizados a frequências de 1, 5, 10, 20, 25 Hz, o objetivo do ensaio era verificar o comportamento do dano.

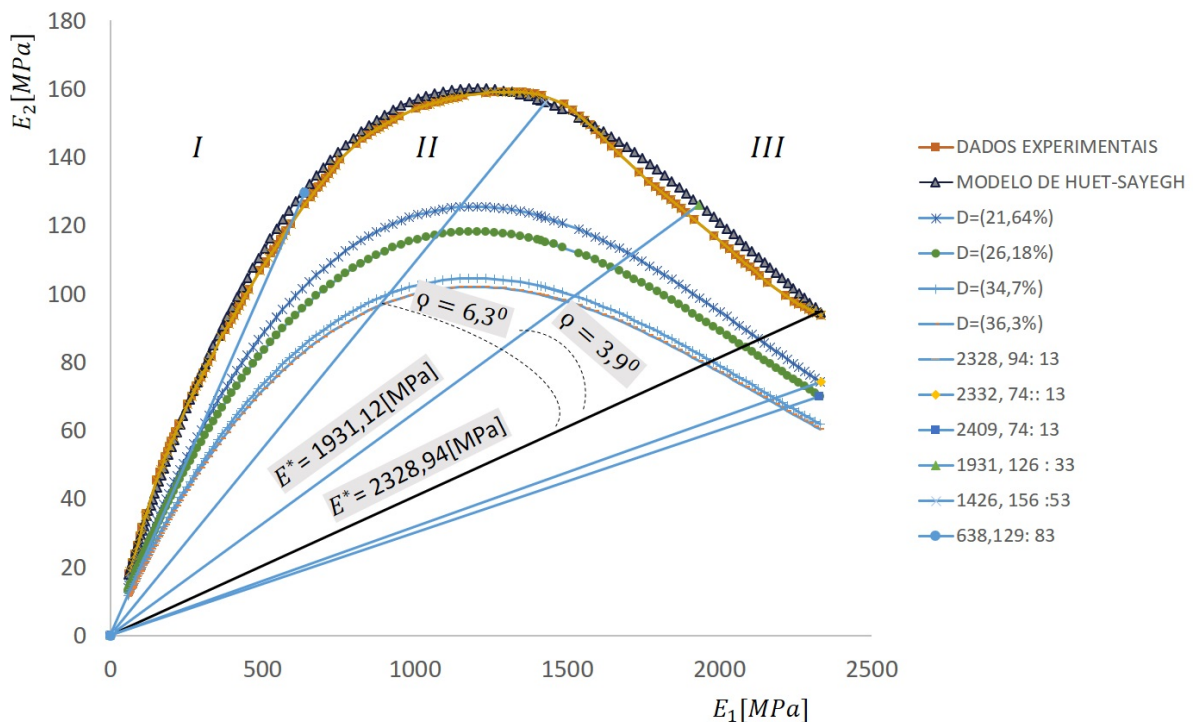
Assim, e a maneira de contribuição, é aberta mais uma linha de raciocínio, onde foi verificado que no modelo de (HUET, 1963) na parcela  $E_2$  pode ser implementado o parâmetro dano, a equação que formulou (GUEDES, 1997) foi conforme mostrada em (58) , que serve para estimar o parâmetro de  $E_2$ .

Agora, a equação (59) é uma proposta desta pesquisa que incorpora o dano como  $(1 - D)$ , conforme observado experimentalmente neste trabalho.

$$E_2(\omega, \tau, D) = \frac{(E_\infty - E_0)B}{(1 + A)^2 + B^2} - \left( \frac{(E_\infty - E_0)B}{(1 + A)^2 + B^2} \right) (1 - D) \quad (59)$$

Sendo D o parâmetro que representa o dano, caracterizado pela parte relativa do módulo entre um estado inicial no  $ciclo_1$  e um estado  $N$  para qualquer ciclo.

Figura 45 – Representação do modelo Huet-Sayegh com dano



Fonte: Elaborado pelo autor

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou uma nova abordagem experimental para caracterizar o comportamento cíclico de materiais viscoelásticos, utilizando o controle J definido como  $J = dU/dD$ .

A pesquisa desenvolveu e implementou com sucesso uma nova abordagem para o ensaio de fadiga, utilizando um controle com *feedback* simulando uma malha fechada para monitorar simultaneamente os sinais de deslocamento e força. Uma das principais contribuições deste estudo foi a demonstração de que é possível manter constante o parâmetro J durante o ensaio de fadiga, corrigindo a solicitação de entrada sem interrompê-lo, mantendo assim constante a variação da energia dissipada em relação ao dano sofrido pelo material. Essa abordagem combina os controles de deslocamento e carga, oferecendo maior flexibilidade no controle do ensaio.

Essa nova abordagem experimental tem potenciais aplicações na caracterização e compreensão do comportamento cíclico de materiais viscoelásticos em aplicações de engenharia, especialmente em ensaios de fadiga de componentes sujeitos a solicitações cíclicas em condições reais de serviço. Além disso, a metodologia proposta pode abrir caminho para o desenvolvimento de novas estratégias de projeto e seleção de materiais para melhorar a vida útil e o desempenho de componentes em serviço sob solicitações cíclicas.

No entanto, a metodologia desenvolvida também apresentou algumas limitações, como o tempo demandado para a confecção manual dos corpos de prova e a necessidade de desenvolver uma rotina de cálculo em uma linguagem de programação específica (Python 2.7 net) para implementação no equipamento MTS Acumen.

Os resultados demonstraram que o módulo de perda, após acomodação da resposta do material, apresenta um comportamento constante, diferindo dos resultados de ensaios de fadiga com controle de deslocamento ou ensaios DMA.

O trabalho foi dividido em várias etapas, abordando a seleção do equipamento para os ensaios com controle J, realização de ensaios DMA, confecção dos corpos de prova e ensaios com controle de deslocamento, desenvolvimento da rotina de ensaio com controle J e configuração do controle J.

Pesquisas futuras podem se concentrar na otimização e automação da metodologia proposta, bem como explorar suas aplicações práticas em diferentes materiais e condições de ensaio. Recomenda-se avaliar as propriedades em outras temperaturas,



estudar o efeito de concentração de tensão na fadiga e analisar os resultados em modelos propostos de controle de deslocamento e carga. Além disso, sugere-se investigar modelos fracionários para compreender o comportamento do material considerando o parâmetro dano.

O modelo de Huet-Sayegh foi escolhido por sua capacidade de representar de forma adequada o comportamento viscoelástico dos materiais e por permitir uma compreensão clara das equações constitutivas dos elementos simples, como molas e amortecedores. Ele mostrou-se adequado para estudos experimentais em que é necessário analisar o comportamento viscoelástico em condições variadas. No entanto, a escolha de um modelo específico pode depender das características do material e das condições experimentais, e outros modelos podem ser explorados em trabalhos futuros.

As etapas do trabalho foram concluídas com êxito, sendo cada uma delas uma contribuição significativa para o desenvolvimento da abordagem experimental e para a compreensão do comportamento viscoelástico do material sob solicitações cíclicas. A pesquisa estabelece uma base para futuros estudos e aplicações práticas na área de caracterização de materiais e ensaios de fadiga, visando identificar como o material se comporta ciclo a ciclo.

Como sugestão para trabalhos futuros propõem-se:

Realizar ensaios e análises com diferentes materiais viscoelásticos para validar a abordagem experimental proposta.

Investigar como variações de temperatura afetam o comportamento viscoelástico do material durante os ensaios de fadiga com controle J.

Avaliar como a concentração de tensão afeta a resposta do material sob carregamento cíclico com o controle J.

Discutir os resultados comparando os modelos  $\sigma$ -N,  $\varepsilon$ -N com um modelo J-N.

Estudar como outros parâmetros, como por exemplo a frequência de solicitação, influencia no comportamento viscoelástico do material durante os ensaios de fadiga.

## REFERÊNCIAS

- AKANO, THEDEUS T.; FAKINLEDE, OMOTAYO A. Fatigue Failure Model for Polymeric Compliant Systems. **Polymer Science**, v. 2013, p. 11, 2013.
- ANSI-ASTM-D-4762-11A. **Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials**. [S./], 2019.
- ANSI-ASTM-D-638-03. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. [S./], 2012.
- ASTM-D-4065-01. **Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: Determination and Report of Procedures**. [S./], set. 2019.
- ASTM-D-4092-01. **Standard Terminology for Plastics: Dynamic Mechanical Properties**. [S./], 2019.
- ASTM-E-1820-08A. **Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness**. [S./], 2009.
- ASTM-E-606/E606M-12. **Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing**. [S./], 2012.
- ASTM-E1823-96. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**. [S./], 2002.
- BELLENGER, V.; TCHARKHTCHI, A.; CASTAING., Ph. Thermal and mechanical fatigue of a PA66/glass fibers composite material. **Fatigue**, v. 28, n. 1, p. 1348–1352, 2006.
- BUREAU, M. N.; DICKSON, J. I. Fatigue propagation behaviour of polystyrene/polyethylene blends. **Materials science**, v. 33, p. 1405–1419, out. 1998.
- C.SOBIERAJ, MICHAEL; E.MURPHY, JAMES; G.BRINKMAN, JENNIFER; M.KURTZ, STEVE; M.RIMNAC, CLARE. Monotonic and fatigue behavior of five clinically relevant conventional and highly crosslinked UHMWPEs in the presence of stress concentrations. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 28, n. 1, p. 244–253, dez. 2013.
- CALLISTER, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. Edição: 5th Edition. [S./]: John Wiley Sons, New York, 2000.

- CARVALHO, A. **Avaliação do comportamento cíclico do polietileno de ultra-alto peso molecular**. 2016. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina.
- CHENG, A.; ZHONG, Chen Nian; YONGCHANG, P. An energy principles based model for fatigue crack growth prediction. **Fatigue**, v. 128, nov. 2019.
- CHRISTENSEN, R.M. Chapter I - Viscoelastic Stress Strain Constitutive Relations. *In*: CHRISTENSEN, R.M. (Ed.). **Theory of Viscoelasticity**. Second Edition. [S.l.]: Academic Press, 1982. p. 1–34. ISBN 978-0-12-174252-2.
- COLLINS, Jack.A. **Failure of materials in mechanical design, Analysis, prediction, prevention**. Edição: Jhon Wiley & son. second edition. [S.l.]: Jhon Wiley & son, 1993.
- COSTA, R. **Aplicabilidade de modelos constitutivos para analisar o comportamento mecânico de um biopolímero**. Jul. 2007. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- CRAWFORD, R. J.; BENHAM. Some fatigue characteristics of thermoplastics. **POLYMER**, v. 16, n. 12, p. 908–914, dez. 1975.
- DAO, KIM C.; DICKEN, DENNIS J. Fatigue Failure Mechanisms in Polymers. **Polymer Engineering and Science**, v. 27, n. 4, p. 271–276, fev. 1987.
- DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. Edição: Pearson Education Limited. Fourth Edition. [S.l.]: Pearson, 2013.
- E1640, ASTM. **Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature By Dynamic Mechanical Analysis**. [S.l.], ago. 2018.
- E1820-23, ASTM. **Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness**. [S.l.], 2023.
- ELLYIN, F.; KUJAWSKI, D. Plastic strain energy in fatigue failure. **Pressure Vessel Technology**, 1984.
- EVARISTO, Riande. **Polymer Viscoelasticity: Stress and strain in practice**. Edição: Catalina Salom. [S.l.]: New York : Marcel Dekker, cop. 2000., 2000. (Plastics Engineering (New York, N.Y)).

FATEMI, A.; YANG, L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. **International Journal of Fatigue**, v. 20, n. 1, p. 9–34, 1998.

FENG, Jiemin; GUO, Zhansheng. Temperature-Frequency-Dependent Mechanical Properties Model of Epoxy Resin and Its Composites. **Composites Part B**, v. 1, n. 1, p. 1–26, mar. 2015.

Introduction. *In*: FINDLEY, William N.; LAI, James S.; ONARAN, Kasif (Ed.). **Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials**. [S.l.]: North-Holland, 1976. v. 18. (North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics). p. 1–7.

State of Stress and Strain. *In*: FINDLEY, William N.; LAI, James S.; ONARAN, Kasif (Ed.). **Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials**. [S.l.]: North-Holland, 1976. v. 18. (North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics). p. 22–39.

FLUGGE, W. **Viscoelasticity**. [S.l.]: Springer Verlag Berlin, 1975.

GOEL, A.K.K; CHAWLA, U.K.; N.VAIDYAA; CHAWLA; M.KOOPMAN. Characterization of fatigue behavior of long fiber reinforced thermoplastic (LFT) composites. **Materials Characterization**, v. 60, p. 537–544, 2009.

GOLOS, K.; ELLYIN, F. A Total Strain Energy Density Theory for Cumulative Fatigue Damage. v. 110, p. 36, fev. 1988.

GUEDES, Rui Jorge Miranda. **Previsão da vida útil de materiais compósitos de matriz polimérica**. 1997. Tesis – Universidade do Porto.

HERTZBERG, R.W.; J.A.MANSON. Micromechanisms of fatigue-crack advance in PVC. **Journal of Materials Science**, v. 8, n. 2, p. 1554–1558, nov. 1973.

HEYMANS, N.; BAUWENS, J.C. Fractal rheological models and fractional differential equations for viscoelastic behavior. **Rheologica Acta**, v. 33, n. 1, p. 210–219, jan. 1994.

HUET, C. **Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés**. 1963. Tese – Faculte des Sciences de L'Université de Paris.

HUGHES, J.M.; LUGO, M.; BOUVARD, J.L.; MCINTYRE, T.; HORSTEMEYER, M.F. Cyclic behavior and modeling of small fatigue cracks of a polycarbonate polymer. **Fatigue**, v. 99, n. 1, p. 78–86, dez. 2017.

JEONG, Y; YOON, B. Development of patent roadmap based on technology roadmap by analyzing patterns of patent development. **Technovation**, v. 39-40, p. 37–52, 2015.

JRAD, H.; RENAUD, F.; DION, JL; TAWFIQ I.AND HADDAR, M. Experimental characterization, modeling and parametric identification of the hysteretic friction behavior of viscoelastic joints. **International Journal of Applied Mechanics**, v. 02, n. 05, 1979.

KOELLER, R.C. Applications of Fractional Calculus to the Theory of Viscoelasticity. **Journal of Applied Mechanics**, v. 51, n. 1, p. 299–307, jun. 1984.

KULTURAL, S.E.; ERYUREK, I.B. Fatigue behavior of calcium carbonate filled polypropylene under high frequency loading. **Materials and Design**, v. 28, p. 816–823, fev. 2007.

KURTZ, Steven M. 2 - From Ethylene Gas to UHMWPE Component: The Process of Producing Orthopedic Implants. In: KURTZ, Steven M. (Ed.). **UHMWPE Biomaterials Handbook (Third Edition)**. Third Edition. Oxford: William Andrew Publishing, 2016. p. 7–20. ISBN 978-0-323-35401-1.

KURTZ, Steven M.; MURATOGLU, Orhun K.; EVANS, Mark; EDIDIN, Avram A. Advances in the processing, sterilization, and crosslinking of ultra-high molecular weight polyethylene for total joint arthroplasty. **Biomaterials**, v. 20, n. 18, p. 1659–1688, 1999.

KURTZ, Steven M.; PRUITT, Lisa; JEWETT, Charles W.; PAUL CRAWFORD, R.; CRANE, Deborah J.; EDIDIN, Avram A. The yielding, plastic flow, and fracture behavior of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements. **Biomaterials**, v. 19, n. 21, p. 1989–2003, 1998.

LAMBERT, S.; E., PAGNACCO; KHALIJ, L. A probabilistic model for the fatigue reliability of structures under random loadings with phase shift effects. **Fatigue**, v. 32, p. 463–474, 2010.

LEE, Y. **Fatigue Testing and Analysis. Theory and Practice**. Edição: Elsevier Butterworth Heinemann. [S.l.]: Oxford, 2005.

LIN, L.; ARGON, A.S. Review Structure and plastic deformation of polyethylene. **Journal of materials science**, v. 29, p. 294–323, 1994.

LORANDI, Natalia; CIOFFI, Maria Odila; ORNAGHI, Heitor. Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos. **Scientia cum Industria**, v. 4, p. 48, abr. 2016.

MACKAY, M.E; TENG, T. G.; SCHULTZ, J.M. Craze roles in the fatigue of polycarbonate. **Journal of Materials Science**, v. 14, n. 221-227, 1979.

MALLICK, P.K.; ZHOU. Effect of Mean Stress on the Stress-Controlled Fatigue of a Short e-Glass Fiber Reinforced Polyamide-6,6. **Journal of Fatigue**, n. 26, p. 941–946, 2004.

MEDEL, Francisco J.; PEÑA, P.; CEGOÑINO, José; BARRENA, E. Gómez; PUÉRTOLAS, J. A. Comparative Fatigue Behavior and Toughness of Remelted and Annealed Highly Crosslinked Polyethylenes. **Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, v. 1, n. 1, p. 380–390, jan. 2007.

MELO, M. E. Reyes; VEGA, J. J. Martinez; SALAZAR, C. A. Guerrero; MÉNDEZ., U. Ortiz. Mechanical and Dielectric Relaxation Phenomena of Poly(ethylene-2,6-naphthalene dicarboxylate) by Fractional Calculus Approach. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 102, n. 1, p. 3354–3368, mai. 2006.

MINER, M. A. Cumulative damage in fatigue. **Applied Mechanics**, v. 3, p. 159–164, 1945. Transactions of ASME 12.

MITSUO, N.; WANG, LEI; ENJITSU, TAKUMI; FUKUNAGA, KEI-ICHI. Fatigue characteristics of ultra high molecular weight polyethylene with different molecular weight for implant material. **Materials science, materials in medicine**, v. 1, n. 12, p. 267–272, 2001.

NAVARRO, R. F. Modelos Viscoelásticos Aplicáveis a Materiais Reais: uma Revisão. **REMAP**, v. 12, n. 1, p. 1–20, Agosto 2017.

NETZSCH. Leading Thermal Analysis. *In*: MEYER, Markus (Ed.). **Dynamic Mechanical Analysis (DMA)**. [S.l.: s.n.], fev. 2009. p. 1–169.

OLIVEIRA, Maicon G. de. **Roadmapping**. Edição: Campus. [S.l.]: Elsevier, 2012.

PEREIRA, Hélder Filipe Sousa Gomes. **Comportamento à fadiga de componentes estruturais sob a ação de solicitações de amplitude variável**. 2006. Diss. (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial.

PRAMANIK, Brahmananda; MANTENA, P. Raju. Viscoelastic Response of Graphite Platelet and CTBN Reinforced Vinyl Ester Nanocomposites. **Materials Sciences and Applications**, v. 2, n. 1, p. 1667–1674, out. 2011.

PRONK, Adriaan C. The Huet-Sayegh model; a simple and excellent rheological model for master curves of asphalt mixes. **Asphalt concrete**, 2006.

QUINTERO, Carlos Fernando Quintero. **Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada – formulação e comportamento mecânico**. 2011. Tese – Universidade Federal de Santa Catarina.

QUINTERO; MOMM, Leto; LEITE, Leni F.M.; BERNUCCI, Liedi L.B. Effect of asphalt binder hardness and temperature on fatigue life and complex modulus of hot mixes. **Construction and Building Materials**, v. 114, n. 1, p. 755–762, 2016.

R.J, Crawford; BENHAM. Cyclic stress and thermal softening failure of a thermoplastic. **Materials science**, v. 9, p. 18–28, 1974.

RICE, J. R. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. **Journal of Applied Mechanics**, v. 35, n. 2, p. 379–386, jun. 1968.

RITTEL, D. An investigation of the heat generated during cyclic loading of two glassy polymers. Part I: Experimental. **Mechanics of Materials**, v. 32, p. 131–147. 2000.

ROSA, Edison da. **Apostila: Análise de Resistência Mecânica de Peças e Componentes Estruturais**. Edição: Universidade Federal de Santa Catarina. [S.l.]: Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Florianópolis, 2002.

SAUER, W. L.; WEAVER; NEIL. Fatigue performance of ultra-high-molecular-weight polyethylene: effect of gamma radiation sterilization. **Biomaterials**, v. 17, n. 20, p. 1929–1935, 1996.

SCHIJVE, Jaap. **Fatigue of Structures and Materials**. Edição: Springer. [S.l.]: Second Edition, 2009.

SCHULTZ, J. M. Fatigue behavior of engineering polymers. **Materials Science e Technology**, v. 10, p. 599–636, 1977.

SIMIS, Kathleen S.; BISTOLFI, Alessandro; BELLARE, Anuj; PRUITT, Lisa A. The combined effects of crosslinking and high crystallinity on the microstructural and mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene. **Biomaterials**, v. 27, n. 9, p. 1688–1694, 2006.

SOBIERAJ, MC; RIMNAC, CM. Ultra high molecular weight polyethylene: mechanics, morphology, and clinical behavior. **Journal of the mechanical behavior of biomedical materials**, v. 2, n. 5, p. 433–443, out. 2009.

VILLARRAGA, M. L; EDIDIN, A. A.; HERR, M.; KURTZ, S. M. Multiaxial fatigue behavior of oxidized and unoxidized UHMWPE during cyclic small punch testing at body temperature. **ASTM Special Technical Publication**, v. 1, n. 1, p. 19, 2004.

WANG, Lei; NIINOMI, Mitsuo; ENJITSU, Takumi; FUKUNAGA, Kei Ichi. Effect of Molecular Weight on Fatigue Characteristics of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene for Implant Material. **Materials Science Research International**, v. 6, p. 35–40, mar. 2000.

WEIBULL, W. **Fatigue testing and the analysis of results**. Edição: PERGAMON PRESS LTD. [S.l.]: Oxford, 1961.

WERLANG, Moisés; SILVEIRA, Fernando; LEMOS, Cristóvão de; MORAES, Lílian Talita de. Caracterização de misturas de pp com polietileno de ultra-alto peso molecular. *In*: ANAIS do 10o Congresso Brasileiro de Polímeros – Foz do Iguaçu, PR – Outubro/2009. [S.l.: s.n.].

Z.Y.ZHANG; RICHARDSON, M. O. W. Visualization of barely visible impact damage in polymer matrix composites using optical deformation and strain measurement system. **Composites**, v. 36, p. 1073–1078. 2005.

ZENNER, Harald; HINKELMANN, Karsten. August Wöhler (1819 –1914). **Stahlbau**, v. 88, p. 594–601, jun. 2019.



## APÊNDICE A – PESQUISAS USANDO OU CONTROLE DE CARGA OU CONTROLE DE DESLOCAMENTO

Neste apêndice são mencionadas algumas pesquisas, nas quais percebe-se que a preocupação estava direcionada para as variáveis que afetam a vida de fadiga de um material, onde em todas elas usam os dois tipos de controle já mencionados.

Além do tipo de solicitação, é importante mencionar, em um ensaio cíclico, as variáveis que podem afetar as características mecânicas do material viscoelástico. Entre as variáveis externas, estão aquelas relacionadas às condições climáticas, como a frequência da solicitação, o tipo de solicitação, a tensão média, o acabamento superficial, a umidade, o plastificante, as cargas de reforço e a incorporação de elastômero. Essas variáveis externas podem influenciar significativamente o comportamento mecânico do material viscoelástico durante o ensaio.

Além das variáveis externas, também é importante considerar as variáveis intrínsecas ao material, as quais são características próprias do material e podem afetar seu desempenho mecânico. Exemplos dessas variáveis intrínsecas incluem a estrutura polimérica, que pode ser amorfa ou semicristalina, a cristalinidade, que determina o grau de ordem molecular no material, o peso molecular, que está relacionado ao tamanho das cadeias poliméricas, entre outras. Essas variáveis intrínsecas ao material podem influenciar sua resistência, rigidez, deformação e outras propriedades mecânicas.

- Falha térmica: Sauer *et al.* (1996), preocupam-se em evitar uma falha térmica nos ensaios de carregamento cíclico. Foi utilizado um dispositivo de ventilação para melhorar a troca de calor, estes pesquisadores trabalharam com controle de carga (SAUER; WEAVER; NEIL, 1996).
- Peso molecular: Wang *et al.* (2000), estudaram a influência de diversos níveis de peso molecular do *UHMWPE*, no que diz respeito ao comportamento de fadiga e propagação de trinca. Para isso os autores trabalharam com cinco diferentes pesos moleculares e diferentes densidades para demonstrar que aumentando o peso molecular aumenta a rigidez do material. Foi usado o controle de carga nos ensaios realizados. (WANG *et al.*, 2000).
- Envelhecimento artificial: Villarraga *et al.* (2004), estudam a influência das variáveis internas do *UHMWPE*, levando o material a um envelhecimento artificial por meio de uma câmara de oxigênio. Após confeccionadas as amos-

tras, estas são submetidas a carregamentos cíclicos controlando a carga alternada (VILLARRAGA *et al.*, 2004).

- **Cristalinidade:** Uma outra configuração de ensaio é realizada por Simis *et al.* (2006). Dessa vez, os autores preocupam-se em aumentar a vida na fadiga melhorando a cristalinidade do material, eles estudam e comparam várias configurações de alta cristalinidade, aumentando esta propriedade com o aquecimento das amostras a 180 °C a uma pressão de 300 MPa durante uma hora e outras amostras 240 °C em uma pressão de 500 MPa, foi usado o controle de carga para realizar os ensaios. (SIMIS *et al.*, 2006).
- **Frequência:** Em uma outra pesquisa realizadas por (R.J; BENHAM, 1974), distintos materiais e distintas configurações foram mudadas para analisar o comportamento a diferentes frequências dos materiais poliméricos. Os autores realizaram ensaios com controle de carga em: polipropileno (PP), policarbonato (PC), polimetacrilato de metila PMMA, poli tereftalato de tetrametileno PTMT. Foram usados dois equipamentos; um para ensaio uniaxial e outro para ensaio flexão rotativa. Em um equipamento trabalharam com frequências de 2,5 a 25 Hz, e no outro equipamento foi fixada uma frequência de 50 Hz. No ensaio do PMMA, usou-se uma carga controlada de 7,5 MPa, usando uma frequência de 5 Hz, observando uma falha só após  $10^7$  ciclos, em 23 dias. O ensaio foi mudado para uma frequência de 0,5 Hz, com uma tensão de 12,5 MPa, onde observou-se que em 16 dias ainda não tinha acontecido a falha. O material foi trocado para o PP, onde com as mesmas condições foi produzida uma falha térmica. No PC, foi usada uma frequência de 0,01 a 1 Hz, onde não foram observadas falhas térmicas (CRAWFORD; BENHAM, 1975).
- **Frequência:** Usando o polipropileno PP, a quatro níveis de frequência de 1, 3, 10 e 30 Hz, os autores observaram que os polímeros quando solicitados com carregamentos cíclicos de alta frequência apresentam aquecimento precoce levando o material ao amolecimento e degradação mais rápida (DAO; DICKEN, 1987).
- **Frequência:** Os autores deste estudo realizaram ensaios de propagação de trincas em poliestireno PS e polietileno de alta densidade PEAD, os corpos de prova foram submetidos a frequências 2 e 20 Hz (BUREAU; DICKSON,

1998).

- Frequência: A pesquisa foi realizada com polipropileno de baixa densidade PPBD a uma frequência de 10 Hz em um ensaio controlado de deslocamento, foi desenvolvida uma predição da vida na fadiga levando em consideração o dano contínuo (AKANO; FAKINLEDE, 2013).
- Trincas no corpo de prova (CP): Outros pesquisadores realizam estudos em cinco *UHMWPE*, totalizando 365 CPs com geometrias entalhadas, onde os ensaios foram realizados com uma solitação de tração-tração com uma forma senoidal com uma carga mínima de 30 N (razão de tensão  $R = 0,04$  a  $0,05$  para todos os ensaios) com uma frequência de 2 Hz, a temperatura de  $37^{\circ}\text{C}$ . As amostras apresentaram uma vida útil de aproximadamente 67000 ciclos com uma duração de quase 9 h por ensaio, e com critério de parada a fratura do (CP) (C.SOBIERAJ *et al.*, 2013).
- Temperatura: Vários experimentos são realizados com distintos *UHMWPE*, a fim de avaliar a resposta do material a distintos tratamentos térmicos e tentar associar às falhas. Os corpos de provas foram confeccionados conforme normas (ANSI-ASTM-D-638-03, 2012) tipo I e (ASTM-E-606/E606M-12, 2012), distintos corpos de prova. Após análise, os autores observaram que os distintos tratamentos térmicos podem ocasionar mudanças nas propriedades do material (MEDEL *et al.*, 2007).
- Dependendo das condições do ensaio, pode ocorrer um aumento de temperatura do material, ou uma fadiga térmica de curta duração, levando até a falha. O material vai acumulando energia gerada durante cada ciclo de carregamento, resultando em materiais superaquecidos. Como essa energia é dissipada em grande parte na forma de calor, um aumento de temperatura associado ocorrerá para cada ciclo de carga quando as condições isotérmicas não são cumpridas (R.J; BENHAM, 1974).

## APÊNDICE B – ANÁLISE DE PATENTES

Conforme (OLIVEIRA, 2012), o mapeamento tecnológico é um processo que requer ferramentas integradas para desenvolvimento do mapa tecnológico do assunto a estudar. Neste processo as dificuldades identificadas fazem relação à geração de ideias para as camadas de produto e tecnologia e à forma de estruturação, representação e relacionamento das informações no mapa. Neste trabalho a geração de ideias baseou-se na análise detalhada das patentes na área da fadiga.

### B.1 ANÁLISE DE PATENTES

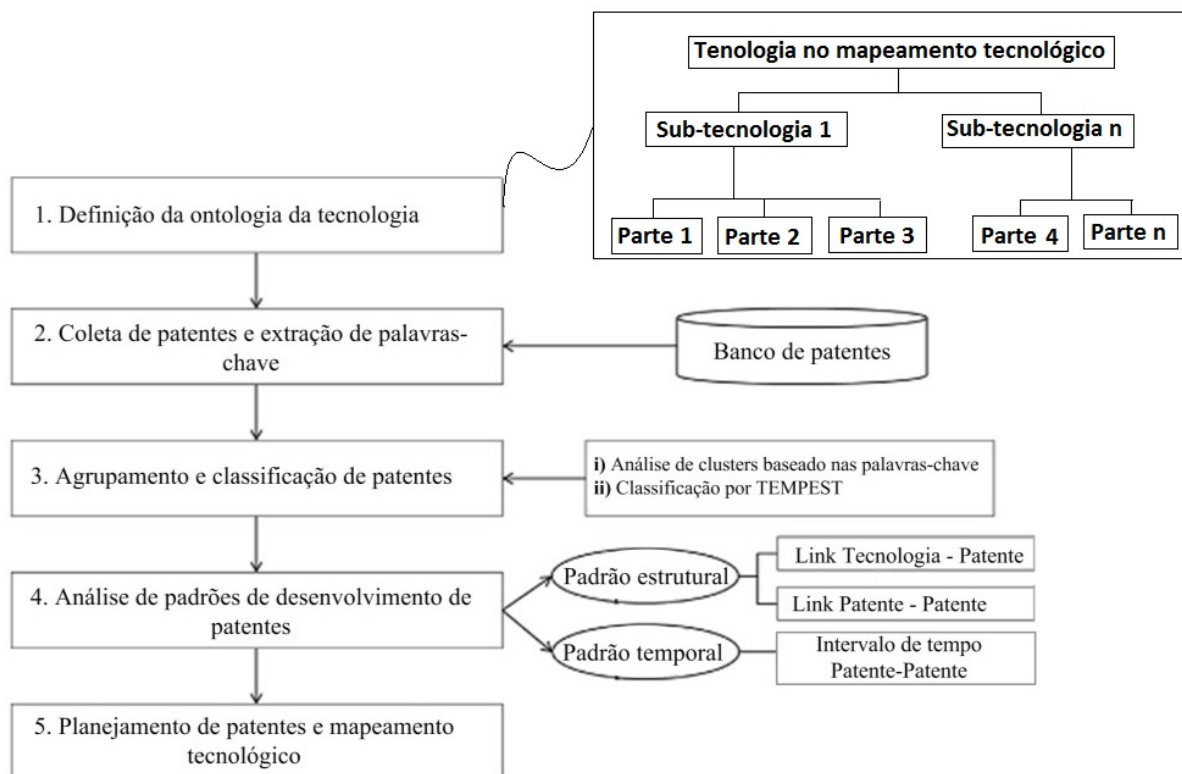
Conforme Ernst (1997) apud (JEONG; YOON, 2015), a Análise de patentes é considerada como um indicador em projetos de P-D, bem como um elemento vital para a análise da tecnologia, sendo que as patentes contêm segredos tecnológicos muito importantes, fornecendo informações relevantes sobre a estratégia dos concorrentes e ajuda a avaliar o potencial competitivo da tecnologia.

As patentes podem ser analisadas a partir de dois pontos de vista, análise quantitativa e qualitativa.

Uma análise **quantitativa** seria aplicada em análise de tendência, análise de compartilhamento de acordo ao tipo de patente, classificação tecnológica, responsáveis, entre outras. Na análise **qualitativa**, os conteúdos do documento de patente são utilizados para conduzir a análise de patentes e, além disso, para focar a transição de palavras-chave que compreendem a literatura de patentes.

(JEONG; YOON, 2015) propuseram um processo detalhado para o desenvolvimento do roteiro de patentes, conforme mostrado na Figura (B.1). O método consiste em cinco passos:

Figura B.1 – Processo de análise de patentes



Fonte: Adaptado de Jeong, Yoon 2015

**1:** a ontologia da tecnologia é gerada para reconhecer tanto o conceito quanto a estrutura da tecnologia, e isso obriga os pesquisadores a identificar quais componentes são necessários para gerar tecnologia promissora derivada de um roteiro de tecnologia já desenvolvido por organizações específicas e inserido como um dos camadas no roteiro de patentes.

**2:** as patentes são coletadas de um banco de dados de patentes com base na ontologia de tecnologia e, em seguida, as palavras-chave e um vetor de palavras-chave são extraídos das informações de patentes em sucessão.

**3:** patentes coletadas são agrupadas por agrupamento hierárquico com base na semelhança de cosseno, que utiliza um vetor de palavras-chave, e cada grupo de patentes está ligado às classificações "TEMPEST"<sup>1</sup>

**4:** os padrões de desenvolvimento de patentes são derivados pelo tipo de patentes categorizadas pelo TEMPEST. Existem dois tipos de padrões - o padrão estrutural

<sup>1</sup> TEMPEST, é uma sigla que significa:: **T** (Time: Método de fabricação, método de controle, processo); **E** (Energia: Princípio para trabalhar dispositivos ou tecnologia, dispositivos de acionamento de energia); **M** (Material: Coisas que incluem produto ou tecnologia como matéria-prima, ingrediente); **P** (Personalidade: Uso, função, propriedade, atributo); **S** (espaço: Estrutura do produto ou tecnologia, componente parcial, parte).

e o padrão temporal. O padrão estrutural visa explorar uma ordem de desenvolvimento, e o objetivo de examinar o padrão temporal é indagar sobre o tempo de aplicação.

**5:** Os resultados da análise de padrões de desenvolvimento em patentes são adaptados para planejar patentes prospectivas que ainda não foram aplicadas em comparação com tecnologias semelhantes.

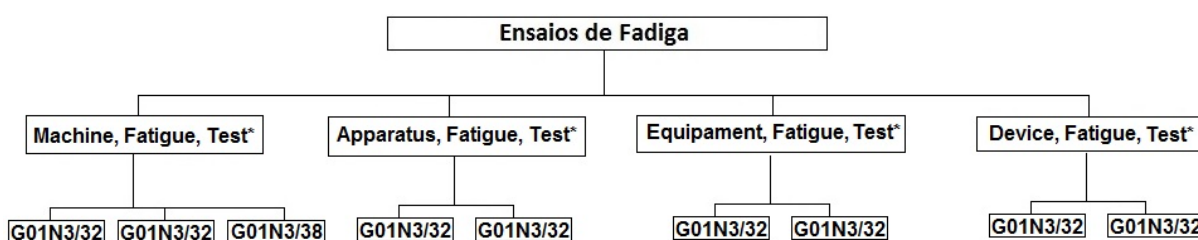
A técnica "SCAMPER"<sup>2</sup> é sugerida para gerar novas ideias de patentes e analisar as possíveis tecnologias necessárias para desenvolver o projeto, assim como também para preencher os espaços vazios obtidos no mapa tecnológico.

Conforme mostrado a revisão bibliográfica de patentes seguirá o procedimento sugerido por (JEONG; YOON, 2015), desta maneira, segue:

### B.1.1 Definição da ontologia da tecnologia

A ontologia é gerada hierarquicamente com subunidades de cada tecnologia, referindo-se tanto à literatura relevante quanto às informações de patentes, como mostra a Figura (B.2). Nesta seção é ilustrado o processo de mapeamento de patentes, foca-se nas patentes de tipos de máquinas de fadiga e nos tipos de ensaios de fadiga, conforme mencionados na seção 2.3.9 e 2.6, a fim de identificar patentes significativas relacionadas aos temas. Esta pesquisa analisou os tipos de ensaio de fadiga e os equipamentos atualmente usados.

Figura B.2 – Definição da ontologia



Fonte: Adaptado de Jeong, Yoon 2015

<sup>2</sup> SCAMPER é uma sigla que significa: **S** (substituto: substituir, trocar, usar); **C** (Combinar: materiais, recursos, processos, pessoas, produtos ou componentes); **A** (Adaptar: mudar, trocar, características, meu conceito, incorporar); **M** (Modificar, Minificar, Ampliar: distorcer ou exagerar um recurso, componente, processo, duplicar, adicionar); **P** (Colocar para outro uso: outro mercado, Quem poderia usá-lo, novas maneiras de uso); **E** (Eliminar: remover componente ou parte sem alterar sua função, identificar o essencial ou desnecessário); **R** (rearranje, inverta: ordem, efeito oposto, padrões, layouts, sequências).

### B.1.2 Coleta de patentes e geração de vetor de palavras-chave

Analisando o tema de fadiga capítulo 2, foram agrupadas com base na interpretação das características técnicas essenciais do objeto de busca uma série de palavras-chave, como mostradas no Quadro 1. Com base nestas palavras, foram pesquisadas patentes e agrupadas com base nos critérios TEMPEST.

Quadro 5 – Palavras-chave 1

| <b>Type of test</b>       | <b>Machine</b> | <b>Test</b> | <b>Measurement</b> | <b>Control</b>     |
|---------------------------|----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| <i>flexion rotative</i>   | .....          | Fatigue     | .....              | <i>Tension</i>     |
| <i>flexion alternated</i> | .....          | .....       | .....              | <i>Deformation</i> |
| <i>fatigue axial</i>      | .....          | .....       | .....              | Combination        |
| <i>fatigue on torsion</i> | .....          | .....       | .....              | .....              |

Fonte: Elaborado pelo autor.

As patentes coletadas incluem itens como: título de invenção, resumo, descrição detalhada, informações sobre reivindicações e citações. Esta seria uma primeira busca de patentes para dar início a uma ideia mais robusta, as patentes consideradas como objetivo deste projeto foram coletadas e revisadas. Esta primeira consulta ajuda para extrair mais palavras-chave, conforme mostra-se no Quadro 2, que não foram tidas em conta na primeira busca, tentando dar mais robustez na busca completa e detalhada das patentes de equipamentos de fadiga, assim como também a classificação internacional (CIP ou CPC).

As palavras-chave das patentes pesquisadas, e sua frequência de ocorrência são contadas como mostra-e na tabela 3. Cabe ressaltar que as patentes procuradas são a mistura das palavras-chave do Quadro 1.

Tabela 4 – Mapeamento de patente A

| <b>Patente</b>             | <b>Pais</b> | <b>Detalhes</b>   |
|----------------------------|-------------|---|
| US1156726A                 | US          | Esta invenção mostra um equipamento cuja função é testar a resistência barras metálicas, quando submetidas a esforços de flexão alternados na direção da sua aplicação. |
| Continua na próxima página |             |   |

Tabela 4 — Continuação da página anterior

| Patente                    | Pais | Detalhes  |
|----------------------------|------|---|
| US1635787A                 | US   | É um método para testar o fenômeno de fadiga de materiais de construção devido a vibrações.   |
| US1906340A                 | US   | Tem por objetivo proporcionar uma tensão a amostra a ser ensaiada e aplicando uma vibração fatigante à amostra sob essa tensão.                                     |
| US1819990A                 | US   | Refere-se a máquinas de teste para testar isoladores de choque de borracha.   |
| GB427989A                  | UK   | A máquina compreende um circuito elétrico auto-oscilante que serve para manter a amostra em vibração em um de seus modos naturais, possui um medidor de frequência. |
| GB445887A                  | UK   | Compreende um método de teste de fadiga em que uma amostra vibra em sintonia com uma frequência dada.   |
| US1952953                  | 1934 | O objetivo da invenção é testar cabos para determinar sua resistência à fadiga como resultado de tensões repetidas.   |
| US2300926                  | 1935 | A invenção mostra que o equipamento produz artificialmente, num tempo curto, tensões mecânicas às quais os materiais estão expostos sob condições operacionais.     |
| US2032989                  | 1936 | Refere-se ao teste de trilhos livre de defeitos.  |
| US2154277                  | 1939 | Neste equipamento as amostras são submetidas a tensões alternadas de tensão e compressão à medida que a amostra gira.   |
| Continua na próxima página |      |   |



**Tabela 4 — Continuação da página anterior**

| <b>Patente</b>             | <b>Pais</b> | <b>Detalhes</b>  |
|----------------------------|-------------|--|
| US2170640                  | 1939        | Ensaio de fadiga de objetos metálicos de pequeno diâmetro por meio de um arco rotativo sob carga constante.  |
| US2317097                  | 1940        | Mecanismo para testar materiais quanto à sua capacidade de resistir à fadiga, a tensões periódicas ou vibratórias.   |
| US2450939                  | 1940        | Equipamento que serve para testar a fadiga da vibração de materiais sujeitos a dobra-gem alternada.  |
| US2215958                  | 1940        | Máquina para testes de tensão ou compressão  |
| US2238116                  | 1941        | Aparelho para produzir vibrações sinusoi-dais tendo uma predeterminada amplitude constante.  |
| US2243413                  | 1941        | Máquina que fornece uma carga constante na amostra, uma vez que ela falha progres-sivamente. Ajusta o curso durante a ope-ração da máquina e automaticamente em resposta à carga na peça de teste. |
| US2282826                  | 1942        | Máquina de teste de fadiga hidráulica em que uma válvula é ajustável manualmente, controlando a pressão máxima.  |
| US2328908                  | 1943        | Máquina de fadiga por tensão pulsante para testar fios com pequenos diâmetros.   |
| US2496632                  | 1944        | Ensaio dinâmico e teste de vibração.   |
| US2356894                  | 1944        | Máquina de teste de fadiga do tipo resso-nante. Amostra testada sob várias formas de carga aplicada.   |
| US2361396                  | 1944        | Esta invenção refere-se a uma máquina para testar materiais a vibração.  |
| Continua na próxima página |             |  |

**Tabela 4 — Continuação da página anterior**

| <b>Patente</b>             | <b>Pais</b> | <b>Detalhes</b>  |
|----------------------------|-------------|--|
| 2,423,867                  | 1947        | Equipamento para ensaio de tensão, indica um método em função da redução do diâmetro da amostra de teste ou do alongamento da amostra de teste.                    |
| US2373351                  | 1945        | Testes de fadiga ressonante, controla e medir a amplitude da sua vibração.   |
| US2469346                  | 1949        | Máquina projetada para produzir vibrações forçadas.  |
| US2486567                  | 1949        | Máquina de força alternada de tipo de força de pistão ou vibração operada abaixo da ressonância.   |
| US2500764                  | 1950        | Refere-se a um máquina de fadiga de vibração controlada.   |
| US2788659                  | 1951        | Consiste em testar a fadiga os materiais impondo vibrações na até que a amostra a ruptura.   |
| US2548381                  | 1951        | Trata-se de uma máquina de teste nas quais um mecanismo de carregamento vibratório do tipo ressonante é empregado.   |
| US2591444                  | 1952        | Máquina de ensaio de fadiga do tipo de ressonância, tendo um peso excêntrico para produzir uma força centrífuga alterada.  |
| 2,738,671                  | 1953        | Aparelho de teste de vibração ressonante e, mais especificamente, a um dispositivo de teste de fadiga pneumática   |
| 2,648,978                  | 1953        | Testador de fadiga com controlador de posição média, controladores de posição melhorada para detectar, medir e controlar a posição média de um elemento vibratório |
| Continua na próxima página |             |  |

**Tabela 4 — Continuação da página anterior**

| <b>Patente</b>             | <b>Pais</b> | <b>Detalhes</b>   |
|----------------------------|-------------|---|
| US2676486                  | 1954        | Máquina para aplicar tensão de flexão a um material . Tensões repetidas são aplicadas por rotação na amostra em seu longo eixo.                 |
| US2685195                  | 1954        | Máquina para testar corpos de prova para resistência à tração sob condições de fadiga predeterminadas.  |
| US2693699                  | 1954        | Máquinas de testes dinâmicos de compressão-tensão alternadas aplicadas continuamente.   |
| US2750795                  | 1956        | Máquinas operadas hidraulicamente para produzir cargas mecânicas alternadas ou pulsantes.   |
| 2,788,659                  | 1957        | A patente compreende um circuito oscilatório eletromecânico que é adaptado para testar uma amostra com um elemento controlador de frequência. . |
| US2778222                  | 1957        | Ensaio de fadiga por ressonância de 12.000 a 15.000 ciclos por minuto.  |
| 2,779,190                  | 1957        | Refere-se a um aparelho para carga automática com controle de carga é especialmente adequada para uso com máquinas de ressonância               |
| US2986031                  | 1961        | Máquina de tensão ou compressão.  |
| US3209584                  | 1962        | Máquina com motor síncrono de histerese utiliza o fenômeno da histerese para produzir torque mecânico controlado.                               |
| US3095733                  | 1963        | Dispositivo para um controle automático de cargas.  |
| US3381526                  | 1965        | Aparelho de teste de fadiga de flexão alternada em vários corpos de prova.  |
| Continua na próxima página |             |   |

**Tabela 4 — Continuação da página anterior**

| <b>Patente</b>             | <b>Pais</b> | <b>Detalhes</b>  |
|----------------------------|-------------|--|
| US3170321                  | 1965        | Equipamento de teste de ensaios de flexão.   |
| US3304768                  | 1967        | Dispositivo capaz de calcular a vida durante el serviço de carga.  |
| US3563086                  | 1968        | Máquina de elementos piezoeléctricos, para ensaios de tração e compressão.   |
| US3583214                  | 1971        | Um amplificador é conectado eletricamente a um dispositivo para aplicar uma carga a um objeto e controla esse dispositivo de carga.      |
| US3589175                  | 1971        | A deformação longitudinal e a deflexão de uma amostra são monitoradas e registradas enquanto a carga é aplicada.                         |
| US3714821                  | 1973        | Sistema para aplicar ciclicamente uma carga variável a um material. Inclui um sensor de carga que detecta a magnitude da carga aplicada. |
| US3793880                  | 1974        | Máquina de teste de alongamento-fadiga de materiais elásticos sob uma carga constante  |
| US4802365                  | 1989        | Máquina de teste de fadiga multiaxial.   |
| US4869111                  | 1989        | Dispositivo de teste de fadiga cíclica por vibração.   |
| US5396804                  | 1995        | Aparelho para teste de fadiga controlado por força.  |
| US5440935                  | 1995        | Aparelho para combinar sinais de saída do transdutor. Aparelho para detectar pelo menos duas quantidades físicas.                        |
| Continua na próxima página |             |  |

**Tabela 4 — Continuação da página anterior**

| <b>Patente</b>             | <b>Pais</b> | <b>Detalhes</b>   |
|----------------------------|-------------|---|
| 5,511,431                  | 1996        | Preocupa-se como o controlador da máquina tem que ser reajustado toda vez que um tipo diferente de amostra é colocado na Máquina.     |
| US5952582                  | 1999        | Dispositivos para controle automático de acordo com um programa predeterminado.   |
| US6023980                  | 2000        | Carregamento dinâmico e estático. A carga aplicada à amostra é independente uma da outra e é controlável separadamente.               |
| US20020162400A1            | 2002        | Sistema multiaxial de teste de fadiga de alto ciclo para testes de flexão, torção e tensão, compreende componentes servo-hidráulico.  |
| US6732591                  | 2004        | Dispositivo para teste de fadiga que aplica um sinal elétrico para uma unidade de controle que determina a frequência de ressonância. |
| US6813960                  | 2004        | Serve para induzir fadiga de alto ciclo por vibração.   |
| US6938494                  | 2005        | Atuador capaz de aplicar uma carga com uma frequência de ressonância constante.   |
| US20080034885A1            | 2008        | Máquina de ensaio universal multiaxial. O corpo de prova pode ser submetido a ensaios de tração, compressão e fadiga.                 |
| US20090314099A1            | 2009        | Sistema de carregamento capaz de aplicar e reduzir cargas mecânicas num material.   |
| US10018544                 | 2018        | Máquina de teste de fadiga multiaxial eletromagnética.  |
| Continua na próxima página |             |   |

**Tabela 4 — Continuação da página anterior**

| <b>Patente</b> | <b>Pais</b> | <b>Detalhes</b>   |
|----------------|-------------|---|
| WO2018116092A1 | 2018        | Aparato para fadiga multiaxial, máquina que se compõe de um mecanismo rotacional. |

Fonte: Elaborado pelo autor

## B.2 MÁQUINAS DE ENSAIOS DE FADIGA

As máquinas de ensaios de fadiga usadas para diversas pesquisas e trabalhos de ensaios de laboratório, cada uma com suas características de projeto e desempenho, conforme o tamanho da amostra e o tipo de carregamento solicitado. Existem diversas máquinas que operam de forma mecânica, elétrica, pneumática ou eletromagnética. Existem detalhes para fabricar uma máquina, pois podem afetar os resultados, como por exemplo, caso a máquina não seja o suficientemente rígida, vibrações de ressonância podem ser geradas. As máquinas podem estar classificadas dependendo: O propósito do teste; Os tipos de tensões; Os meios de produzir a carga; A características operacionais; O tipo de carga;

### B.2.0.1 Componentes estruturais de uma máquina de fadiga:

- Um mecanismo que produz ou gera um carregamento alternado (ou deslocamento) sobre o qual, em alguns casos, adiciona-se uma carga constante;
- Membros de transmissão de carga, tais como garras, guias de fixação, juntas de flexão, etc., pelas quais o carregamento gerado é transmitido de modo que produza a distribuição da tensão desejada no espécime de prova;
- Dispositivos de medição que permitem o ajuste dos limites de carga nominal superior e inferior;
- Um dispositivo de controle para manter o carregamento ao longo do ensaio e às vezes automaticamente corrigir as alterações de força ou deformação durante o ensaio;
- Um aparato para contar o número de ciclos de carregamento aplicados no corpo de prova;

- Uma estrutura que suporte os diversos componentes da máquina e, se necessário, disposto de modo a reduzir a energia vibratória transmitida às fundações.

Quadro 6 – Palavras-chave 2

| <b>1 Type of test</b>  | <b>2 Machine</b>    | <b>3 Test*</b>    | <b>4 Measurement</b> | <b>5 Control</b>      |
|------------------------|---------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| 6 <i>fatigue axial</i> | 7 <i>Dynamic</i>    | 8 <i>Ciclic</i>   | 9 <i>Energy</i>      | 10 <i>Stress</i>      |
| 11 .....               | 12 <i>Ajust</i>     | 13 <i>Fatigue</i> | 14 <i>Module</i>     | 15 <i>Tension</i>     |
| 16 .....               | 17 <i>Apparatus</i> | 18 <i>Bending</i> | 19 <i>Frequence</i>  | 20 <i>Deformation</i> |
| 21 .....               | 22 <i>Device</i>    | 23 <i>Failure</i> | 24 <i>Parameter</i>  | 25 <i>Combination</i> |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após uma minuciosa revisão conforme palavras-chave do Quadro 6, e suas possíveis combinações, encontraram-se ao redor de 2M de patentes, por este motivo se fez necessário focar a pesquisa em um domínio menos amplo, assim, o assunto focou-se na medição.

Tabela 5 – Máquinas de fadiga.

| Máquina  | Características  | Modos de controle       |
|--|--|-------------------------|
| Sistemas servo-hidráulicos   | Um cilindro hidráulico é utilizado para aplicar cargas em testes de fadiga axial. Uma servo-válvula regula o fluxo do fluido hidráulico para o cilindro. A direção e a vazão do fluido hidráulico são regulados pela servo-válvula governada por um sinal de controle proveniente de uma malha realimentada.   | •Carga<br>•Deslocamento |
| Máquinas elétricas<br>Máquina elétrica de ensaios de Fadiga Electro-Plus [INSTRON, 2010]   | Funcionam exclusivamente com energia elétrica;<br>As frequências típicas que podem atingir são de 200 Hz e velocidades superiores a 2 m/s.   | •Carga<br>•Deslocamento |
| Máquina ultra-sônica, Excitação piezo-elétrica [Bathias, Claude, 2006]   | Utilizada para máquinas de teste de fadiga axial quando as amplitudes de carga são baixas e vidas de alto ciclo de fadiga são desejadas em testes de curta duração. A elevada frequência de operação desses tipos de máquinas (na ordem de 10-25 kHz) permite testes para vidas de fadiga longa (108 ciclos).  | •Carga<br>•Deslocamento |
| Máquinas ressonantes de testes de fadiga, Máquina de ensaios de fadiga ressonante VIB-BRO-FORTE. [Qualitest, 2012] [Bathias, Claude, 2006] | A carga dinâmica é gerada por um sistema oscilante (ressonador) que vibra na sua frequência natural. O sistema oscilante consiste de massas e molas, considerando que a estrutura e o corpo de prova a ser testado é também parte dela. As máquinas ressonantes para testes de fadiga operam em plena ressonância, isto é, o ponto de operação estará situado na parte superior da curva de ressonância. O ressonador é excitado por um sistema eletromagnético. Tirando a vantagem do efeito da ressonância, o consumo de energia é muito baixo (típicos 20 a 500 watts), com uma frequência em torno de até 250 Hz | •Carga<br>•Deslocamento |
| Máquinas pneumáticas de ensaios de fadiga, Máquina pneumática Air-Servo ADT-A. [Shimadzu, 2012] [Bathias, Claude, 2006]                    | Têm sido desenvolvidas como alternativas de menor capacidade para ambientes de pesquisa. A Shimadzu desenvolveu um sistema de ensaio “Air-Servo” que permite gerar carregamentos de até 10 kN e deslocamentos do pistão de 25 mm e um nível de ruído máximo de 63 db; a frequência máxima que pode atingir é de 20 Hz  | •Carga<br>•Deslocamento |

Fonte: Elaborado pelo autor



## APÊNDICE C – FENÔMENO DA FADIGA NOS POLÍMEROS: ESTUDO DE CASO O *UHMWPE*

### C.1 INTRODUÇÃO

Neste apêndice será dada uma importância ao entendimento das temperaturas de transições no comportamento viscoelástico. O *UHMWPE* é um material polimérico semicristalino, muito utilizado em aplicações industriais, especificamente na indústria ortopédica devido à sua biocompatibilidade, (MEDEL *et al.*, 2007), às características mecânicas, propriedades devido à sua tenacidade, durabilidade e inércia biológicas tornando este material um objeto de estudo por diversos pesquisadores na busca do entendimento e melhor caracterização do material para sua respectiva aplicação (KURTZ, 2016).

Do ponto de vista macroscópico; o processo de falha por fadiga nos polímeros assemelha-se ao dos metais; as falhas nos polímeros iniciam com micro trincas originadas na superfície ou em alguns pontos de concentração de tensão que logo se transformam em trincas macroscópicas causando a falha final. Dependendo do tipo de polímero, a trinca pode se originar de diferentes maneiras. Por exemplo, em polímeros semicristalinos, é provável que a trinca inicie nas esferulitas. Uma vez que o crescimento da trinca entra no estágio microestrutural, a trinca continua até a ruptura final do material. A falha térmica não necessariamente leva a uma quebra na falha, enquanto a falha mecânica é resultado da separação física (ROSA, 2002).

Entende-se que o fenômeno de fadiga é de particular interesse para muitos pesquisadores (SCHIJVE, 2009), (SCHULTZ, J. M., 1977). No trabalho de Kurtz *et al.* (2016) mencionam o uso do *UHMWPE* desde 1950, dados e informações encontradas referentes ao comportamento mecânico do *UHMWPE* sob solicitações cíclicas, são poucos se comparados com o volume de dados mencionando materiais metálicos além dos modelos e fórmulas utilizadas, todas estas focadas ao comportamento mecânico dos materiais metálicos.

O *UHMWPE* possui longas cadeias moleculares com inúmeros emaranhados, o que o torna um elastômero de alta viscosidade semelhante à borracha ao fundir; assim, é difícil processar, (MITSUO *et al.*, 2001). As propriedades mecânicas do *UHMWPE* dependem tanto de sua fase cristalina como também de sua parte amorfa. Qualquer alteração da fase (ou seja, alteração da cristalinidade geral, morfologia cristalina ou re-

ticulação da fase amorfa) pode afetar o comportamento mecânico do material (KURTZ, 2016).

Os polímeros se caracterizam por apresentarem comportamento viscoelástico, em que suas propriedades mecânicas são dependentes tanto da frequência quanto da temperatura. Um material viscoelástico exibe propriedades características dos sólidos e fluidos. Em geral, a maioria dos polímeros exibe um comportamento viscoelástico na temperatura de trabalho quando uma solicitação é colocada ao longo do tempo.

O comportamento viscoelástico prevê que o material solicitado apresentará uma região elástica e uma região que vai depender do tempo, essa última sendo característica dos materiais viscosos. A resposta do comportamento pode ser linear quando o mesmo é submetido a baixos níveis de tensão, ou não linear, quando o nível de tensão for elevado. Para pequenas deformações, a relação entre tensão e deformação em qualquer instante é linear (FLUGGE, 1975). Quando os materiais poliméricos são submetidos a uma frequência elevada há uma quantidade considerável de aquecimento, este fenômeno pode-se observar em (PRAMANIK; MANTENA, 2011), (CRAWFORD; BENHAM, 1975).

Quando um material polimérico é solicitado a carregamentos cíclicos de alta frequência, apresenta um aquecimento precoce, levando o material ao amolecimento e degradação, fazendo com que o material suporte menos carga em uso, (DAO; DICKEN, 1987), (BELLENGER; TCHARKHTCHI; CASTAING., 2006), (KULTURAL; ERYUREK, 2007). Testes em baixas frequências apresentam baixo aquecimento, ajudando o material a suportar cargas mais elevadas. Por exemplo, autores como (CRAWFORD; BENHAM, 1975) mostraram que durante o ensaio os corpos de PMMA e PTMT tiveram falha por fadiga térmica, assim como também observado na pesquisa de (RITTEL, 2000). Altos valores de frequência levam ao material a ter uma vida de fadiga menor (GOEL *et al.*, 2009).

Um outro fator a considerar além da temperatura, é consequência de mudar a tensão média ( $\sigma_m$ ) nos ensaios de fadiga conforme (MALLICK; ZHOU, 2004), pesquisaram o efeito da tensão média ( $\sigma_m$ ) sobre a resistência a fadiga do composto poliamida 66 reforçado com fibra de vidro. Os ensaios foram conduzidos sob deformação controlada com solicitação de tração flutuante. Foi observado que a tensão média teve um efeito significativo no diagrama tensão vida. A resistência à fadiga diminuiu com o aumento da razão de tensão média. Também foi observado que a deformação média

durante a fadiga aumentou.

Também pode-se mencionar que os polímeros estão classificados conforme sua origem em: naturais ou sintéticos e em um ponto intermediário pode-se encontrar os elastômeros. Os naturais são encontrados na natureza, tais como, madeira, lã, algodão etc. Os sintéticos são produzidos em laboratórios dando origem aos termoplásticos e termofixos (CALLISTER, 2000). O *UHMWPE* é um polímero semicristalino segundo à sua estrutura molecular e termoplástico segundo seu comportamento mecânico, tem cadeias extremamente longas comparado com outro tipo de polímero.

O *UHMWPE* é composto, em termos estruturais, por cadeias lineares e pode potencialmente apresentar cadeias ramificadas devido à sua natureza termoplástica, mas o material não possui ramificações. Em outras palavras, se a estrutura começar a ficar mais rígida devido à presença de ligações cruzadas ou em rede, isso indicaria a transição para um polímero termorrígido. Os polímeros termoplásticos podem ter baixa ou alta densidade (cadeias lineares ou ramificadas) ou apresentar ligações cruzadas ou em rede. A presença de ligações cruzadas aumenta a rigidez dos materiais, tornando-os semelhantes, em comportamento, aos elastômeros.

## C.2 CARACTERÍSTICAS MOLECULARES

Uma cadeia polimérica é uma macromolécula, formada a partir de unidades de repetição (meros) unidas por ligações primárias fortes. Estas são chamadas intramoleculares, pois dizem respeito às ligações dentro de uma mesma molécula, normalmente do tipo covalente. Por outro lado, as distintas cadeias poliméricas, ou segmentos de uma mesma cadeia, se atraem por forças secundárias fracas, ditas intermoleculares. O *UHMWPE* possui um peso molecular elevado da ordem de 6.000.000 g/mol. Um polietileno de baixo peso molecular possui um peso molecular de 50.000 g/mol. Para (KURTZ *et al.*, 1998), o *UHMWPE* é membro da família de polímeros do polietileno com a unidade de repetição  $[C_2H_4]_n$ , com (n) indicando o grau de polimerização.

## C.3 ESTRUTURA CRISTALINA

As propriedades mecânicas do *UHMWPE* dependem tanto da porcentagem de cristalinidade do polímero quanto da morfologia das regiões cristalinas. A pesquisa de (KURTZ *et al.*, 1998), em experimentos de tensão uniaxial em ambiente laboratorial, verificaram que a porcentagem de cristalinidade do *UHMWPE* é favorável ao melhora-

mento das propriedades mecânicas do material. Assim como o trabalho originado por (SIMIS *et al.*, 2006) que sugerem a melhoria das propriedades do material ao aumento da cristalinidade do mesmo, observando melhorias na elasticidade e microdureza.

Existem fatores que atrapalham a cristalinidade nos polímeros, tanto aqueles internos como os fatores externos; um polímero pode conter uma certa cristalinidade, dependendo da ordem do arranjo da cadeia polimérica, pode-se imaginar como o empacotamento de cadeias moleculares, capaz de produzir uma matriz atômica ordenada.

O altíssimo peso molecular do *UHMWPE*, que pode chegar a 10 milhões de g/mol, proporciona índices de fluidez que se aproximam de zero (a 190 °C e 21,6 kg), impossibilitando-o de ser processado pelos métodos convencionais para termoplásticos. Entretanto, apresenta excelentes propriedades mecânicas, onde a alta resistência ao desgaste por abrasão, a alta resistência ao impacto e o baixíssimo coeficiente de atrito são destacados como as principais propriedades.

A fase cristalina do *UHMWPE* contém cadeias dobradas em lamelas altamente orientadas, com os cristais sendo de estrutura ortorrômbica conforme exposto por (LIN; ARGON, 1994). As lamelas têm de 10 a 50 nm de espessura e 10 a 50  $\mu\text{m}$  de comprimento (KURTZ, 2016). As lamelas são orientadas aleatoriamente dentro da fase amorfa com moléculas de ligação, unindo lamelas individuais umas às outras. No trabalho de (MEDEL *et al.*, 2007) mencionaram que para o *UHMWPE*, a tensão de escoamento aumenta com o aumento da espessura lamelar.

Segundo (SOBIERAJ; RIMNAC, 2009) as propriedades mecânicas do polímero dependem de suas fases cristalina e amorfa. A alteração de qualquer fase (ou seja, alteração da cristalinidade geral, morfologia cristalina ou reticulação da fase amorfa) pode afetar o comportamento mecânico do material. Também há evidências de que a morfologia do *UHMWPE* e, portanto, suas propriedades mecânicas, evoluem com a solicitação. O *UHMWPE* também demonstrou ser suscetível à degradação oxidativa após a esterilização por radiação gama com subsequente perda de propriedades mecânicas. Os métodos contemporâneos de esterilização de *UHMWPE* foram desenvolvidos para reduzir ou eliminar a degradação oxidativa. Além disso, a reticulação do *UHMWPE* foi buscada para melhorar a resistência ao desgaste dos componentes das juntas do *UHMWPE*.

O aumento da cristalinidade do *UHMWPE* aumenta a resistência à propagação

de trincas por fadiga do *UHMWPE*. Obtendo-se maior rigidez, aumento da resistência mecânica, maior resistência à solventes, aumenta o ponto de amolecimento, mas, se a cristalinidade diminui, também diminui a flexibilidade e maciez, viscosidade no estado fundido.

Além das regiões cristalinas, as regiões amorfas também desempenham um papel fundamental na determinação do comportamento físico do material. Quanto mais amorfo o material polimérico, maior será a sua flexibilidade, maciez, elasticidade, estabilidade dimensional, resistência à fluência, transparência e contração de moldagem, entre outros.

Conseqüentemente (KURTZ, 2016), relata que a redução das propriedades mecânicas deve-se a aumento da temperatura. Isto pode ser atribuído à mudanças nas regiões amorfas do material. Isto quer dizer que se a temperatura aumenta o volume específico, aumenta a energia cinética ( $E_C$ ), portanto aumenta o movimento dos átomos, aumentando a entalpia e entropia, caracterizado por ( $T_g$ ), todos estes fenômenos ajudam a reduzir as propriedades do material polimérico.

### **C.3.1 Fatores que afetam a cristalinidade do *UHMWPE***

Conforme (SIMIS *et al.*, 2006), a cristalinidade polimérica refere-se ao grau de empacotamento de cadeias moleculares de modo a produzir uma matriz atômica ordenada. Dependendo do tamanho dos meros a cadeia polimérica um polímero pode apresentar melhor cristalinidade. Por exemplo, para meros menores conseguimos organizar melhor, conseguimos atingir certo ponto de cristalinidade, precisamos de pouca temperatura e pelo fato da cadeia possuir menores meros a cadeias tem uma tendência a se movimentar mais ajudando então a ter uma alta cristalinidade. Já no caso contrário para meros maiores ou complexos, possuímos uma estrutura desordenada, este polímero vai ter uma tendência maior a ser amorfo e obviamente a sua cristalinidade diminui.

Além dos tamanhos dos meros existem fatores como por exemplo do ponto de vista estrutural, ou seja a estrutura da cadeia do ponto de vista da regularidade espacial e composição química. Por exemplo podemos citar a linearidade da cadeia polimérica onde as ramificações podem ser vistas como irregularidades da cadeia que dificultam o empacotamento o grau de cristalinidade.

Polímeros lineares cristalizam com facilidade, as ramificações inibem a crista-

lização, polímeros em rede são quase totalmente amorfos. Se os meros se arranjam mais regularmente, são mais fáceis de cristalizar. Também pode-se mencionar a tacticidade, que quando um polímero é mais regular (falando espacialmente) for a cadeia, então a tendência a se cristalizar é maior. Quando um polímero possui um grupo lateral volumoso, este pode apresentar um empacotamento regular das cadeias e também reduz a cristalinidade do polímero, esses grupos laterais podem aumentar a Tg e Tm (SIMIS *et al.*, 2006).

Os polímeros podem apresentar “imperfeições” comumente chamada de polaridade, a qual facilita a aproximação e aumento das forças de ligação intermoleculares, assim diminuem a mobilidade das cadeias e aumenta a Tg. Dependendo de como seja rígido ou flexível a cadeia principal do polímero também podem ajudar ou atrapalhar no empacotamento molecular, ou seja, grupos rígidos podem facilitar o empacotamento, mas também pode aumentar Tg, aumentar Tm, e o polímero pode ter uma tendência a ficar mais rígido. Também podemos dizer que grupos flexíveis são como articuladores.

Outro fator que altera a cristalização é a copolimerização, já que copolímeros por apresentarem diferentes meros em suas cadeias tendem a possuir um grau de cristalinidade menor, os diferentes meros dificultam o empacotamento molecular. Podemos mencionar também que a simetria da cadeia ajuda ou atrapalha a cristalinidade nos polímeros, por exemplo um grupo lateral volumoso dificulta de ser simétrico e ordenado.

Internamente a intensidade dos enlaces secundários se são fortes e regularmente distanciados podem favorecer a cristalinidade. Em outras palavras, enquanto a flexibilidade da cadeia principal de um polímero possui cadeias muito flexíveis então aumenta a cristalinidade, ocorre o contrário quando as cadeias são muito rígidas. Outro fator importante é a velocidade de resfriamento, se conseguimos resfriar o polímero a uma velocidade alta podemos interferir com a cristalinidade, ou seja, baixando a cristalinidade do polímero, ou seja, deixando os polímeros com regiões mais amorfas. Do ponto de vista mecânico nos perguntamos como chega a influenciar o grau de cristalinidade nas propriedades do material, pois bem, se o polímero possui menos grupos livres, ele vai ter menos espaço vazio, se o polímero for menos flexível ele aumenta a sua rigidez, a sua dureza, a cristalinidade aumenta, aumentando portanto o módulo de elasticidade.

A densidade de um polímero semicristalino pode ser maior do que um polímero

amorfo (exemplo com o mesmo material, o mesmo peso molecular), porque as cadeias de um polímero semicristalino estarão mais densamente compactadas. Os polímeros cristalinos podem ser mais rígidos, mais resistentes à dissolução e ao amolecimento ao calor. Podemos mencionar que um dos requisitos para cristalizar mais facilmente seria a organização estrutural geometricamente regular da cadeia polimérica, já que qualquer átomo ou grupo substituinte no eixo da cadeia seja bastante pequeno, para que se regularmente espaçado, consigam encaixar dentro da estrutura ordenada em virtude de seu pequeno tamanho. E que a cristalinidade, se a taxa de resfriamento é menor do que a taxa de crescimento consegue-se ter certo grau de cristalinidade.

Adicionando plastificantes diminui  $T_g$ , aumenta a cristalinidade, diminui o módulo, diminui a dureza, a tensão de ruptura, devido as ligações secundárias diminuírem, facilitando então a mobilidade das cadeias, o que leva a diminuição de  $T_g$  e  $T_m$ . As cadeias precisam de um tempo suficiente para ter um movimento adequado, e possam se alinhar uma cadeia e outra cadeia. Sabe-se que as cadeias quando estão perto do  $T_m$ , elas são muito aleatórias encontrando-se emaranhadas, precisando se ordenar.

Uma unidade múltipla de repetição de meros apresenta como resultado uma macromolécula, ou moléculas grandes, sendo uma cadeia de carbonos ligados para conformar um polímero, como por exemplo o *UHMWPE*.

Dependendo da ordem, pode-se mencionar a cristalinidade do polímero, dependendo da obtenção também pode-se descrever o polímero. Na seção C.5, mostra os fatores que podem afetar a temperatura de transição vítrea  $T_g$ , e a temperatura de fusão  $T_m$ . Podemos comentar que alguns dos requisitos para cristalizar são: Quanto mais regular, ou seja, espacialmente falando, aumentará a tendência do polímero de se cristalizar. Dessa maneira, o polímero pode ser mais cristalino quando se incrementa as forças intramoleculares, ou seja, as ligações secundárias, selecionando polímeros altamente polares. Quando as cadeias de polímeros são mais rígidas, os pontos de  $T_m$  aumentam de modo que as propriedades mecânicas associadas à cristalinidade são conservadas até temperaturas muito elevadas. Outra maneira de melhorar a cristalinidade é fazendo o material em forma de fibra, pelo processo de orientação ou estirado, obtendo maior rigidez, maior estabilidade dimensional. Desta maneira, aumenta a densidade, o módulo de elasticidade, a resistência a tração, a dureza, a resistência à abrasão, a estabilidade dimensional, assim como também a resistência química.

Observa-se que o material polimérico não é 100% cristalino devido à probabili-

dade de encontrar um defeito durante a construção de uma rede muito grande por sua alta massa molar, ou seja, dificilmente vamos encontrar regiões 100% ordenadas.

#### C.4 TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA

A temperatura  $T_g$  é considerada como uma transição secundária de segunda ordem que ocorre com materiais amorfos, ou semicristalinos, antes de se tornarem líquidos.

A transição que um material amorfo ou semicristalino sofre ao sair de sua condição viscosa (elástica) para uma condição vítrea (rígida e dura) ou vice-versa, corresponde à transição vítrea. A transição vítrea não é uma mudança de fase, e sim uma transição de segunda ordem, onde ocorrem diversas alterações em algumas propriedades características como por exemplo: coeficiente de expansão térmica e calor específico.

A temperatura de transição vítrea  $T_g$ , pode ser obtida em função do valor médio da temperatura durante o aquecimento do material polimérico que passa por valores baixos para valores altos. Esta variação de temperatura permite que as cadeias poliméricas da fase amorfa adquiram mobilidade, permitindo assim, a mudança de conformação.

Aumentando o grupo lateral, aumenta a  $T_g$ , mas aumentando o tamanho das cadeias, diminui a  $T_g$ . Ela provoca mudanças de propriedades físicas tais como: volume, densidade, propriedades mecânicas, elétricas, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão, índice de refração, calor específico etc.

Os polímeros que possuem temperatura abaixo da  $T_g$ , não possuem energia interna suficiente para permitir o deslocamento de uma cadeia em relação a outras por mudanças conformacionais. Por estarem no estado vítreo, é considerado duro, rígido e quebradiço como um vidro.

#### C.5 FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES REOLÓGICAS

A vida em fadiga do UHMWPE, ou de algum outro material polimérico é afetada dependendo se a temperatura de uso for maior ou menor da temperatura de transição vítrea do material. Se  $T_g <$  temperatura de uso, tem-se um polímero macio, Se  $T_g >$  temperatura de uso tem-se um polímero rígido. Percebe-se que a fadiga nos materiais poliméricos diminui com o aumento da temperatura. Como já mencionado, a redução



da resistência do material é consequência do aumento da mobilidade das cadeias poliméricas, consequência do aumento da energia cinética ( $E_C$ ).

Com o aumento do peso molecular, aumenta o número de emaranhamento, aumenta a viscosidade, aumenta a resistência ao movimento, diminui a mobilidade e por sua vez aumenta  $T_g$  e  $T_m$ , este comportamento é verificado em (MITSUO *et al.*, 2001);

Seja um polímero duro, frágil, tenaz ou um fluido viscoso quem determina as características físicas do produto é a mobilidade de uma cadeia polimérica. Esta mobilidade que nada mais é do que a agitação dos átomos nas moléculas, tem correlação com a temperatura. Diante disto, para compreendermos o desempenho termomecânico de um polímero, precisamos conhecer as características físico-químicas inerentes de um polímero. Um polímero que apresenta um comportamento fluido viscoso, geralmente é processado em temperaturas altas, no qual apresenta característica flexível e rígida, mas o *UHMWPE* possui longas cadeias moleculares com inúmeros emaranhados, o que o torna um elastômero de alta viscosidade semelhante à borracha ao fundir; assim, é difícil o seu processamento (MITSUO *et al.*, 2001). Essa mudança do comportamento é utilizada para a seleção do melhor material para determinada aplicação. Assim, entre os fatores que afetam  $T_g$  e  $T_m$  tem-se: Rigidez/flexibilidade; ligações intermoleculares e ou polaridade; grupo substituinte (lateral); massa molar; ramificações; ligações cruzadas; adição de plastificante; copolimerização (aleatório ou alternado); simetria.

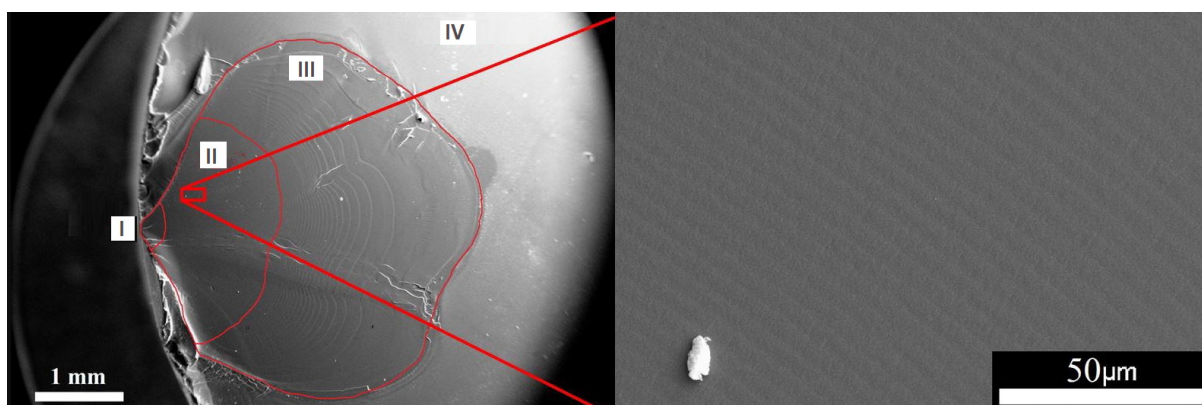
## APÊNDICE D – FALHA POR FADIGA NOS POLÍMEROS

As solicitações cíclicas nos materiais metálicos, sejam de carga ou deslocamento, causam deformações plásticas variáveis com o tempo em determinadas regiões do material. Essas deformações levam a uma deterioração progressiva do material, um processo de acúmulo de dano causado pela repetição das cargas, resultando na formação de trincas microscópicas que crescem até atingir um tamanho crítico, o dano macroscópico, suficiente para a ruptura final do material, geralmente de forma súbita com características macroscópicas de uma fratura frágil.

Nos materiais poliméricos o mecanismo de deformação é mais bem descrito pelas interações que existem entre as regiões lamelares e as regiões amorfas intermediárias em resposta à solicitação de tração. Esse fenômeno gera microvazios que se interligam para se orientar, formando as pontes fibrilares. As cadeias nas regiões amorfas se deslizam umas contra outras e se alinham na direção da solicitação cíclica. Logo, as cadeias se estendem até seu rompimento gerando uma interligação de microvazios, (CALLISTER, 2000).

Na Figura D.1, pode ser observado o trabalho de (HUGHES *et al.*, 2017). O autor realizou uma análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície de fratura de corpos de prova policarbonato para caracterizar o comportamento cíclico do material.

Figura D.1 – PC com superfície com fratura, e os estágios do dano



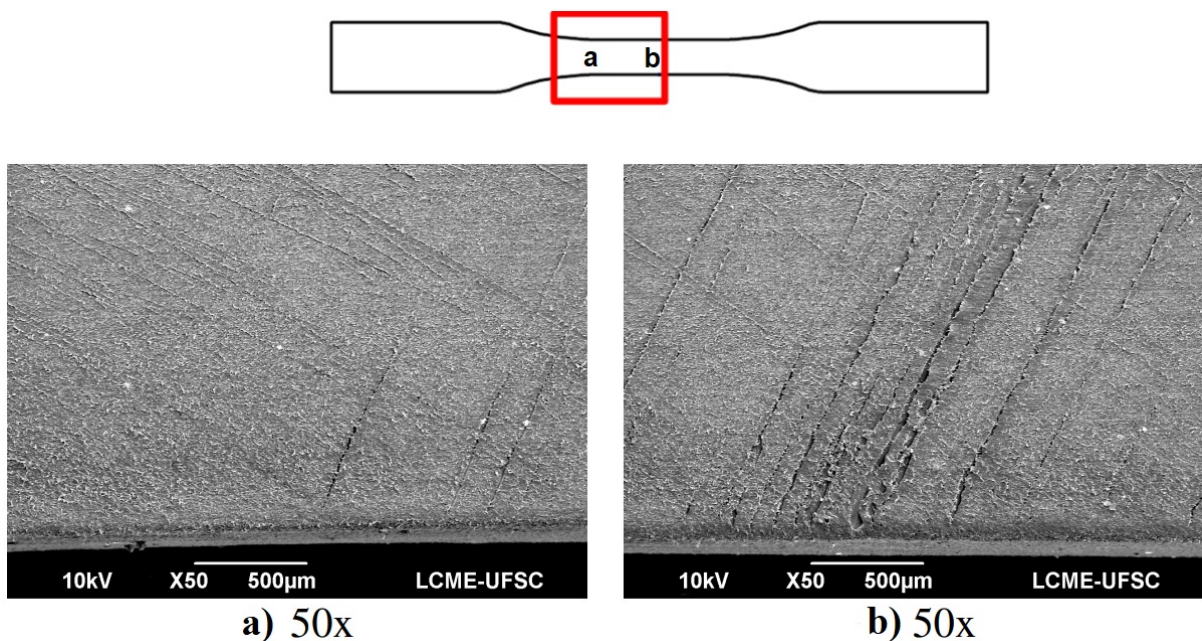
Fonte: Adaptado de(HUGHES *et al.*, 2017)

A Figura D.1 mostra uma visão geral de uma superfície fraturada, indicando a localização da nucleação da trinca e a região de crescimento da trinca por fadiga. Podem ser observadas marcas por fadiga, bem como três diferentes estágios de regimes

de dano:

- **Estagio I:** Compreende a incubação de uma pequena falha, região onde a trinca inicia e também o início de marcas concêntricas ao redor do local. Este início de estágio foi atribuído pelos autores (MACKAY; TENG; SCHULTZ, J., 1979), como possivelmente defeitos já existentes. No trabalho de (CARVALHO, 2016) foi constatado por meio de uma análise da superfície dos corpos de prova após ensaiados ciclicamente utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) conforme a Figura D.2, que houve nucleação de trincas aparentes em toda a superfície da amostra, devido às altas solicitações cíclicas aplicadas. Nessa análise foi observado que o surgimento de trincas ocorre na região útil do corpo de prova em um ângulo aproximado de  $45^\circ$ , que é o ângulo preferencial de nucleação de trincas devido à máxima tensão de cisalhamento.

Figura D.2 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura do *UHMWPE* com ampliação de 50x



Fonte: (CARVALHO, 2016)

- **Estagio II:** uma pequena trinca microestrutural se forma. Ocorre um crescimento lento das pontes fibrilares. As lamelas ficam inclinadas de modo que as dobras da cadeia ficam alinhadas com o eixo de tração, (CALLISTER, 2000). Esta região é mais identificada por marcas radiais típicas em materiais termoplásticos como por exemplo o *UHMWPE*. No trabalho de

(HERTZBERG; J.A.MANSON, 1973), foram observadas mais de 100 linhas radiais após o material estar sob uma solicitação cíclica.

- **Estagio III:** (HERTZBERG; J.A.MANSON, 1973), mencionam que o processo de crescimento do trinca é contínuo formando as trincas longas.
- **Estagio IV:** Provavelmente exista um elevado número de ciclos aplicados, as pontes fibrilares crescem até o ponto de romper, ocasionado a falha do material, (CALLISTER, 2000).

## APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS USANDO A TÉCNICA DMA

Antes de realizar o ensaio de DMA é necessário estabelecer um limite de carga por meio de ensaios preliminares com solicitações e frequências baixas, usando uma margem ampla de temperatura.

Neste estudo, foram conduzidos ensaios com uma amplitude de deslocamento constante de  $20\ \mu\text{m}$ . Esses ensaios foram realizados em uma frequência baixa, especificamente 1 Hz, abrangendo uma faixa de temperatura de  $30\ ^\circ\text{C}$  a  $140\ ^\circ\text{C}$ .

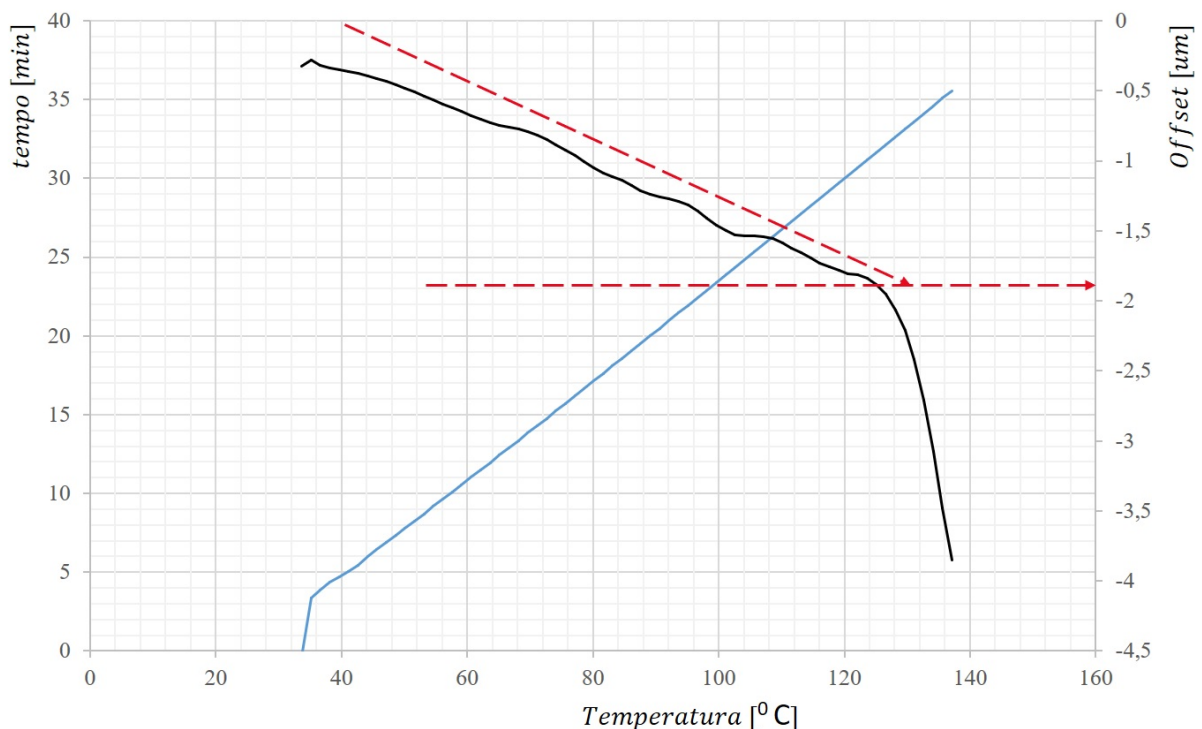
Os resultados obtidos na calibração do ensaio de DMA são apresentados nas Figuras E.1 e E.2,

A Figura E.1 mostra o valor do offset aproximadamente que foi encontrado experimentalmente, o qual está perto dos  $200\ \mu\text{m}$ .

A Figura E.2 exibe o comportamento dos módulos de perda, o módulo armazenamento e o offset e também os parâmetros utilizados no ensaio.

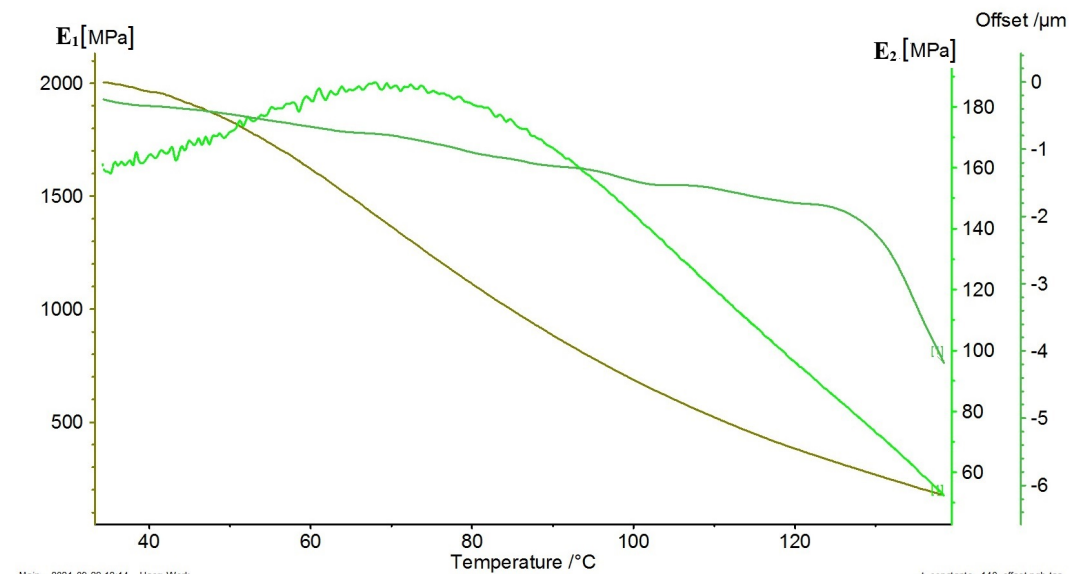
Após a determinação do valor de offset, outros ensaios foram realizados em diferentes temperaturas e frequências com um offset de  $100\ \mu\text{m}$ .

Figura E.1 – Ensaio DMA: *offset*



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura E.2 – Ensaio DMA, 20 µm, 1Hz



|  |  |   |  |                                |
|--|--|---|--|--------------------------------|
| Main 2021-09-28 12:14 User: Work       |  | File : C:\NETZSCH\Proteus61\data\Jairo_grante\l_constante_140.ngb-dm2 |  | t_constante_140_offset.ngb-taa |
| <b>Instrument :</b> NETZSCH DMA 242    | <b>Sample dim. :</b> 13.000x1.950x2.850 mm | <b>Temp. range :</b> 30.0°C/3.0(K/min)/140.0°C                        | <b>Calibration :</b> !dynamass-2016.mm2              |                                |
| <b>Identity :</b> pe                   | <b>Deform. mode :</b> Tension              | <b>Segments :</b> 1/1   | <b>Calibration :</b> !esc -tension-2016-abril-26.em2 |                                |
| <b>Date/Time :</b> 22/09/2021 16:46:10 | <b>Amplitude :</b> 20.00 µm                | <b>Frequency :</b> 1Hz  | <b>Calibration :</b> !SSC_TENSION_2016-ABRIL-26.cm7  |                                |
| <b>Laboratory :</b> labmat             | <b>DF/CSF :</b> 4.00 N / 3.00 N            | <b>Atmosphere :</b> air   | <b>Calibration :</b> !04152017-3pb-rot.rm2           |                                |
| <b>Operator :</b> fabiana              | <b>PF :</b> 0.00                           | <b>Flow rate :</b> 0 ml/min   | <b>Temp.calib. :</b> tcalzero.TMX                    |                                |
| <b>Project :</b> jairo                 | <b>Material :</b> PE                       | <b>Smoothing :</b> 1e-005/1 - multiple sm.coeffs.                     |  |                                |
| <b>Sample/shape :</b> pe/Cubic         |  |   |  |                                |

**Sample dim. :** 13.000x1.950x2.850 mm  
**Deform. mode :** Tension  
**Amplitude :** 20.00 µm  
**DF/CSF :** 4.00 N / 3.00 N  
**PF :** 0.00  
**Material :** PE

**Temp. range :** 30.0°C/3.0(K/min)/140.0°C  
**Segments :** 1/1  
**Frequency :** 1Hz  
**Atmosphere :** air  
**Flow rate :** 0 ml/min  
**Smoothing :** 1e-005/1 - multiple sm.coeffs.

**Calibration :** !dynamass-2016.mm2  
**Calibration :** !esc -tension-2016-abril-26.em2  
**Calibration :** !SSC\_TENSION\_2016-ABRIL-26.cm7  
**Calibration :** !04152017-3pb-rot.rm2  
**Temp.calib. :** tcalzero.TMX

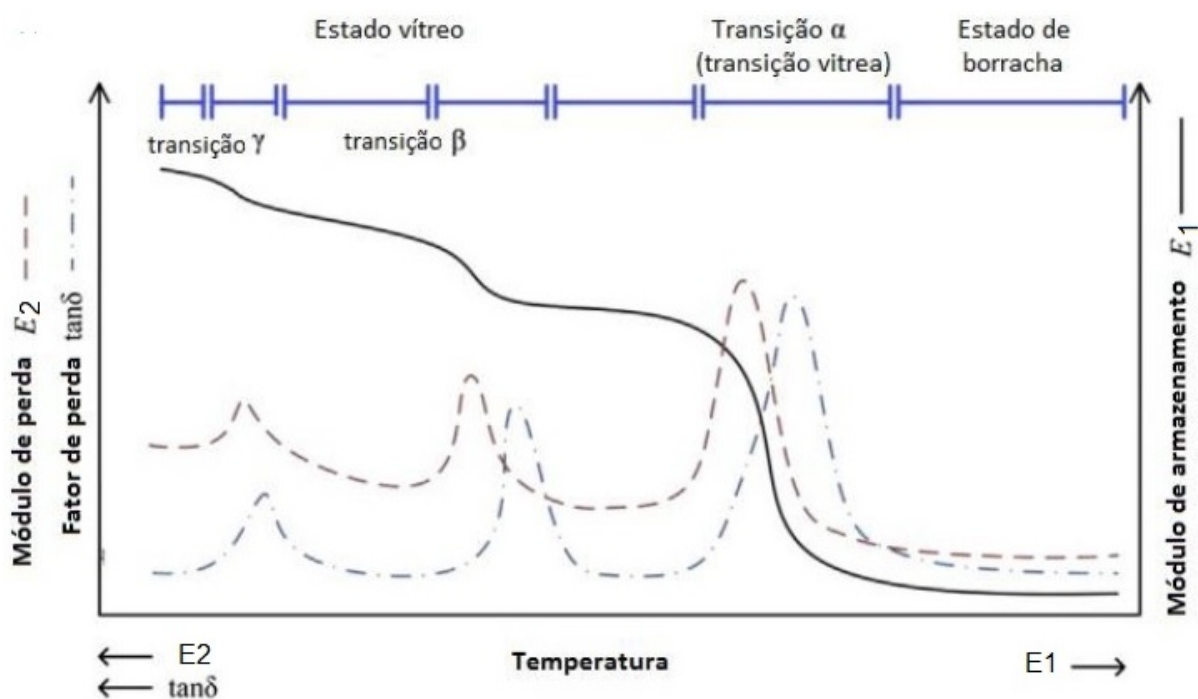
Created with NETZSCH Proteus software

Fonte: Elaborado pelo autor

Análise do ensaio dinâmico DMA foi de suma importância para entender o comportamento do módulo complexo. Alguns exemplos e informação importante serão comentadas a seguir e podem ajudar como guias para entender a resposta de um ensaio usando a técnica DMA. A Figura E.3, representa uma curva típica dos dados obtidos na técnica de *Dynamic Mechanical Analysis* (DMA) de um polímero (FENG; GUO, 2015). Pode-se observar os dados de  $(E_1)$ ,  $(E_2)$  e  $(\tan\varphi)$  em função da temperatura; identifica-se as regiões de transição de um polímero, através dos picos característicos verificados. Percebe-se que com o aumento da temperatura, o material passa de um estado vítreo para um estado elastomérico.

As primeiras transições observadas são chamadas de transição ( $\gamma$ ) e transição ( $\beta$ ). Após, observa-se uma rápida queda nos valores de  $(E_1)$  e um pico na curva de  $(E_2)$  e de  $(\tan\varphi)$ . A essa transição dá-se o nome de transição ( $\alpha$ ) ou transição vítrea. As temperaturas nas quais ocorrem essas transições podem ser melhor visualizadas na Figura E.4 (NETZSCH, 2009).

Figura E.3 – Curva típica resultante dos dados obtidos usando na técnica de DMA



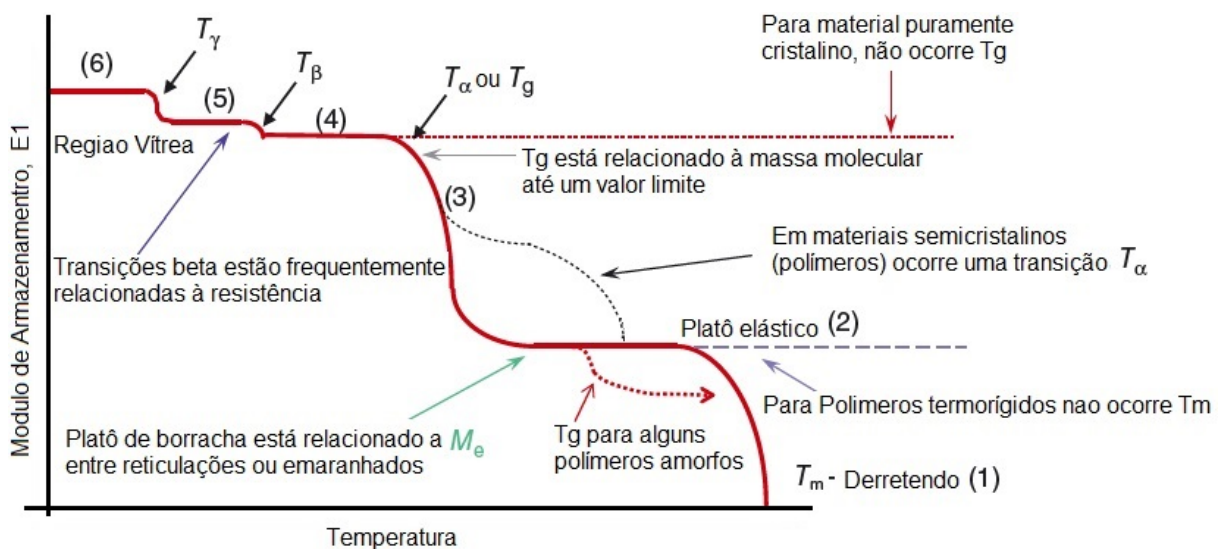
Fonte: (FENG; GUO, 2015)

Observa-se na Figura E.3, algumas transições características do resultado da técnica DMA dos módulos em função da temperatura. O módulo de armazenamento, ( $E_1$ ), com o aumento da temperatura na região vítrea, as primeiras transições observadas são chamadas de transição ( $\gamma$ ) e transição ( $\beta$ ), e estão relacionadas a relaxações

de ramificações e grupos laterais das cadeias poliméricas ( $\beta$ ) e movimentações de outros pequenos segmentos que envolvem pelo menos quatro átomos de carbono ( $\gamma$ ). Ao mesmo tempo em que ocorre a diminuição nos valores de ( $E_1$ ), um pico aparece na curva de ( $E_2$ ) e de ( $\tan \varphi$ ), ambos eventos relacionados a transição vítrea ou transição ( $\alpha$ ). A transição vítrea é exclusiva de polímeros amorfos e semicristalinos, isto é, para materiais cristalinos puros, a ( $T_g$ ) não ocorre (NETZSCH, 2009).

A Figura E.4, mostra a curva típica para materiais poliméricos, começando a baixa temperatura, o módulo diminui à medida que as moléculas ganham mais volume livre, resultando em mais movimento molecular. Isso mostra a curva principal dividida em seis regiões, o que corresponde: (6) movimentos locais; (5) flexão e alongamento; (4) movimentos da cadeia lateral ou átomos adjacentes na cadeia principal; (3) a região do ( $T_g$ ); (2) movimentos coordenados na porção amorfa da corrente; (1) estado de borracha.

Figura E.4 – Curva típica para materiais poliméricos: comportamento do módulo  $E_1$  com variação da temperatura ( $T^\circ$ )



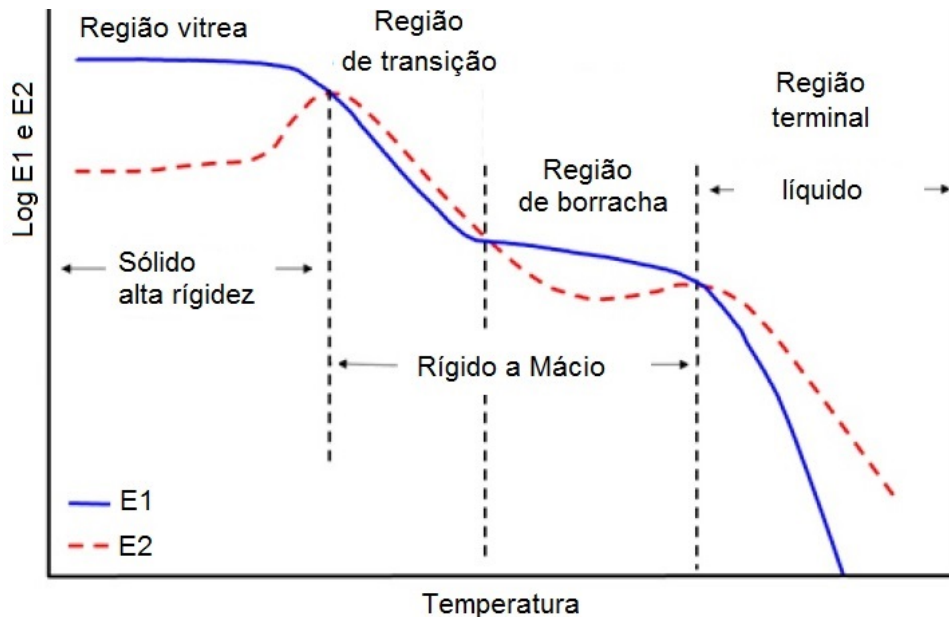
Fonte: Adaptado de (LORANDI; CIOFFI; ORNAGHI, 2016)

Na Figura E.5 as curvas DMA mostram a sequência de comportamento mecânico de um material viscoelástico em função da temperatura, iniciando no estado sólido até o estado de borracha.

Na Figura E.6 pode-se observar as transições do *UHMWPE* com PP, ( $T_g = -119^\circ\text{C}$ ) e ao PP copolímero (transição a  $-35^\circ\text{C}$  relativa a fase borracha e transição a  $7,5^\circ\text{C}$  relativa à matriz de homopolímero), conforme (WERLANG *et al.*, s.d.). Devido à sua baixa temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), o *UHMWPE* mantém sua excelente



Figura E.5 – Comportamento viscoelástico de um material, curvas DMA



Fonte: (NETZSCH, 2009)

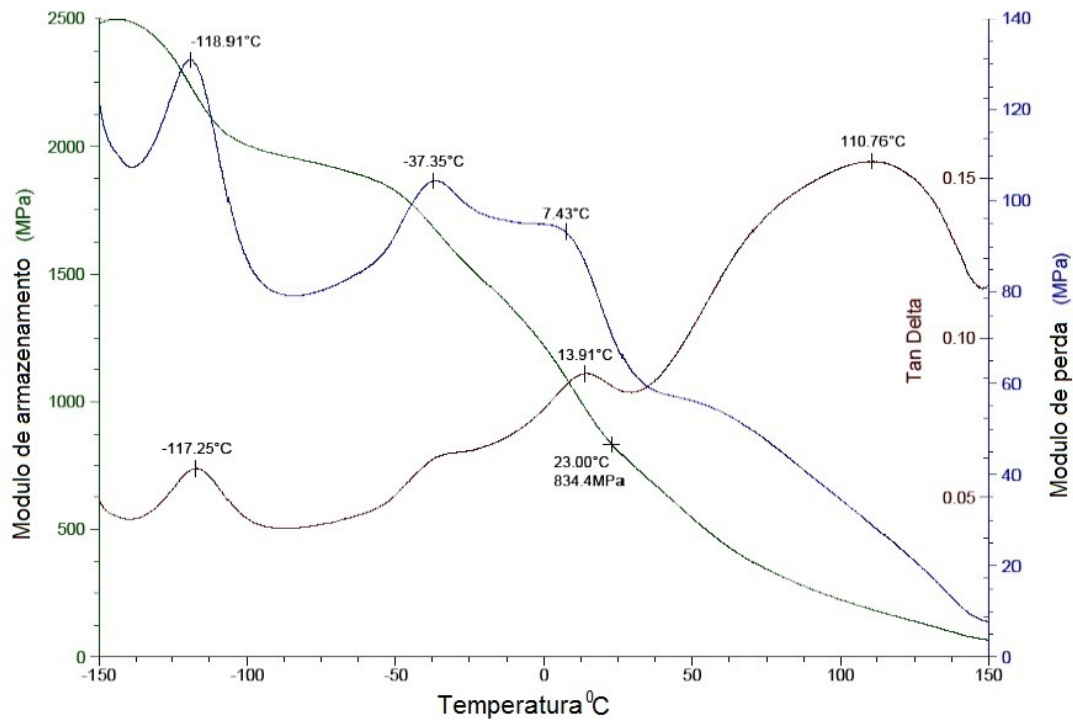
propriedade de resistência ao impacto, o que o torna adequado para aplicações que requeiram uso contínuo em baixas temperaturas.

A Figura E.7, mostra as curvas DMA para o módulo de armazenamento e tangente de perda para um material que apresenta várias transições durante seu aquecimento. Apresenta uma curva da tangente de perda ( $\tan \varphi$ ), mostrando, além da transição principal, outras transições. O pico mais alto da curva ( $\tan \varphi$ ) ( $\alpha a$ ), equivale à temperatura de transição vítrea do material.

As transições à esquerda do pico principal, ( $\beta a$ ) e ( $\gamma a$ ) estão relacionadas com relaxações de grupos, ou parte de grupos laterais presentes nas fases amorfas das cadeias poliméricas, podendo ainda se relacionar a impurezas ou aditivos de formulação. As transições à direita do pico principal ( $\alpha c$ ) e ( $\alpha' c$ ) estão relacionadas às fases cristalinas associadas a processos de fusão. As propriedades de um material viscoelástico relacionadas à sua estrutura molecular, como presença de regiões cristalinas, ligações entrecruzadas, fases homogêneas ou heterogêneas, aditivos, plastificantes, massa molecular, orientação de moldagem, ou qualquer processo que possa facilitar ou dificultar os movimentos moleculares, ou ainda alterar a fração volumétrica de transição, podem ser avaliadas estudando o comportamento da curva DMA da tangente de perda.

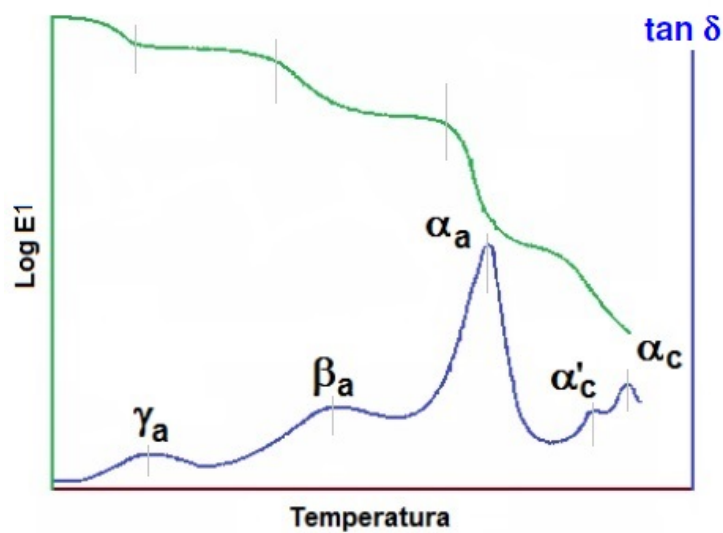
A Figura E.8, mostra o resultado do DMA para o PP, ensaio realizado flexão 3

Figura E.6 – Curva dinâmico-mecânica de uma mistura de UHMWPE com PP



Fonte: (WERLANG *et al.*, s.d.)

Figura E.7 – Curvas DMA para módulo de armazenamento e tangente de perda

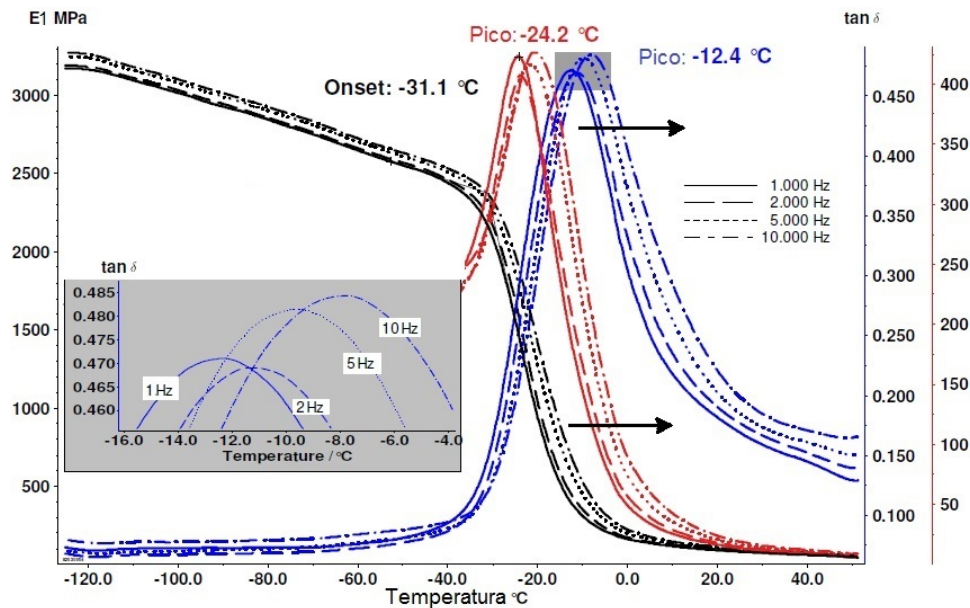


Fonte: (NETZSCH, 2009)

pontos 20 mm, com uma variação de temperatura de -130°C até 50°C, a uma taxa de 2 K/min, com frequências de 1, 2, 5, 10 Hz, aplicando uma amplitude de 40  $\mu m$ . Observa-se na referida figura a variação do módulo.

É possível determinar o Tg a partir do ensaio DMA, e existem diversas normas que descrevem métodos para realizar essa medição. A norma (ANSI-ASTM-D-4762-

Figura E.8 – Resultado do ensaio DMA para PP multifrequência (1, 2, 5, 10 Hz)



11A, 2019) é uma das normas mais utilizadas para ensaios DMA em polímeros, e ela fornece informações sobre como preparar as amostras, definir as condições de ensaio, e analisar os resultados para determinar o Tg.

Uma outra norma é a norma ASTM (E1640, 2018), usada frequentemente como padrão para determinar o Tg de materiais poliméricos por análise térmica. Essa norma descreve um método para determinar o Tg por meio de análise de termogravimetria diferencial (DTG) ou calorimetria diferencial de varredura (DSC). A partir dos dados obtidos na análise, é possível determinar o ponto de inflexão da curva de aquecimento, que corresponde à temperatura de transição vítrea do material.

No entanto, é importante ressaltar que a escolha da norma e do método de ensaio a ser utilizado para determinar o Tg deve levar em consideração o tipo de material e as propriedades desejadas. É recomendável consultar as normas específicas e os procedimentos recomendados para cada caso.

Observa-se que o DMA permite obter curvas características e analisar o comportamento dos módulos de armazenamento e perda do material. Essa técnica proporciona uma compreensão mais aprofundada e uma interpretação mais precisa do módulo complexo do material. Isso, por sua vez, possibilita a aplicação de modelos viscoelásticos fracionários, como o modelo de Huet-Sayegh (HUET, 1963), para a análise do módulo complexo usando o plano Cole-Cole.

## APÊNDICE F – MATERIAL DE ESTUDO: RESULTADOS ENSAIO DMA

Tabela 6 – Resultados do ensaio de módulo complexo, *UHMWPE*

| T [°C]                     | $\omega$ [Hz] | $E_1$ [MPa] | $E_2$ [MPa] | $E^*$ [MPa] | $[\theta]$ |
|----------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 13                         | 1             | 2333,4      | 93,7        | 2335,3      | 2,3        |
| 14                         | 1             | 2320,1      | 94,3        | 2322,0      | 2,3        |
| 15                         | 1             | 2306,7      | 94,9        | 2308,6      | 2,3        |
| 16                         | 1             | 2293,2      | 95,5        | 2295,2      | 2,3        |
| 17                         | 1             | 2279,6      | 96,1        | 2281,6      | 2,4        |
| 18                         | 1             | 2261,3      | 97,0        | 2263,4      | 2,4        |
| 19                         | 1             | 2247,4      | 97,7        | 2249,5      | 2,4        |
| 20                         | 1             | 2219,1      | 99,3        | 2221,3      | 2,5        |
| 21                         | 1             | 2159,3      | 103,3       | 2161,7      | 2,7        |
| 22                         | 1             | 2133,4      | 105,3       | 2136,0      | 2,8        |
| 23                         | 1             | 2117,7      | 106,4       | 2120,4      | 2,8        |
| 24                         | 1             | 2101,9      | 107,7       | 2104,7      | 2,9        |
| 25                         | 1             | 2086,0      | 108,9       | 2088,9      | 2,9        |
| 26                         | 1             | 2070,1      | 110,1       | 2073,0      | 3,0        |
| 27                         | 1             | 2054,0      | 111,4       | 2057,1      | 3,1        |
| 28                         | 1             | 2032,6      | 113,1       | 2035,7      | 3,1        |
| 29                         | 1             | 2016,4      | 114,3       | 2019,7      | 3,2        |
| 30                         | 1             | 1984,0      | 116,8       | 1987,4      | 3,3        |
| 31                         | 1             | 1918,3      | 121,7       | 1922,1      | 3,6        |
| 32                         | 1             | 1890,7      | 123,8       | 1894,7      | 3,7        |
| 33                         | 1             | 1874,1      | 125,0       | 1878,3      | 3,8        |
| 34                         | 1             | 1857,5      | 126,2       | 1861,8      | 3,8        |
| 35                         | 1             | 1840,9      | 127,4       | 1845,3      | 3,9        |
| 36                         | 1             | 1824,3      | 128,6       | 1828,8      | 4,0        |
| 37                         | 1             | 1807,6      | 129,9       | 1812,3      | 4,1        |
| 38                         | 1             | 1791,0      | 131,1       | 1795,8      | 4,1        |
| 39                         | 1             | 1768,8      | 132,8       | 1773,8      | 4,2        |
| Continua na próxima página |               |             |             |             |            |

**Tabela 6 — Continuação da página anterior**

| T [°C]                     | $\omega$ [Hz] | $E_1$ [MPa] | $E_2$ [MPa] | $E^*$ [MPa] | $[\delta]$ |
|----------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 40                         | 1             | 1735,6      | 135,5       | 1740,8      | 4,4        |
| 41                         | 1             | 1669,1      | 141,2       | 1675,1      | 4,8        |
| 42                         | 1             | 1647,0      | 143,1       | 1653,2      | 4,9        |
| 43                         | 1             | 1624,8      | 145,1       | 1631,3      | 5,1        |
| 44                         | 1             | 1608,2      | 146,6       | 1614,8      | 5,2        |
| 45                         | 1             | 1591,5      | 148,0       | 1598,4      | 5,3        |
| 46                         | 1             | 1574,8      | 149,4       | 1581,9      | 5,4        |
| 47                         | 1             | 1558,1      | 150,8       | 1565,4      | 5,5        |
| 48                         | 1             | 1541,4      | 152,0       | 1548,8      | 5,6        |
| 49                         | 1             | 1518,9      | 153,7       | 1526,7      | 5,7        |
| 50                         | 1             | 1490,7      | 155,4       | 1498,8      | 5,9        |
| 51                         | 1             | 1416,1      | 158,1       | 1424,9      | 6,3        |
| 52                         | 1             | 1393,0      | 158,5       | 1402,0      | 6,4        |
| 53                         | 1             | 1369,8      | 158,7       | 1379,0      | 6,6        |
| 54                         | 1             | 1352,4      | 158,9       | 1361,7      | 6,7        |
| 55                         | 1             | 1335,0      | 159,0       | 1344,5      | 6,7        |
| 56                         | 1             | 1317,7      | 159,0       | 1327,3      | 6,8        |
| 57                         | 1             | 1300,5      | 159,1       | 1310,2      | 6,9        |
| 58                         | 1             | 1277,7      | 159,0       | 1287,5      | 7,0        |
| 59                         | 1             | 1260,7      | 159,0       | 1270,7      | 7,1        |
| 60                         | 1             | 1232,8      | 158,8       | 1243,0      | 7,3        |
| 61                         | 1             | 1158,4      | 157,9       | 1169,1      | 7,7        |
| 62                         | 1             | 1143,0      | 157,6       | 1153,8      | 7,8        |
| 63                         | 1             | 1127,7      | 157,3       | 1138,6      | 7,9        |
| 64                         | 1             | 1112,5      | 157,0       | 1123,5      | 8,0        |
| 65                         | 1             | 1097,4      | 156,6       | 1108,5      | 8,1        |
| 66                         | 1             | 1082,4      | 156,3       | 1093,6      | 8,2        |
| 67                         | 1             | 1067,5      | 155,9       | 1078,9      | 8,3        |
| 68                         | 1             | 1042,9      | 155,3       | 1054,4      | 8,4        |
| Continua na próxima página |               |             |             |             |            |

**Tabela 6 — Continuação da página anterior**

| T [°C]                     | $\omega$ [Hz] | $E_1$ [MPa] | $E_2$ [MPa] | $E^*$ [MPa] | $[\delta]$ |
|----------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 69                         | 1             | 1028,3      | 154,8       | 1039,9      | 8,5        |
| 70                         | 1             | 1004,3      | 154,1       | 1016,1      | 8,7        |
| 71                         | 1             | 948,5       | 151,9       | 960,6       | 9,0        |
| 72                         | 1             | 930,4       | 151,0       | 942,6       | 9,2        |
| 73                         | 1             | 912,4       | 150,2       | 924,7       | 9,3        |
| 74                         | 1             | 899,0       | 149,5       | 911,4       | 9,4        |
| 75                         | 1             | 885,8       | 148,8       | 898,2       | 9,5        |
| 76                         | 1             | 872,6       | 148,0       | 885,0       | 9,6        |
| 77                         | 1             | 859,4       | 147,3       | 872,0       | 9,7        |
| 78                         | 1             | 846,4       | 146,5       | 859,0       | 9,8        |
| 79                         | 1             | 829,3       | 145,4       | 841,9       | 9,9        |
| 80                         | 1             | 808,1       | 143,9       | 820,9       | 10,0       |
| 81                         | 1             | 755,6       | 139,2       | 768,4       | 10,4       |
| 82                         | 1             | 740,0       | 137,6       | 752,7       | 10,5       |
| 83                         | 1             | 728,4       | 136,4       | 741,1       | 10,6       |
| 84                         | 1             | 716,9       | 135,2       | 729,6       | 10,6       |
| 85                         | 1             | 705,5       | 133,9       | 718,1       | 10,7       |
| 86                         | 1             | 694,2       | 132,6       | 706,8       | 10,8       |
| 87                         | 1             | 683,0       | 131,3       | 695,5       | 10,8       |
| 87                         | 1             | 679,2       | 130,9       | 691,7       | 10,9       |
| 88                         | 1             | 668,1       | 129,6       | 680,6       | 10,9       |
| 89                         | 1             | 657,1       | 128,3       | 669,5       | 11,0       |
| 90                         | 1             | 639,0       | 126,1       | 651,3       | 11,1       |
| 91                         | 1             | 594,1       | 120,5       | 606,2       | 11,4       |
| 92                         | 1             | 577,5       | 118,3       | 589,5       | 11,5       |
| 93                         | 1             | 567,7       | 117,0       | 579,6       | 11,6       |
| 94                         | 1             | 557,9       | 115,7       | 569,8       | 11,7       |
| 95                         | 1             | 548,2       | 114,4       | 560,1       | 11,7       |
| 96                         | 1             | 535,4       | 112,7       | 547,2       | 11,8       |
| Continua na próxima página |               |             |             |             |            |

**Tabela 6 — Continuação da página anterior**

| T [°C]                     | $\omega$ [Hz] | $E_1$ [MPa] | $E_2$ [MPa] | $E^*$ [MPa] | $[\theta]$ |
|----------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 97                         | 1             | 529,1       | 111,9       | 540,8       | 11,9       |
| 98                         | 1             | 510,2       | 109,3       | 521,8       | 12,0       |
| 99                         | 1             | 507,1       | 108,9       | 518,7       | 12,1       |
| 100                        | 1             | 491,7       | 106,7       | 503,2       | 12,2       |
| 101                        | 1             | 453,4       | 101,1       | 464,6       | 12,5       |
| 102                        | 1             | 442,0       | 99,4        | 453,1       | 12,6       |
| 103                        | 1             | 430,8       | 97,7        | 441,7       | 12,7       |
| 104                        | 1             | 422,4       | 96,4        | 433,3       | 12,8       |
| 105                        | 1             | 414,1       | 95,1        | 424,9       | 12,9       |
| 106                        | 1             | 405,8       | 93,8        | 416,5       | 13,1       |
| 107                        | 1             | 397,6       | 92,5        | 408,2       | 13,0       |
| 108                        | 1             | 389,4       | 91,2        | 400,1       | 13,1       |
| 109                        | 1             | 378,7       | 89,4        | 389,1       | 13,2       |
| 110                        | 1             | 365,4       | 87,3        | 375,7       | 13,4       |
| 111                        | 1             | 332,1       | 81,6        | 342,1       | 13,8       |
| 112                        | 1             | 322,1       | 79,9        | 331,9       | 13,9       |
| 113                        | 1             | 312,3       | 78,2        | 321,9       | 14,6       |
| 114                        | 1             | 304,9       | 76,9        | 314,5       | 14,4       |
| 115                        | 1             | 297,6       | 75,5        | 307,1       | 14,3       |
| 116                        | 1             | 290,4       | 74,3        | 299,8       | 14,3       |
| 117                        | 1             | 283,2       | 72,9        | 292,4       | 14,4       |
| 118                        | 1             | 276,0       | 71,6        | 285,2       | 14,5       |
| 119                        | 1             | 266,5       | 69,9        | 275,5       | 14,7       |
| 120                        | 1             | 254,8       | 67,7        | 263,7       | 14,9       |
| 121                        | 1             | 225,3       | 61,9        | 233,7       | 15,7       |
| 122                        | 1             | 214,2       | 59,6        | 222,4       | 15,5       |
| 123                        | 1             | 207,5       | 58,2        | 215,5       | 15,6       |
| 124                        | 1             | 200,9       | 56,8        | 208,8       | 15,8       |
| 125                        | 1             | 194,2       | 55,3        | 201,9       | 15,9       |
| Continua na próxima página |               |             |             |             |            |

**Tabela 6 — Continuação da página anterior**

| T [°C] | $\omega$ [Hz] | $E_1$ [MPa] | $E_2$ [MPa] | $E^*$ [MPa] | $[\delta]$ |
|--------|---------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 126    | 1             | 187,5       | 53,8        | 195,1       | 16,0       |
| 127    | 1             | 180,7       | 52,3        | 188,2       | 16,1       |
| 128    | 1             | 171,5       | 50,2        | 178,7       | 16,3       |
| 129    | 1             | 162,2       | 47,9        | 169,1       | 16,4       |
| 130    | 1             | 152,6       | 45,4        | 159,2       | 16,5       |
| 131    | 1             | 118,7       | 35,7        | 124,1       | 16,7       |
| 132    | 1             | 105,0       | 31,5        | 109,7       | 16,7       |
| 133    | 1             | 96,8        | 28,9        | 101,1       | 16,6       |
| 134    | 1             | 88,6        | 26,4        | 92,5        | 16,6       |
| 135    | 1             | 80,5        | 23,8        | 84,0        | 16,5       |
| 136    | 1             | 72,6        | 21,3        | 75,7        | 16,3       |
| 137    | 1             | 62,3        | 18,0        | 64,9        | 16,1       |

Fonte: Elaborado pelo autor



## APÊNDICE G – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA NO ENSAIO COM CONTROLE DE DESLOCAMENTO

No início do ensaio, seja por controle de carga ou controle de deslocamento, é comumente observada uma queda significativa na força devido à perda de rigidez do material. Esse fenômeno pode ser visualizado pelo comportamento do módulo complexo. A perda de rigidez pode ser causada por diversos fatores. Após um certo número de ciclos, a força monitorada exibe um comportamento horizontal, indicando que o material alcançou um estado de equilíbrio, onde a taxa de deformação é igual à taxa de recuperação elástica. Isso indica que a amostra não apresenta perda significativa de rigidez. No entanto, é importante ressaltar que o dano do material continua a progredir até atingir um valor consideravelmente alto.

Uma dúvida relacionada à temperatura surgiu, pois autores como (CRAWFORD; BENHAM, 1975) mencionam que o material apresenta uma falha térmica. Em uma outra pesquisa (SAUER; WEAVER; NEIL, 1996) preocupa-se por evitar essa possível falha térmica. Portanto, buscou-se verificar essa informação por meio de ensaios com controle de deslocamento variando a razão de deformação. A observação foi auxiliada por uma câmera térmica Termovisor. A câmera possui um detector infravermelho de 76.800 (320 × 240) pixels e uma faixa de temperatura operacional ampla, de -20 °C a 550 °C.

Verificou-se que o material *UHMWPE* apresenta uma variação de temperatura aproximada de apenas 1 °C. Esse fenômeno de pequena variação de temperatura demonstra que o material não mantém uma temperatura fixa, mas sim aquece progressivamente. Inicia-se com um valor próximo à temperatura ambiente do ensaio, cerca de 21,5 °C, e alcança 23 °C, sugerindo uma espécie de ciclo em que o material esfria e depois aquece novamente. Os ensaios foram acompanhados e algumas imagens foram capturadas. A Figura G.1 mostra o comportamento da temperatura em um ensaio com controle de deslocamento em um intervalo de tempo de aproximadamente 9 minutos. A fim de confirmar esse fenômeno, foram realizadas várias medições ao longo de 3 milhões de ciclos, e os resultados evidenciaram claramente que o material de fato apresenta um leve aquecimento cíclico ao longo dos 9 minutos, como pode ser observado nas imagens apresentadas. Como a flutuação de temperatura é muito pequena, este detalhe não foi considerado no desenvolvimento do trabalho.

Figura G.1 – Comportamento da temperatura no ensaio com controle de deslocamento

