



Lucio Rossi de Souza

**Efeitos do envelhecimento em água e óleo
lubrificante sobre o comportamento à fluência de
material compósito de matriz polimérica
reforçada por fibra de vidro**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos.

Orientador: Prof. José Roberto Moraes d'Almeida

Rio de Janeiro
Setembro de 2015



Lucio Rossi de Souza

**Efeitos do envelhecimento em água e óleo
lubrificante sobre o comportamento à fluência de
material compósito de matriz polimérica
reforçada por fibra de vidro**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Roberto Moraes d'Almeida

Orientador e Presidente

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Dr. Marcos Henrique de Pinho Maurício

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Profa. Marysilvia Ferreira da Costa

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico da
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de setembro de 2015.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Lucio Rossi de Souza

Graduado Engenheiro Mecânico pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dezembro-2006. Trabalhos de iniciação científica na área de Caracterização de Materiais Compósitos, assim como em projeto de sistemas mecânicos automotivos. Atuação profissional na indústria no ramo de óleo e gás com projetos de equipamentos mecânicos. Curso de mecânica de equipamentos refrigeradores pelo Senai-RJ, Dezembro-2015. Interesse em desenvolvimento de novas aplicações para materiais compósitos.

Ficha Catalográfica

Souza, Lucio Rossi de

Efeitos do envelhecimento em água e óleo lubrificante sobre o comportamento à fluência de material compósito de matriz polimérica reforçada por fibra de vidro / Lucio Rossi de Souza ; orientador: José Roberto Moraes d'Almeida. – 2015.

105 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Química – Teses. 2. Engenharia de materiais – Teses. 3. Compósito. 4. Fluência. 5. Temperatura. 6. Envelhecimento em água. 7. Envelhecimento em óleo. I. Almeida, José Roberto Moraes d'. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. III. Título.

Para minha esposa, Renata, meus pais, Célio e Sonia e meu irmão, Guilherme, pelo apoio e incentivo constantes.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor José Roberto Moraes d'Almeida pelo apoio em todas as fases do projeto.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Professor António Torres Marques, por todo o apoio na FEUP e pela hospitalidade na cidade do Porto.

Ao Professor Joaquim Gabriel, pelo apoio e disponibilização de recursos do laboratório da FEUP.

A Rui António Martins da Silva, técnico superior do Laboratório de Ensaios Tecnológicos da FEUP, pelo suporte no uso do laboratório.

A José Fernando Saldanha, responsável técnico do Departamento de Mecânica da FEUP, pelo auxílio nos dispositivos de ensaio mecânico.

Aos professores da Comissão examinadora.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio pelos ensinamentos.

A todos os amigos e familiares que de alguma forma me incentivaram ou me ajudaram.

Resumo

Souza, Lucio Rossi de; d'Almeida, José Roberto Moraes. **Efeitos do envelhecimento em água e óleo lubrificante sobre o comportamento à fluência de material compósito de matriz polimérica reforçada por fibra de vidro.** Rio de Janeiro, 2015. 105p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esse estudo tem como objetivo verificar as consequências do envelhecimento no comportamento à fluência de um material compósito reforçado por fibras de vidro, em função de diferentes tipos de envelhecimento e temperaturas de ensaio. Para tanto, corpos de prova envelhecidos em água e óleo, bem como outros sem qualquer envelhecimento, foram ensaiados à fluência em 25°C e 60°C. As análises se basearam nas propriedades mecânicas relativas ao processo de fluência obtidas tanto experimentalmente quanto a partir de modelos viscoelásticos e semiempíricos. Dentre as condições experimentais empregadas, o parâmetro que mais influenciou o processo de fluência foi a temperatura. Os efeitos da temperatura no processo de fluência foram determinantes inclusive para a escolha do modelo que melhor se ajustou aos pontos experimentais. Na temperatura de 25°C, independente do meio ou tempo de envelhecimento, o modelo de melhor ajuste foi o de Potência, enquanto que na temperatura de 60°C, o modelo de Andrade foi o que melhor se ajustou aos pontos experimentais. No entanto, observou-se, também, que os diversos tipos de envelhecimentos alteraram algumas propriedades, como o módulo de Young.

Palavras-chave

Compósito; fluência; temperatura; envelhecimento em água; envelhecimento em óleo; propriedades mecânicas.

Abstract

Souza, Lucio Rossi de; d'Almeida, José Roberto Moraes (Advisor). **Effects of aging in water and lubricating oil on the creep behavior of polymer matrix composite reinforced with glass fiber.** Rio de Janeiro, 2015. 105p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this work is to verify the consequences of ageing on the creep deformation behavior of a fiberglass composite material, as a function of various combinations of ageing means, ageing times, and test temperatures. For this purpose, samples aged in water and oil, as well as samples not aged at all, were tested to creep deformation at 25°C and 60°C. The results analysis were based on mechanical properties, related to the creep deformation process, obtained both directly from the experiments and from viscoelastic and semi-empirical mathematical models. From all the experimental conditions used on this work, the one that most influenced the creep deformation process was temperature. The effects of temperature on the creeping process, that they were even decisive to select the best fitting model for the experimental data. For the 25°C tests, regardless of ageing mean or time, the mathematical model that best fitted the data was the ‘Power’ model, as for the 60°C tests, the best model to fit the experimental data was ‘Andrade’. However, it was noticed that ageing by itself was also capable of changing some mechanical properties, as Young modulus, for example.

Keywords

Composite; creep; temperature; ageing in water; ageing in oil; mechanical properties.

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Objetivo	17
2. Revisão Bibliográfica	19
2.1. Compósitos	19
2.2. Fluência.....	21
2.2.1. Definição	21
2.2.2. Modelos Matemáticos.....	25
2.2.2.1. Modelo de Maxwell.....	26
2.2.2.2. Modelo de Kelvin-Voigt.....	28
2.2.2.3. Modelo Geral.....	30
2.3. Envelhecimento.....	32
2.3.1. Definição	32
2.3.2. Tipos de Envelhecimento	34
2.3.2.1. Envelhecimento Químico.....	34
2.3.2.2. Envelhecimento Físico	36
2.3.3. Efeito da Água nas Propriedades dos Compósitos	38
2.3.3.1. Degradação da Matriz	40
2.3.3.2. Degradação das Fibras	41
2.4. Fibras de Vidro tipo 'E'.....	41
2.5. Tipos de Ensaios de Fluência em Compósitos.....	44
2.5.1. Ensaio de Ruptura por fluência	44
2.5.2. Ensaio de Fluência a Tensão Constante.....	44
2.5.3. Ensaio de Fluência a Carga Constante	45
3. Materiais e Métodos	46
3.1. Caracterização Inicial do Material	46
3.2. Ensaios de Fluência e Envelhecimento.....	48
3.2.1. Carga do Ensaio de Fluência	56

4. Resultados Experimentais.....	58
4.1. Resultados dos Ensaios de Ruptura	58
4.2. Parâmetros de Comparação	59
4.3. Ajuste dos Pontos Experimentais.....	60
4.3.1. Ajustes Iniciais.....	60
4.3.2. Equações de Ajuste	61
4.4. Comparação das Equações	63
4.5. Avaliação dos Resultados	68
4.5.1. Módulo de Young (E).....	68
4.5.2. Deformação Devido à Fluência Secundária (e_s).....	74
4.5.3. Deformação Devido à Fluência Primária (e_p)	80
4.5.4. Deformação Total (e_t).....	83
4.5.5. Taxa de Fluência (es).....	84
4.5.6. Vida à Fluência (V).....	88
4.5.6.1. Análise Adicional da Vida	92
5. Conclusão	95
6. Sugestões para Trabalhos Futuros	96
7. Referência Bibliográfica	97
Anexo 1	99
Anexo 2	104

Lista de Figuras

Figura 1 - Imagem obtida em microscópio eletrônico de varredura de um material compósito de matriz epóxi com reforço de fibras de carbono.....	21
Figura 2 - Curva esquemática de comportamento à fluência	23
Figura 3 - Sistema Mola-Amortecedor em Série	26
Figura 4 - Comportamento de Fluência - Maxwell.....	28
Figura 5 - Sistema Mola-Amortecedor em Paralelo.....	28
Figura 6 - Comportamento de Deformação - Kelvin-Voigt.....	30
Figura 7 - Sistema Combinado - Maxwell + Kelvin-Voigt.....	31
Figura 8 - Comportamento de Deformação Maxwell + Kelvin-Voigt.....	31
Figura 9 – Esquema de Difusão de Fluido em Polímero	36
Figura 10 - Variação da Temperatura Vítreia em Função do Teor Percentual em Massa de Água Presente no Corpo de Prova [16]	39
Figura 11 - Foto de CPs - Referência de uma Régua Milimetrada.....	46
Figura 12 – Imagem de Microscopia Óptica de Seção Transversal do Material Objeto de Estudo desse Trabalho – Figura Obtida do Item 5 da Referência Bibliográfica.....	47
Figura 13 - Foto da Disposição do CP no Equipamento de Ensaio a Temperatura Ambiente.....	49
Figura 14 - Foto dos CPs em Envelhecimento	51
Figura 15 - Foto do Equipamento para Carregamento dos CPs	53
Figura 16 - Sistema de Suporte e Aquecimento dos CPs	54
Figura 17 – Foto do Sistema de Aquisição de Dados	55
Figura 18 - Resultado dos Ensaios de Flexão até Ruptura	58
Figura 19 – Representação gráfica dos parâmetros investigados.....	60
Figura 20 - Exemplo de Gráfico para Determinação de Deformação Elástica - CP 22	64
Figura 21 – Valores Calculados de Módulo de Young - Todos os CPs - Temp. Ambiente	69

Figura 22 - Valores Calculados de Módulo de Young - todos os CPs - 60°C	69
Figura 23 - Valores Médios de Módulo de Young Calculados para cada Grupo de Envelhecimento, com Barras de Desvio Padrão - Temperatura Ambiente	70
Figura 24 - Valores Médios de Módulo de Young Calculados para cada Grupo de Envelhecimento, com Barras de Desvio Padrão – 60°C	71
Figura 25 – Valores de Módulo de Young Médio Calculados para cada Grupo de Envelhecimento, com Barras de Desvio Padrão – Todos os CPs.....	73
Figura 26 – Valores Médios de Deformação devido à Fluência Secundária, com Barras de Desvio Padrão - Temperatura Ambiente	75
Figura 27 – Valores Médios de Deformação devido à Fluência Secundária, com Barras de Desvio Padrão - 60°C	75
Figura 28 – Valores Médios de Deformação Devido à Fluência Secundária - Todos os CPs.....	79
Figura 29 – Valores Médios de Deformação Devido à Fluência Primária (e_p), com Barras de Desvio Padrão - Temperatura Ambiente	80
Figura 30 – Valores Médios de Deformação devido à Fluência Primária (e_p), com Barras de Desvio Padrão – 60°C.....	81
Figura 31 – Valores Médios de Deformação devido à Fluência Primária (e_p), com Barras de Desvio Padrão - Todos os CPs	81
Figura 32 – Gráfico Esquemático de Velocidades Diferentes da Variação da Taxa de Deformação em Função da Temperatura de Ensaio.....	82
Figura 33 - Valores Médios de Deformação Total (e_t) nos Ensaios de 8 Horas de Duração, com Barras de Desvio Padrão - Todos os CPs.....	83
Figura 34 – Valores Médio de Taxa de Fluência (e_s), com Barras de Desvio Padrão – Temperatura Ambiente	85
Figura 35 - Valores Médio de Taxa de Fluência (e_s), com Barras de Desvio Padrão – 60°C.....	86
Figura 36 - Valores Médio de Taxa de Fluência (e_s) – Todos os CPs	87

Figura 37 – Valores Médios da Vida Calculada, com Barras de Desvio Padrão - Temperatura Ambiente	89
Figura 38 - – Valores Médios da Vida Calculada, com Barras de Desvio Padrão - 60°C.....	91
Figura 39 – Valores Médios da Vida Calculada - Todos os CPs.....	92
Figura 40 – Gráfico de Deformação (%) x Tempo[s] do ensaio de 129,5h....	94
Figura 41 – Gráfico Viscosidade x Temperatura de alguns Fluidos	104
Figura 42 – Gráfico Viscosidade x Temperatura de alguns Vidros [17].....	105

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades Típicas de algumas Fibras Comuns.....	43
Tabela 2 - Propriedades Típicas das Fibras de Vidro Tipo 'E' [18].....	43
Tabela 3 - Propriedades Típicas da Resina Poliéster. [5]	47
Tabela 4 - Descrição dos Tipos de Envelhecimentos e Ensaios	50
Tabela 5 – Descrição dos Materiais Utilizados nos Experimentos	55
Tabela 6 - Resultados Calculados de Tensão e Deformação dos Ensaios de Ruptura	59
Tabela 7 - Exemplo de Comparação do Ajuste das Equações - Temperatura Ambiente - Água 14.....	66
Tabela 8 - Exemplo de Comparação do Ajuste das Equações - Temperatura 60°C - Água 14.....	67
Tabela 9 – Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – Temperatura Ambiente	99
Tabela 10 - Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – Temperatura Ambiente	100
Tabela 11 Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – Temperatura Ambiente	101
Tabela 12 - Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – 60°C	101
Tabela 13 - Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – 60°C	102
Tabela 14 - Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – 60°C	103

Um homem precisa viajar. Por sua conta, não por meio de histórias, imagens, livros ou TV. Precisa viajar por si, com seus olhos e pés, para entender o que é seu. Para um dia plantar as suas próprias árvores e dar-lhes valor. Conhecer o frio para desfrutar o calor. E o oposto. Sentir a distância e o desabrigo para estar bem sob o próprio teto. Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é ou pode ser. Que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver.

Amyr Klink

1. Introdução

Compósitos de matriz polimérica têm sido cada vez mais utilizados em uma vasta gama de aplicações por todas as áreas da engenharia. São usados em todos os níveis de criticidade de projeto e muitas vezes em ambientes agressivos, por longos períodos de tempo. Assim, deve-se garantir a manutenção das suas propriedades ao longo de toda a vida do equipamento. Como consequência disso, há uma crescente necessidade de que se seja capaz de prever o comportamento desses materiais até o final de seu emprego, especialmente nos casos em que uma inspeção é difícil ou onde uma falha seria catastrófica. Esse é o caso de equipamentos submarinos, por exemplo, que em sua maioria são utilizados por períodos de até 20 anos sem que haja sequer inspeção visual. Isso se deve ao fato da dificuldade de acesso e dos altos custos de intervenção. Em casos de grandes estruturas, como é o caso da indústria de aeronaves, construção civil e da própria indústria de óleo e gás, é comum as empresas não guardarem peças sobressalentes, uma vez que são muito caras e requerem grande espaço de armazenagem.

Essas estruturas podem estar sujeitas tanto a carregamentos variáveis quanto a carregamentos estáticos. Para elementos que estejam sujeitos a carregamentos dinâmicos, como eixos de transmissão de torque, é importante verificar se a tensão máxima a que estão submetidos é menor que a resistência ao escoamento. Além disso, também deve ser verificado se a tensão está abaixo do limite de fadiga, pois mesmo sob tensões abaixo da resistência ao escoamento do material, a peça pode falhar por fadiga.

O mesmo tipo de raciocínio aplica-se a carregamentos estáticos. Elementos como vigas de um prédio, por exemplo, que estão basicamente sob carregamento estático, ou seja, cuja flutuação do carregamento é muito pequena se comparada ao valor nominal do carregamento, também devem ser projetados pensando em dois aspectos básicos. A tensão máxima aplicada não deve exceder a resistência ao escoamento do material, e essa carga também deve ser

baixa o suficiente para não provocar fluência no material, ou que pelo menos a fluência seja lenta de modo a permitir uma vida suficientemente longa da peça.

Esse é o caso de tubulações. Essas são estruturas que normalmente estão sujeitas a carregamentos advindos de pressão interna que não variam no tempo ou apresentam carregamento cuja variação é em frequência tão baixa que pode basicamente ser considerado estático. O efeito da fluência deve ser levado em consideração principalmente quando se tratam de cargas baixas, se comparadas à resistência ao escoamento do material, e quando se tem tempos de operação longos. Isso porque a falha em curto prazo é menos provável, e porque em longos períodos de operação a fluência ocorre de maneira mais significativa.

Equipamentos submarinos, por exemplo, geralmente operam por anos após a instalação sem inspeção ou intervenção pelo simples fato do acesso ser muito difícil, o que torna a operação demorada e, principalmente, muito cara. Nesses casos, mesmo que a pressão seja baixa e conseqüentemente as tensões estejam abaixo da resistência ao escoamento, o equipamento pode sofrer fluência e eventualmente atingir a ruptura. O material se deforma de maneira permanente e com isso perde seção resistente, o que aumenta ainda mais a tensão e mais rapidamente ocorre a fluência. Esse processo funciona como retroalimentação positiva até o momento que a peça tem sua funcionalidade cessada.

Para o caso de tubulações esse processo é ainda mais intenso, visto que a fluência em um tubo sob pressão interna causa, não só a redução na espessura da parede, como também o aumento no diâmetro interno. Isso porque à medida que a pressão interna gera deformações no sentido de aumentar o diâmetro, há um alongamento da parede no sentido circunferencial e, por efeito de Poisson, as paredes têm sua dimensão reduzida no sentido radial.

O aumento de tensão pode ser verificado pela equação de tensão circunferencial em tubos de parede fina ($D \geq 10. t$). [12]

$$\sigma = \frac{P. D}{2. t} \quad (1)$$

Onde,

σ – tensão circunferencial

P – Pressão manométrica interna no tubo

D – Diâmetro externo do tubo

t – espessura do tubo

Portanto, de acordo com a equação de tensão em vasos de pressão de parede fina (Equação 1) tem-se que a tensão aumenta tanto com o aumento do diâmetro quanto com a redução da espessura da parede. Supondo um tubo inicialmente com diâmetro interno 100 mm e espessura de parede de 10 mm, e que em determinado momento fique com 105 mm de diâmetro interno e por conservação de massa com espessura de parede 4,78 mm, tem-se que a tensão sofreria um aumento de aproximadamente 9%. Esse aumento na tensão causaria um aumento na taxa de fluência, de maneira que o processo é acelerado cada vez mais até a falha do material.

A fluência é particularmente importante em materiais como polímeros e materiais amorfos como o vidro, portanto materiais compósitos, no caso polímero reforçado por fibras de vidro, também estão sujeitos a fluência.

1.1. Objetivo

A presente Dissertação de Mestrado apresenta análises quantitativas e qualitativas, dados experimentais e resultados, dentro do trabalho de tema: “Efeitos do envelhecimento em água e óleo lubrificante sobre o comportamento à fluência de material compósito de matriz polimérica reforçada por fibra de vidro”.

O objetivo é expor as diversas análises que foram feitas a partir de ensaios mecânicos, que permitiram gerar conclusões a respeito da influência dos diversos tipos de envelhecimento e condições de ensaio no comportamento à fluência do material.

Os objetivos discriminadamente são:

- Analisar comparativamente o módulo de Young do material e relacionar tanto ao tipo quanto ao tempo de envelhecimento, à temperatura de ensaio e à micromecânica.
- Analisar comparativamente a deformação sofrida pelo material no período primário de fluência e relacionar tanto ao tipo quanto ao tempo de envelhecimento, à temperatura de ensaio e à micromecânica.
- Analisar comparativamente a deformação sofrida pelo material no período secundário de fluência e relacionar tanto ao tipo quanto ao tempo de envelhecimento, à temperatura de ensaio e à micromecânica.
- Analisar comparativamente a taxa de fluência sofrida pelo material e relacionar tanto ao tipo quanto ao tempo de envelhecimento, à temperatura de ensaio e à micromecânica.
- Analisar comparativamente a vida calculada para o material no período primário de fluência e relacionar tanto ao tipo quanto ao tempo de envelhecimento, à temperatura de ensaio e à micromecânica.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Compósitos

Compósitos são materiais formados pela união de dois ou mais outros materiais e que apresentam uma superfície bem definida de interface entre esses materiais constituintes. O propósito da fabricação de um material compósito é a obtenção de um novo material, com propriedades e comportamento mecânico superiores aos apresentados pelos materiais constituintes individualmente.

Os materiais compósitos se diferenciam por:

- Tipos de materiais constituintes;
- Proporção Matriz / Reforço;
- Geometria da fase de reforço;
- Orientação da fase de reforço;
- Distribuição da fase de reforço na fase matriz.

A fase chamada matriz é normalmente a porção de maior quantidade presente no material, e é a região que envolve e promove a coesão da fase de reforço. A matriz apresenta as propriedades mecânicas de interesse menores.

A fase de reforço está normalmente em menor proporção. Suas propriedades mecânicas são maiores que as da matriz, e é a fase que promove alta resistência mecânica ao compósito. O reforço se apresenta com três geometrias possíveis, que são [1]:

- Particulado – As três dimensões possuem valores semelhantes
- Fibras curtas – Uma das dimensões é aproximadamente 4 ordens de grandeza maior que as outras duas.
- Fibras longas – Uma das dimensões é mais de 5 ordens de grandeza maior que as outras duas.

Os materiais constituintes, tanto da matriz quanto do reforço, podem ser o metal, o polímero ou a cerâmica. E qualquer combinação de dois ou dos três materiais compõe um material compósito.

As propriedades mecânicas do material compósito são diretamente relacionadas à quantidade de reforço. Quanto maior a fração de reforço, mais as propriedades do compósito se aproximam das do reforço, portanto maiores são a rigidez e a resistência à ruptura desse compósito.

No entanto, a quantidade de reforço só pode ser incrementada até um certo ponto, em que falta espaço para as fibras e essas passam a se tocar. Dessa maneira são gerados pontos com falta da fase matriz na região de contato das fibras e, assim, perde-se a capacidade de transmissão de tensão no interior do material. Esse processo reduz a resistência do material.

Vale também observar que um aumento indiscriminado da fração de fibras promove aumento da massa total do compósito, além de um custo mais elevado, visto que tanto a matéria prima quanto o processo de fabricação do reforço são geralmente mais custosos.

Quando se trata de reforço com geometria de fibras curtas ou fibras longas, a orientação das fibras em relação ao carregamento deve ser levada em consideração.

Em ambos os casos a maior resistência à tração do compósito se dá quando as fibras estão na mesma direção do carregamento. No caso das fibras longas, é comum o uso do conceito de laminados. Lâminas de compósito de fibras longas unidirecionais são empilhadas com direção relativa entre as lâminas de maneira que haja fibras orientadas para todas as direções possíveis de solicitação do material. Fibras curtas são geralmente usadas de maneira a apresentarem orientação aleatória, porém dentro do mesmo plano, no compósito. Isso gera um material que no plano em que as fibras estão dispostas, é isotrópico.

Um controle de distribuição das fibras na matriz pode ser feito com o propósito de otimizar a relação propriedades mecânicas/quantidade de fibras. Por exemplo, uma maior quantidade de fibras pode ser usada em regiões de maior tensão. Outra possibilidade seria de se garantir uma homogeneidade da distribuição das fibras na matriz, quando é o caso de as cargas estarem uniformemente distribuídas na seção do material. De uma forma ou de outra o controle de distribuição do reforço na matriz é

importante para que se possa prever e controlar as propriedades mecânicas do compósito.

Na Figura 1, um exemplo de material compósito.

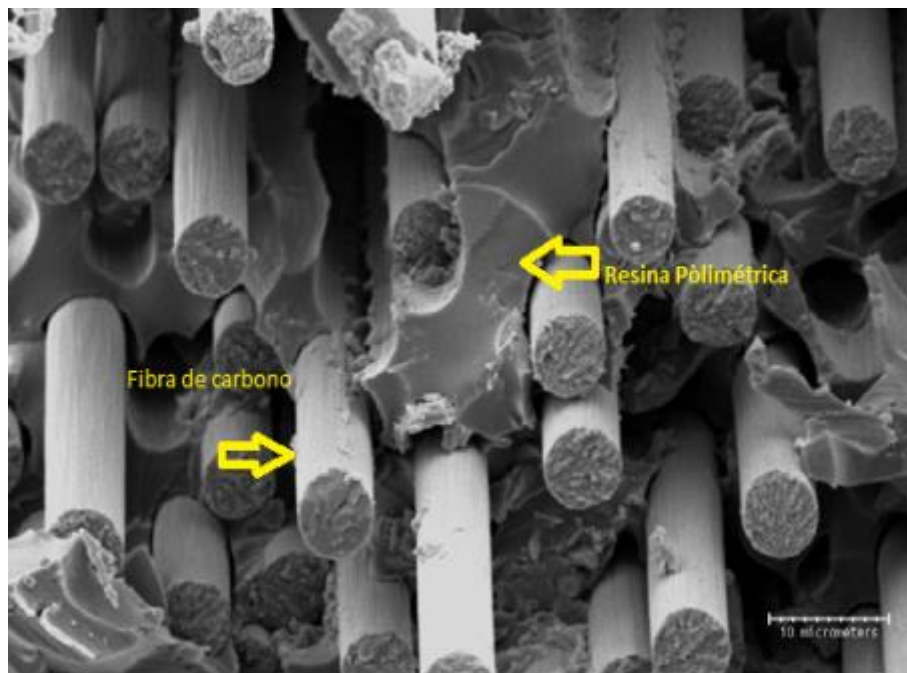


Figura 1 - Imagem obtida em microscópio eletrônico de varredura de um material compósito de matriz epóxi com reforço de fibras de carbono

Na Figura 1 observa-se um material compósito de matriz epóxi, que é a fase contínua, reforçada por fibras de carbono. Como pode ser notado, as fibras de carbono estão todas alinhadas na mesma direção, e possuem diâmetro de aproximadamente $5\mu\text{m}$.

2.2. Fluência

2.2.1. Definição

Fluência é um fenômeno caracterizado por uma deformação contínua de um material quando submetido a uma tensão estática e menor que o limite de escoamento. Esse fenômeno é normalmente associado a altas temperaturas, porém também ocorre à temperatura ambiente ou abaixo, dependendo de outros parâmetros como carga aplicada, tipo de material e tempo de sollicitação.

Polímeros apresentam comportamento altamente sensível à taxa de deformação. Para altas taxas de deformação, o comportamento é de um corpo rígido, já para taxas de deformação mais baixas, tem-se um comportamento visco-elástico. Vale ressaltar que os valores de taxa de deformação alta e baixa são dependentes do material e da temperatura. O processo de fluência sugere, em geral, baixas taxas de deformação. Dessa maneira, tem-se que a porção viscosa é importante no comportamento à deformação do polímero, portanto a fluência é um fenômeno que pode ser observado com grande intensidade em polímeros.

Nota-se que esse evento não ocorre de maneira instantânea, mas sim, de modo lento e contínuo. Então este é um fenômeno diretamente dependente do tempo. Para tempos pequenos a deformação devido à fluência pode ser desprezada, porém o material tende a se deformar indefinidamente enquanto estiver submetido ao carregamento.

Outro parâmetro de extrema importância para as propriedades mecânicas de um polímero é a temperatura. Quanto maior a temperatura, e mantidas as demais condições, maior a taxa de deformação em fluência. A temperatura, por definição, é a medida da energia cinética média das partículas de uma substância, portanto, quanto maior a temperatura, mais as macromoléculas do polímero vibram, então a energia disponível para rompimento das ligações é maior e mais deformação plástica tende a ocorrer. [1]

Se a energia fornecida ao material, seja por meio de trabalho mecânico, seja por aporte de calor, ou mesmo uma combinação dos dois, for maior que a energia de ligação entre os átomos, então essa ligação será rompida.

A taxa de deformação em função do tempo devido à fluência, também chamada de taxa de fluência, não é constante ao longo de todo o evento. Essa taxa segue um padrão de curva esquematizado na figura 2.

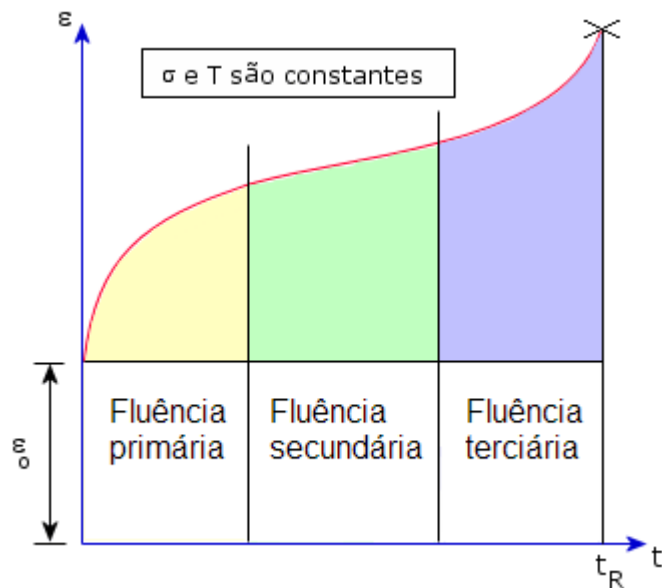


Figura 2 - Curva esquemática de comportamento à fluência

Em que:

ϵ = Deformação

t = Tempo

T = Temperatura

σ = Tensão

ϵ_0 = Deformação elástica

t_R = Tempo de ruptura

O comportamento da deformação do material durante o período em que tensão aplicada é mantida constante segue o seguinte padrão:

i) Fluência Primária ou Transiente

A primeira observação que se pode fazer é na presença de ϵ_0 , que é a deformação instantânea devido apenas à porção elástica do comportamento do material.

Em seguida nota-se que a taxa de deformação é inicialmente alta e tende a diminuir. Nessa região transiente, o material apresenta um aumento da resistência à fluência. Ou seja, há mecanismos de aumento de resistência devido à deformação que competem com a própria deformação, portanto, quanto mais se deforma o material, maior a resistência. Os motivos para isso dependem do material em questão. Para metais, por exemplo, há a geração de discordância devido à deformação plástica. Essas discordâncias interagem entre si e também com contornos de grão, dificultando a deformação. Para polímeros, o mesmo conceito pode ser aplicado. Defeitos são gerados conforme o material é deformado, e esses defeitos interagem entre si, dificultando a deformação [1]. Dessa maneira, quanto mais o material sofre deformação, mais defeitos são gerados e, portanto, maior a probabilidade de interação entre esses defeitos. Assim, a resistência ao escoamento do material aumenta cada vez mais, corroborando para o conceito de que a taxa de deformação decresce com o tempo. Após essa sequência de eventos o material entra em um comportamento de deformação basicamente linear conforme indicado na região secundária da figura 2.

ii) Fluência Secundária

É caracterizada por apresentar uma taxa de fluência constante e a menor taxa de fluência do processo. A taxa de deformação não apresenta variações porque a organização da estrutura de macromoléculas não sofre mais grandes transformações, e essencialmente ligações primárias são rompidas. Assim, tem-se uma taxa de deformação baixa e constante no tempo teoricamente até a ruptura [1].

Em materiais metálicos essa estabilização na taxa de deformação está associada ao fato de a taxa de encruamento se igualar à taxa de recristalização, portanto não há aumento ou diminuição da resistência do material [1].

A região secundária é a que apresenta maior duração, e também por ter um comportamento linear, é usada para o cálculo e determinação da taxa de fluência, que é dada pela equação (2), que é a definição de taxa de fluência.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde,

$\Delta\varepsilon$ – variação de deformação em um determinado período de tempo

Δt – período de tempo usado para aquisição de $\Delta\varepsilon$

A taxa de deformação varia em função da temperatura e da tensão aplicada, e pode ser escrita matematicamente pela equação (3) [1].

$$\dot{\varepsilon} = K \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q_f}{R.T}\right) \quad (3)$$

Onde,

K, n e Q_f = constantes do material.

R = constante universal dos gases.

T = Temperatura

σ = Tensão aplicada ao material

iii) Fluência Terciária

Um terceiro intervalo de variação na taxa de deformação pode ser muitas vezes observado. Essa região é caracterizada pelo aumento na taxa de deformação. Porém, esse fenômeno se deve à estricção do material. Testes de fluência são realizados de maneira a manter constante a carga aplicada no corpo. Conforme o material sofre estricção e conseqüentemente tem sua seção transversal reduzida, a tensão atuante na área em questão aumenta, fazendo com que a deformação seja mais intensa. Portanto, como o parâmetro ‘tensão’ está variando ao longo do estágio terciário, esse intervalo usualmente não é utilizado para fins de cálculos [1].

2.2.2. Modelos Matemáticos

As equações usadas para modelar o comportamento de materiais viscoelásticos se baseiam em elementos mecânicos combinados. São eles:

- Mola - que obedece à lei de Hooke e representa a porção elástica do comportamento do material. E cuja equação relaciona tensão e deformação através da rigidez, e é dada por [1]:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (4)$$

- Amortecedor – que obedece à lei de Newton da viscosidade linear e representa a porção viscosa do comportamento do material. E cuja equação relaciona tensão e deformação através da viscosidade, e é dada por [1]:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (5)$$

Em que:

γ - Deformação Cisalhante

$\dot{\gamma}$ – Taxa de Deformação Cisalhante

G - Módulo de Cisalhamento

τ - Tensão Cisalhante

η - Viscosidade

2.2.2.1. Modelo de Maxwell

Maxwell considera que o modelo que descreve o comportamento viscoelástico é o de uma mola em série com um amortecedor, como é exemplificado na Figura 3.

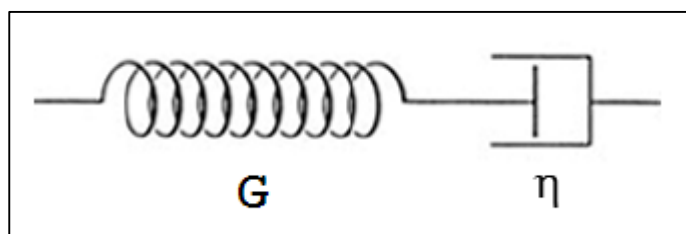


Figura 3 - Sistema Mola-Amortecedor em Série

A equação fundamental do modelo de Maxwell é dada por [2]:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} \quad (6)$$

Onde,

γ - Deformação Cisalhante

G - Módulo de Cisalhamento

τ - Tensão Cisalhante

η - Viscosidade

t - Tempo

Integrando a equação fundamental de $t = 0$ até $t = t$, e considerando a condição de contorno de tensão constante ($\tau = \tau_0 = cte$), tem-se a equação de fluência para um elemento de Maxwell:

$$\begin{aligned} \int_0^t \frac{d\gamma}{dt} dt &= \int_0^t \frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau_0}{dt} dt + \int_0^t \frac{\tau_0}{\eta} dt \\ \int_0^t \frac{d\gamma}{dt} dt &= 0 + \int_0^t \frac{\tau_0}{\eta} dt \\ \gamma(t) - \gamma(0) &= \frac{\tau_0}{\eta} \cdot t \\ \gamma(t) &= \gamma(0) + \frac{\tau_0}{\eta} \cdot t \\ \gamma(t) &= \frac{\tau_0}{G} + \frac{\tau_0}{\eta} \cdot t \end{aligned} \quad (7)$$

Graficamente:

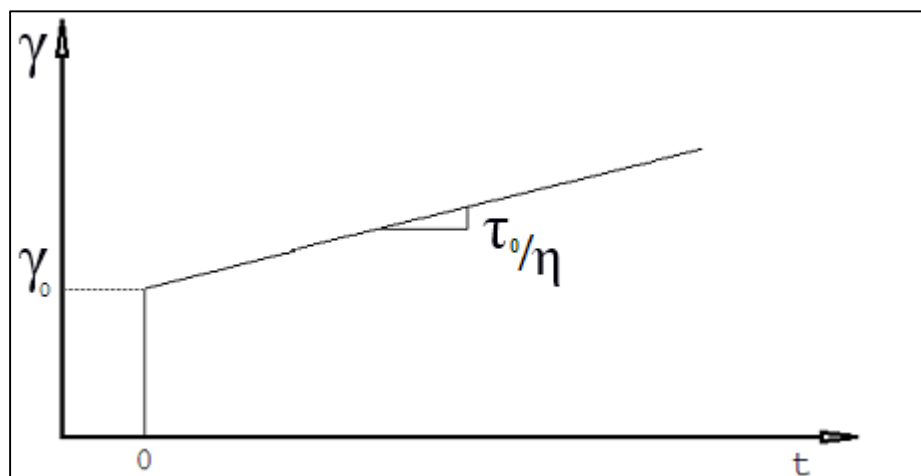


Figura 4 - Comportamento de Fluência - Maxwell

O modelo de Maxwell prevê, então, que o material apresenta uma deformação inicial instantânea elástica e, após isso, se deforma indefinidamente e de maneira linear ao longo do tempo.

2.2.2.2. Modelo de Kelvin-Voigt

Esse modelo considera que o sistema que descreve o comportamento viscoelástico é o de uma mola em paralelo com um amortecedor, como exemplificado na Figura 5.

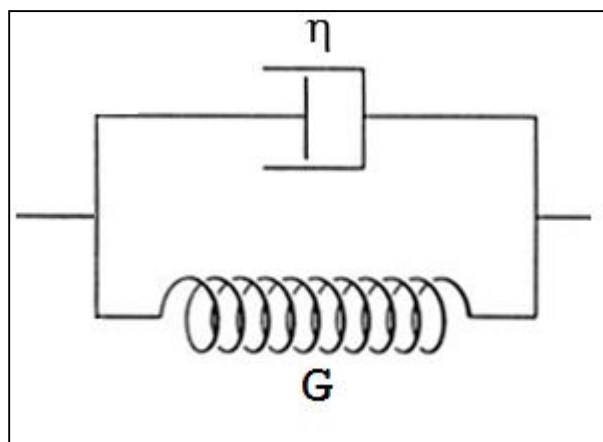


Figura 5 - Sistema Mola-Amortecedor em Paralelo

A equação fundamental do modelo de Kelvin-Voigt é dada por [2]:

$$\tau = G \cdot \gamma + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (8)$$

Onde,

τ – Tensão Cisalhante

γ - Deformação Cisalhante

G - Módulo de Cisalhamento

η - Viscosidade

t - Tempo

De (9) considerando que a tensão é constante ($\tau = \tau_0 = \text{cte}$) tem-se:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\tau}{\eta} - \frac{G \cdot \gamma}{\eta}$$

Cuja solução é:

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} + B \cdot e^{-(G/\eta) \cdot t}$$

Onde,

B – Constante do Material

Novamente a condição de contorno do processo de fluência é de tensão constante. E fazendo a consideração de deformação nula para variações bruscas de tensão no amortecedor, tem-se em $t=0$:

$$0 = \frac{\tau_0}{G} + B$$

$$B = -\frac{\tau_0}{G}$$

Portanto, a equação de deformação segundo o modelo Kelvin-Voigt se torna:

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} \cdot \left(1 - e^{-(G/\eta) \cdot t}\right) \quad (9)$$

O comportamento da deformação ao longo do tempo, segundo o modelo de Kelvin-Voigt, é exponencial e tende ao valor da deformação elástica, dada por $\gamma_\infty = \frac{\tau_0}{G}$.

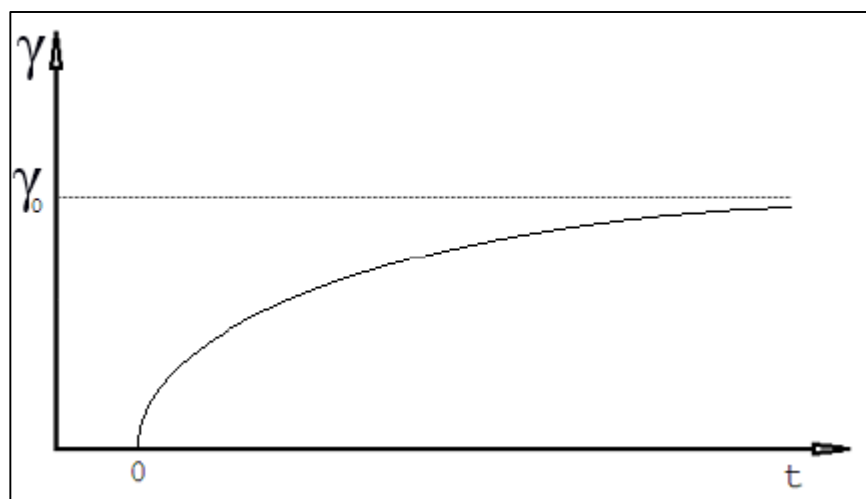


Figura 6 - Comportamento de Deformação - Kelvin-Voigt

2.2.2.3. Modelo Geral

Os modelos de Maxwell e Kelvin-Voigt, para a maioria das situações, não devem ser usados isoladamente, visto que, independentemente, não são realmente capazes de ajustar o comportamento de todos os materiais poliméricos, considerando-se todas as diferentes composições, e parâmetros circunstanciais, como temperatura e umidade. Assim, esses modelos devem ser combinados convenientemente de maneira a abranger o comportamento observado.

O conjunto combinado Maxwell + Kelvin-Voigt, em geral, é composto por 1 sistema Maxwell em série com 1 ou mais sistemas Kelvin-Voigt, como exemplificado na Figura 7.

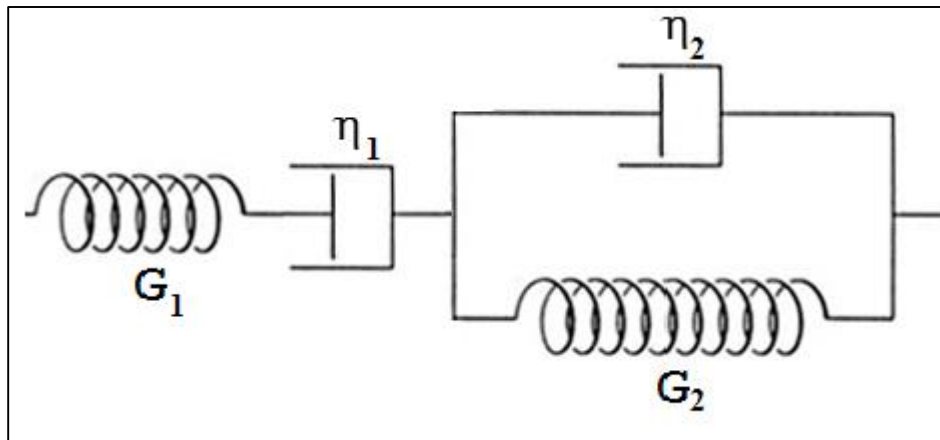


Figura 7 - Sistema Combinado - Maxwell + Kelvin-Voigt

A combinação desses sistemas permite que haja uma deformação inicial instantânea devido à mola em série, ao mesmo tempo que modela uma deformação decrescente no início, típico da região primária da fluência. Isso aproxima o modelo do comportamento real esperado dos materiais poliméricos. Os parâmetros de rigidez das molas e viscosidade dos amortecedores deve ser ajustado conforme necessidade. Bem como a quantidade de sistemas Kelvin-Voigt a serem usados em série.

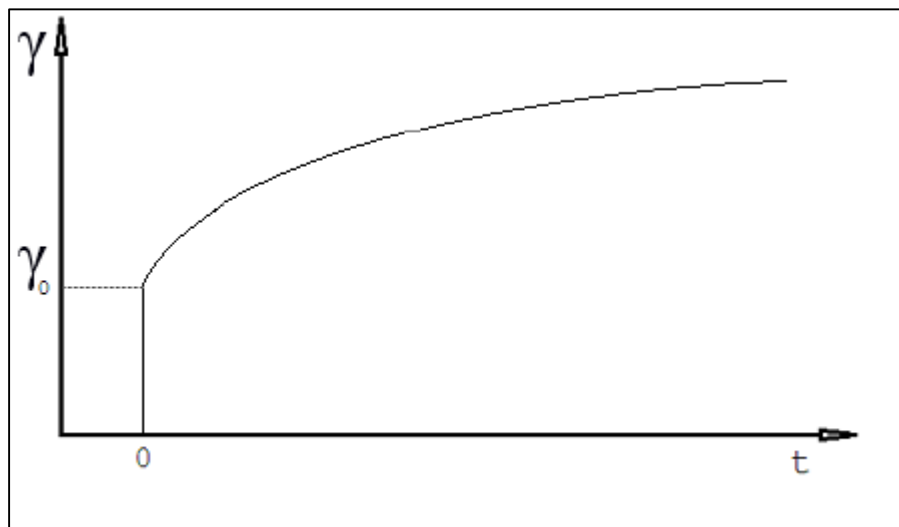


Figura 8 - Comportamento de Deformação Maxwell + Kelvin-Voigt

A equação geral de deformação para um sistema Maxwell + Kelvin-Voigt (equação de 4 parâmetros) é a soma das equações individuais [2]:

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G_1} + \frac{\tau_0 \cdot t}{\eta_1} + \sum_{i=2}^n \left(\frac{\tau_0}{G_i} \left(1 - e^{-t/\lambda_i} \right) \right) \quad (10)$$

Onde,

τ_0 – Tensão Cisalhante

γ - Deformação Cisalhante

G_1 - Módulo de Cisalhamento do componente de Maxwell

G_i - Módulo de Cisalhamento do componente ‘i’ de Kelvin-Voigt

η_1 – Viscosidade do componente de Maxwell

t – Tempo

2.3. Envelhecimento

2.3.1. Definição

O envelhecimento de um material é um processo causado pela interação com o meio que o cerca. Essa interação pode causar alterações ao nível microscópico e/ou macroscópico na estrutura do material. Geralmente é associado a uma degradação das propriedades desse material, embora haja casos em que o envelhecimento seja usado como tratamento para melhorar alguma propriedade. Em aços, por exemplo, o envelhecimento é utilizado para reduzir tensões residuais decorrentes de processos de fabricação ou de tratamentos térmicos a que o material tenha sido submetido. Nesse caso o processo também é conhecido como recozimento térmico, e consiste em levar o material a uma temperatura alta, porém ainda muito abaixo da temperatura de fusão, e manter nessa condição por um longo período. Esse procedimento permite que haja maior mobilidade dos átomos e, conseqüentemente, reorganização cristalina de maneira acelerada [1].

Fatores como temperatura, presença de certas substâncias (i.e. solventes, óleos e água) e radiação são diretamente ligados ao processo de envelhecimento.

O processo de envelhecimento altera características ao nível molecular do material, tais como a composição ou a estrutura molecular, e isso tem como consequência mudanças nas propriedades físicas do material, sejam elas mecânicas, elétricas, térmicas ou químicas.

Portanto, estudar o envelhecimento se faz necessário como maneira de prever eventuais alterações nas propriedades dos materiais e, com isso, conseguir estimar o tempo de vida de equipamentos sujeitos a envelhecimento, ou até mesmo prevenir que o envelhecimento ocorra.

Nesse trabalho trataremos apenas de envelhecimento relacionado a polímeros.

Alterações irreversíveis das propriedades dos compósitos de matriz polimérica podem ser geradas por uma grande variedade de fatores, atuantes de maneira isolada ou combinada. Os principais agentes de deterioração:

- Térmico
 - Estático (aquecimento ou superresfriamento)
 - Cíclico
- Umidade
- Imersão completa em água (tanto em temperatura ambiente quanto a temperaturas elevadas)
- Ciclos de congelamento e degelo
- Imersão completa ou contato por spray de água salgada
- Erosão por material abrasivo (chuva, correnteza, areia)
- Degradação química (água, combustível, ácido, base, solvente, oxigênio)
- Ultravioleta ou outra radiação de alta energia
- Tensão elétrica
- Ataque de micro-organismos (fungos e bactérias)

A combinação de dois ou mais agentes de degradação em geral funciona como um acelerador da degradação (e.g. umidade e temperatura). Nesse caso a alta temperatura promove uma maior taxa de absorção de água, assim o material se degrada

de maneira mais intensa que se estivesse exposto aos mesmos agentes, porém de maneira não simultânea.

Quantificar a participação de cada um dos agentes depende dos agentes envolvidos e dos níveis de interação que tiveram com o material.

2.3.2. Tipos de Envelhecimento

Há dois meios de ação para um processo envelhecedor. O primeiro age quimicamente sobre o material afetando a estrutura molecular e é chamado de envelhecimento químico. O segundo não afeta a estrutura das moléculas apesar de agir também ao nível molecular, esse é chamado envelhecimento físico.

2.3.2.1. Envelhecimento Químico

- Oxidação – Modernamente o termo oxidação significa perder elétrons, ou ainda aumento da reatividade, não necessariamente em presença de oxigênio. No entanto, a oxidação por meio da reação do material com o oxigênio é muito frequente, dado que em geral há contato desse material com o ar, que possui grande quantidade de oxigênio. Em geral ocorre devido a algum centro reativo previamente existente na molécula, porém, a reação pode ocorrer mesmo sem a presença desse ponto reativo, dependendo de outras condições como temperatura e composição do material. Normalmente em polímeros o ponto reativo surge da quebra da ligação de um átomo da cadeia principal com outro de um radical, devido à temperatura. O processo de oxidação tem a característica importante de ser auto catalítico. Isso significa que à medida que pontos reativos são oxidados, mais pontos reativos são gerados, o que aumenta cada vez mais a velocidade da reação de oxidação. Para o caso específico dos termoplásticos, as consequências para as propriedades mecânicas da oxidação e do rompimento das ligações da cadeia principal com ramificações, são a formação de ligações duplas ao longo da cadeia principal e o resultante aumento da rigidez e da fragilidade do material [3].

- Degradação Térmica – A temperatura é um dos parâmetros de operação com maior importância nas alterações das propriedades mecânicas dos materiais. Toda ligação química possui uma energia associada. Caso a temperatura forneça uma energia maior que a energia de ligação dos átomos, essa ligação será quebrada. Esse processo coloca o material mais suscetível à oxidação pela formação de pontos reativos nas ramificações. Portanto, além de ter a capacidade de degradar o material, a temperatura é um catalizador de outros processos, como a oxidação [3].
- Degradação Eletromagnética – As ondas eletromagnéticas possuem uma quantidade de energia associada, e a relação entre energia e frequência da onda é dada pela lei de Planck, na forma: [1,19]

$$E = h \cdot \nu \quad (11)$$

Onde:

E – Energia

h – constante de Planck = $6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s

ν – frequência da radiação

Muito parecido com o efeito da temperatura, a ligação é rompida caso a energia fornecida pela radiação eletromagnética seja maior que a de ligação dos átomos. Além de ter a capacidade de degradar o material, a radiação é um catalizador de outros processos, como a oxidação. No caso da radiação ultravioleta, a frequência é da ordem de 10^{16} Hz. Dessa maneira a energia da radiação é de aproximadamente $7 \cdot 10^{-18}$ J. Uma ligação simples entre dois carbonos possui aproximadamente $6 \cdot 10^{-19}$ J. Assim, é possível notar que, ao menos em alguns casos, a radiação ultravioleta é capaz de romper ligações entre átomos de carbono.

- **Degradação Biológica**

Degradação biológica é um tipo de degradação química, e não é uma forma comum de degradação para a maioria dos polímeros utilizados comercialmente, já que, em sua maioria, são resistentes a ataques microbiológico. Os únicos casos conhecidos de perda de propriedades por degradação biológica são em alguns poliuretanos e alguns aditivos em PVC [3]. Não há nenhuma técnica desenvolvida de predição da vida devido a degradação biológica em polímeros. No entanto há um crescente interesse no desenvolvimento de materiais propositalmente biodegradáveis, com finalidade médica ou de produção de recipientes descartáveis. Vale observar que a degradação biológica se dá por meio químico e, portanto, não deve ser considerado um terceiro tipo de degradação.

2.3.2.2. Envelhecimento Físico

- Difusão de fluido é o principal meio de envelhecimento físico. Em polímeros isso é bastante comum uma vez que são permeáveis a diversos fluidos. O processo de difusão se dá quando as moléculas do fluido permeiam as macromoléculas do polímero (figura 9).

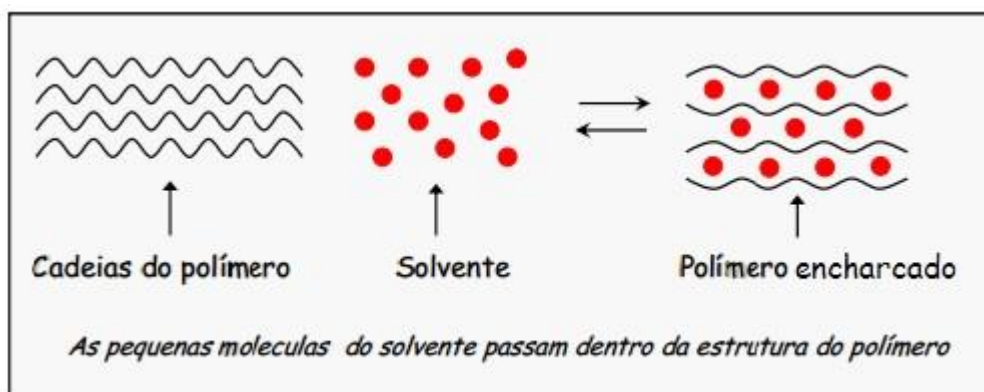


Figura 9 – Esquema de Difusão de Fluido em Polímero

Ao processo de difusão de um fluido entre as cadeias poliméricas com efeito de redução de propriedades mecânicas se dá o nome de plastificação. A plastificação do material polimérico ocorre quando há difusão de alguma substância de baixa massa

molecular no polímero. Essas moléculas ocupam espaço entre as cadeias principais do polímero, e esse evento tem dois efeitos notáveis:

- Primeiramente há um afastamento das cadeias do polímero, devido meramente ao fato de que há novas moléculas inseridas nessa região. Esse efeito rompe ligações secundárias entre cadeias.
- Por possuírem baixa massa molecular e normalmente serem polares, essas moléculas tendem a se ligar quimicamente às macromoléculas, o que promove ainda mais degradação das ligações das cadeias.

A plastificação permite uma maior mobilidade relativa entre cadeias do polímero, o que caracteriza deformações plásticas no material, e aumenta também a mobilidade dos átomos dentro da própria cadeia. Ou seja, os átomos podem se distanciar ou aproximar com maior facilidade. Quando isso ocorre sem que haja rompimento de ligações, caracteriza-se a deformação elástica.

A difusão do solvente no polímero depende de alguns fatores:

- Afinidade Química – Algumas combinações de polímeros e solventes não tendem a permitir difusão, enquanto outras combinações permitem. Essa afinidade é resultado da variação do potencial químico ($\Delta\mu$) e da variação da energia livre de mistura (ΔG). Quanto maior essas variações, maior a tendência de interação entre as duas substâncias [15].
- Morfologia do Polímero – Como as moléculas do fluido têm que se difundir no espaço intermolecular do polímero, quanto mais espaço, mais facilmente a difusão ocorrerá. Portanto, levando em consideração o grau de cristalinidade do polímero, quanto maior a cristalinidade, menor a difusão. E em termos de reticulação, quanto maior o grau de reticulação, menor a difusão.
- Taticidade – A taticidade diz respeito ao posicionamento dos radicais em relação à cadeia principal. O material polimérico pode ser classificado quanto à taticidade em:
 - Isotático – Todos os radicais dispostos no mesmo lado da cadeia. Alto nível de empacotamento molecular.

- Sindiotático – Radicais dispostos de maneira alternada de um lado e outro da cadeia. Nível de empacotamento molecular médio.
- Atático – Radicais disposto de maneira aleatória em torno da cadeia. Menor nível de empacotamento molecular.

O nível de empacotamento significa o quanto as macromoléculas poliméricas estão próximas umas das outras. Quanto maior o nível de empacotamento, menor a capacidade de difusão de fluidos no material.

- Em última análise tem-se que qualquer propriedade que aumente a densidade de cadeias tem como consequência diminuir a difusão de fluidos.

2.3.3. Efeito da Água nas Propriedades dos Compósitos

A maioria dos compósitos de matriz polimérica absorve uma quantidade pequena de água, quando em contato com essa substância. No entanto, mesmo quantidades pequenas são potencialmente danosas para o material e o nível de perda de propriedades está diretamente ligado à quantidade de água absorvida. Os efeitos da absorção da água nos compósitos podem ser vários:

1. Alteração dimensional;
2. Redução da temperatura de transição vítrea;
3. Redução das propriedades mecânicas (i.e., módulo de Young, resistência à ruptura, dureza)

O efeito de capilaridade na região da interface matriz-reforço é um dos principais responsáveis pelo aporte de água no compósito. Contrações durante o processo de cura da resina são responsáveis por eventuais separações na interface matriz-reforço, gerando o efeito de capilaridade. Nesse caso a umidade deteriora progressivamente a adesão fibra-matriz, resultando na perda de eficiência da transferência de carga da matriz para a fibra.

A temperatura de transição vítrea (T_g) para uma resina poliéster decresce de aproximadamente 15°C a 20°C para uma absorção de água de 2% em massa (Figura 10). Isso se dá pela plastificação da matriz e pela perda de aditivos para o meio externo.

Recomenda-se para um projeto que se considere que a temperatura de operação esteja em torno de 30°C a 40°C abaixo da T_g , quando sob condições de alta umidade. [16]

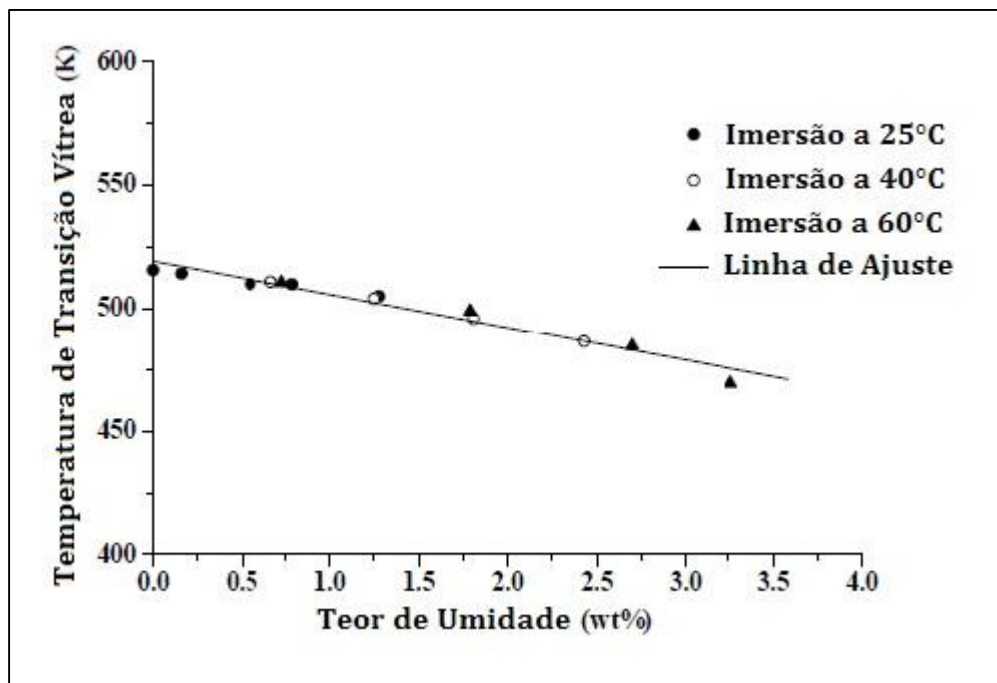


Figura 10 - Variação da Temperatura Vítrea em Função do Teor Percentual em Massa de Água Presente no Corpo de Prova [16]

A absorção de água pela camada superficial no material compósito se dá de maneira praticamente imediata. No entanto, na região mais interna do material, esse processo pode levar tempos consideravelmente mais longos, como anos. A taxa de absorção depende da temperatura, da umidade relativa do meio, do tempo de exposição e de tensões a que o corpo possa estar submetido. A temperaturas elevadas a taxa de absorção é mais alta e, conseqüentemente, a taxa de degradação do material também o é.

Como exemplo de agravamento da degradação devido à combinação de vários fatores de envelhecimento, pode-se considerar um corpo sob tensão trativa no sentido transversal às fibras. Sob essa condição, cavidades e vazios expandem-se e promovem absorção de água a uma taxa mais elevada. Além disso micro trincas são formadas pela aplicação da tensão, e essas trincas aceleram ainda mais o processo de absorção de água.

No caso desse material ser então exposto a temperaturas negativas, haverá transformação de fase da água, dilatação e conseqüente aumento das tensões e das dimensões das trincas.

Quando em contato com umidade e uma vez que o compósito absorve água, essa água se difunde pelo material e reage com qualquer substância hidrolisável, como ésteres, por exemplo. São, então, formadas regiões de solução superconcentrada, que por osmose promovem maior aporte de água para dentro do material. Uma das conseqüências desse processo é o aumento da pressão no interior do material e a geração de bolhas na superfície por delaminação. Como maneira de prevenir esse efeito, é usual o uso de um véu de proteção, que consiste em uma camada mais externa muito rica em resina, com o intuito de evitar o contato da região das fibras com o meio externo e assim inibir uma absorção exacerbada.

A falha no compósito, devido ao envelhecimento, pode ser devida a:

- Danos na matriz;
- Danos no reforço;
- Danos na interface;
- Uma combinação de dois ou mais desses processos.

2.3.3.1. Degradação da Matriz

A maioria das resinas usadas comercialmente são mais resistentes a ataques químicos, sejam eles por ácido, soluções salinas ou agentes oxidantes, que outros materiais como alguns aços inox ou ligas de alumínio. No entanto, essas resinas são vulneráveis a solventes, que causam danos irreversíveis, expondo a região de fibras ao meio ambiente. Na indústria automobilística e aeronáutica os compósitos podem entrar em contato com fluidos como combustível, óleo lubrificantes, fluidos de sistemas hidráulicos, soluções anticongelamento, que são conhecidos por suas propriedades degradantes de compósitos pelo ataque à matriz.

2.3.3.2. Degradação das Fibras

A degradação das fibras é especialmente importante nos casos das fibras aramida e de vidro, uma vez que as fibras de carbono são estáveis sob a maioria das condições [3].

No caso específico do material de estudo desse trabalho, que são fibras de vidro classe E, essas são fabricadas com resistência à ruptura de 3,5 GPa. No entanto há uma rápida degradação inicial devido à umidade do ar logo após a fabricação. Mesmo em condições padrão de laboratório (23°C e 50% de umidade relativa), em apenas 3 semanas a resistência das fibras é reduzida a 3,0 GPa. Imersão completa em água sob a mesma temperatura causa redução ainda maior nas propriedades da fibra. No mesmo período a resistência chega a 2,5 GPa, o que significa uma queda de aproximadamente 30%. Para um período de 100 dias de imersão em água a 23°C é esperada uma redução de 40% na resistência à ruptura, chegando a 2,1 GPa. Como uma maneira de normatizar as propriedades das fibras independentemente do manuseio ou armazenagem, é usual considerar a resistência das fibras com o valor de 2,0 GPa [3].

O principal processo associado à degradação das fibras de vidro classe E é a lixiviação de óxidos de sódio (Na_2O) e de potássio (K_2O) da superfície das fibras, o que gera micro trincas e, conseqüentemente, concentração de tensão.

2.4. Fibras de Vidro tipo 'E'

O vidro tipo E foi originalmente produzido com o propósito de ser um material isolante elétrico para cabos. O nome 'E' faz referência à palavra 'Elétrico'. Posteriormente notou-se a grande capacidade que o material possuía de formação de fios, e juntamente às suas boas propriedades mecânicas fizeram com que esse material passasse a ser usado quase exclusivamente como reforço de materiais compósitos. O vidro do tipo E, é um vidro borossilicato de alumínio com menos de 1% massa de óxidos [7].

As principais propriedades do vidro tipo E são:

- Baixo custo;
- Alta taxa de produção;

- Alta resistência mecânica;
- Moderada densidade;
- Não inflamável;
- Resistência ao calor;
- Boa resistência química;
- Boa resistência à umidade;
- Boa manutenção de propriedades sob condições variadas;
- Bom isolante elétrico.

O uso das fibras de vidro tipo E como reforço de matriz polimérica é dos mais largamente usados na indústria. A resistência mecânica otimizada do compósito é obtida quando fibras contínuas e alinhadas com o carregamento são usadas. Com a necessidade de o material suportar esforços em direções diversas, uma estrutura laminada de placas com fibras contínuas alinhadas em direções diferentes pode ser montada. Outra opção é o uso de tecidos ou de fibras picadas dispostas aleatoriamente.

Outros tipos de vidro utilizados para fabricação de fibras são:

- Vidro tipo **A** (“Alkali-lime” - Vidro de Óxido de Cálcio com pequena ou nenhuma porcentagem de óxido de boro),
- Vidro tipo **E-CR** (“Electrical / Chemical Resistance”; Vidro de Silicato, alumina e calcário com menos de 1% massa de óxidos – Alta resistência a ácidos,
- Vidro tipo **C** (Vidro de Óxido de Cálcio com alta concentração de Óxido de Boro - usado para fabricação de fibras picadas e isolamentos),
- Vidro tipo **D** (Vidro Borossilicato, o nome deriva da baixa constante Dielétrica),
- Vidro tipo **R** (Vidro de Silicato de Alumina sem MgO ou CaO, com alta resistência mecânica para reforço em compósitos),
- Vidro tipo **S** (Vidro de Silicato de Alumina sem CaO e com alta concentração de MgO e com alta resistência à tração - a denominação 'S' vem de Tensile Strength [7]).

A Tabela 1 lista algumas propriedades das fibras de vidro mais comuns, bem como as propriedades de outras fibras empregadas como reforço em compósitos [7].

Tabela 1 - Propriedades Típicas de algumas Fibras Comuns.

Material	Massa Específica	Resistência à Tração	Módulo de Young
Vidro tipo E	2.55	2000	80
Vidro tipo S	2.49	4750	89
Alumina	3.28	1950	297
Carbono	2.00	2900	525
Kevlar 29	1.44	2860	64
Kevlar 49	1.44	3750	136

Tabela 2 - Propriedades Típicas das Fibras de Vidro Tipo 'E' [18]

Diâmetro (μm)	Massa específica (kg/m^3)	Coef. Poisson	Resist. Tração (MPa)	Módulo Young (GPa)	Alongam. Ruptura (%)	Coef. Expansão térmica ($\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)
9-15	2550	0,22 a 0,25	2100 a 3500	77	2 a 3,5	5,4

Um dos motivos do aumento da utilização de fibras de vidro foi a substituição ao asbesto, que se descobriu causar diversos malefícios à saúde humana. Quando em suspensão no ar e aspirado, o asbesto foi associado como causador de doenças como câncer de pulmão, ao passo que nenhuma doença foi até hoje associada ao contato com fibras de vidro.

Há duas diferenças básicas entre fibras de vidro e asbesto que podem explicar os diferentes efeitos sobre o organismo. O vidro não possui estrutura cristalina como acontece com o asbesto. Assim, as fibras de vidro se rompem sem direção preferencial, inclusive na direção transversal e, conseqüentemente, se reduzem a partículas pequenas o suficiente para serem eliminados pelo organismo. Por outro lado, o asbesto com a

estrutura cristalina tende a se romper no sentido longitudinal, gerando fibras cada vez mais finas. Além disso o vidro possui certo potencial de dissolução pelo organismo. [4]

2.5. Tipos de Ensaios de Fluência em Compósitos

Nos ensaios de fluência usualmente empregam-se corpos de prova cilíndricos submetidos a sollicitação uniaxial, porém, qualquer outro meio de ensaio pode ser usado, como flexão, torção ou ensaios com peças na geometria final de utilização, como pressão interna em tubulação.

- Procedimentos de ensaio padronizados pela norma ASTM D7337 / D7337M

Existem basicamente três tipos de ensaio relacionados à fluência. São eles:

2.5.1. Ensaio de Ruptura por fluência

Esse ensaio objetiva relacionar a tensão e a vida de um material. Para isso vários corpos de prova são ensaiados até a ruptura, cada um com uma tensão diferente. Daí é gerado um gráfico Tensão x Tempo, em que cada ponto representa a tensão de ensaio e o tempo de vida de cada corpo de prova. Podem ser feitos gráficos para cada temperatura de interesse.

2.5.2. Ensaio de Fluência a Tensão Constante

Esse ensaio objetiva obter a curva de deformação em função do tempo. Mede-se a variação de comprimento do corpo de prova durante o ensaio. A tensão e a temperatura aplicadas ao corpo são mantidas constantes. É importante também manter a temperatura do ambiente estável para que não haja dilatação ou contração térmica dos componentes da máquina nem do corpo de prova, o que pode mascarar os resultados. Para a realização desse ensaio é necessário medir as dimensões da área resistente do corpo de prova a cada instante para que seja possível calcular a tensão real atuante. A carga, portanto, é variada de maneira a manter a tensão constante ao longo do ensaio.

2.5.3. Ensaio de Fluência a Carga Constante

Esse ensaio objetiva obter a curva de deformação em função do tempo. Mede-se a variação de comprimento do corpo de prova durante o ensaio. A carga e a temperatura aplicadas ao corpo são mantidas constantes. É importante também manter a temperatura do ambiente estável para que não haja dilatação ou contração térmica dos componentes da máquina nem do corpo de prova, o que pode mascarar os resultados. Esse ensaio é mais fácil de se fazer que o de tensão constante pois não há necessidade de se medir a cada instante a dimensão do corpo de prova para calcular a tensão real atuante.

Como explicado anteriormente, a curva na região da fluência secundária é basicamente linear, por isso é possível fazer uma parte do ensaio e extrapolar o gráfico, tanto no caso do ensaio de fluência a tensão constante quanto no de carga constante.

3. Materiais e Métodos

3.1. Caracterização Inicial do Material

Em todas as etapas de ensaio desse trabalho foram usados corpos de prova com as dimensões nominais: 140 x 6,2 x 25,4 mm.

Na Figura 11, uma foto de alguns corpos de prova que foram usados nesse trabalho, ao lado de uma régua milimetrada para que se tenha uma noção das dimensões.

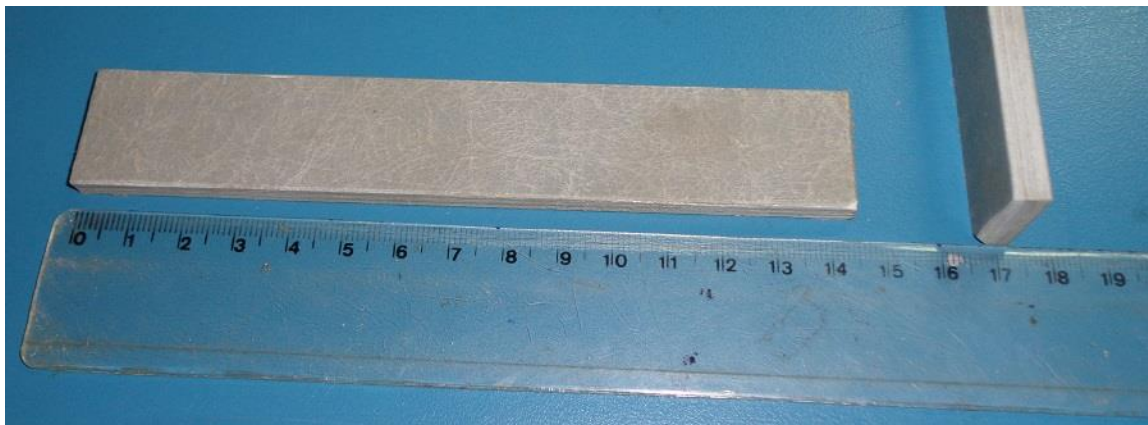


Figura 11 - Foto de CPs - Referência de uma Régua Milimetrada

O material em estudo é um compósito de matriz poliéster isoftálico reforçado por fibras de vidro tipo E longas e dispostas unidirecionalmente. As placas de onde foram retirados os corpos de prova são fabricados por pultrusão e possuem fração volumétrica de fibras nominal de 30%. As placas possuem ainda um véu superficial sem função estrutural, com o propósito de fornecer um melhor acabamento superficial e proteção à região interna do compósito. Além disso, foi observada a presença de carga ou fase de enchimento, como pode ser visto na figura 12. [5]

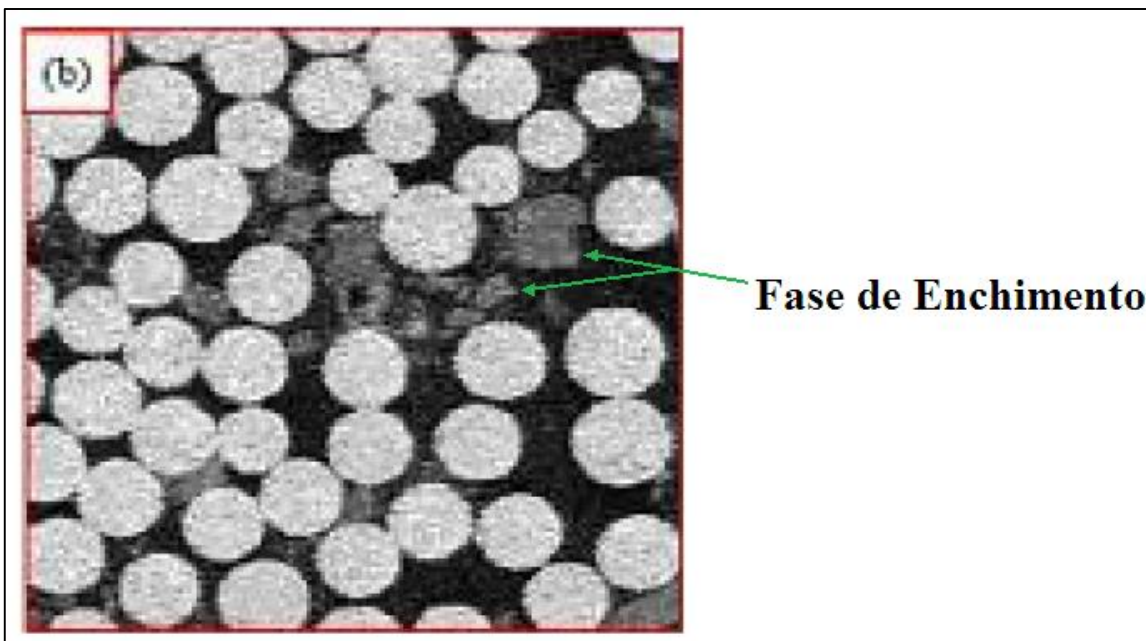


Figura 12 – Imagem de Microscopia Óptica de Seção Transversal do Material Objeto de Estudo desse Trabalho – Figura Obtida do Item 5 da Referência Bibliográfica

Na Tabela 3 encontram-se as principais propriedades da resina poliéster, formadora da matriz do material de estudo desse trabalho.

Tabela 3 - Propriedades Típicas da Resina Poliéster. [5]

Resina Poliéster	
Resistência à tração (MPa)	55
Alongamento (%)	2,1
Resistência à flexão (MPa)	100
Módulo de flexão (GPa)	4,0
Temperatura de distorção térmica (°C)	90
Massa (kg/cm ³)	1200

Inicialmente seis corpos de prova foram ensaiados em flexão até a ruptura para a obtenção das propriedades do material conforme norma ASTM D790-07 [6]. Os

resultados foram usados para definição da carga dos ensaios de fluência. O valor de tensão escolhido (80Mpa) foi de aproximadamente 40% da resistência à ruptura, de modo que se tivesse uma tensão alta o suficiente para acelerar o processo de fluência e, ao mesmo tempo, garantir que não fosse muito próxima da tensão última a ponto de romper o corpo de prova durante o ensaio e se perderem os dados.

3.2. Ensaio de Fluência e Envelhecimento

Para esse trabalho, o tipo de ensaio escolhido foi o de flexão em três pontos. Pela simplicidade de alinhamento dos corpos de prova (CPs) no equipamento e por ser um ensaio capaz de gerar tensões altas sem que seja necessário usar grandes cargas.

A configuração usada para flexão:

- Distância entre apoios = 100mm
- Diâmetro dos roletes de apoio e do cutelo = 8mm
- Carga no cutelo = 500N
- Posição do cutelo = centralizado entre os apoios

Na Figura (13) pode-se observar a disposição do corpo de prova no equipamento de ensaio.

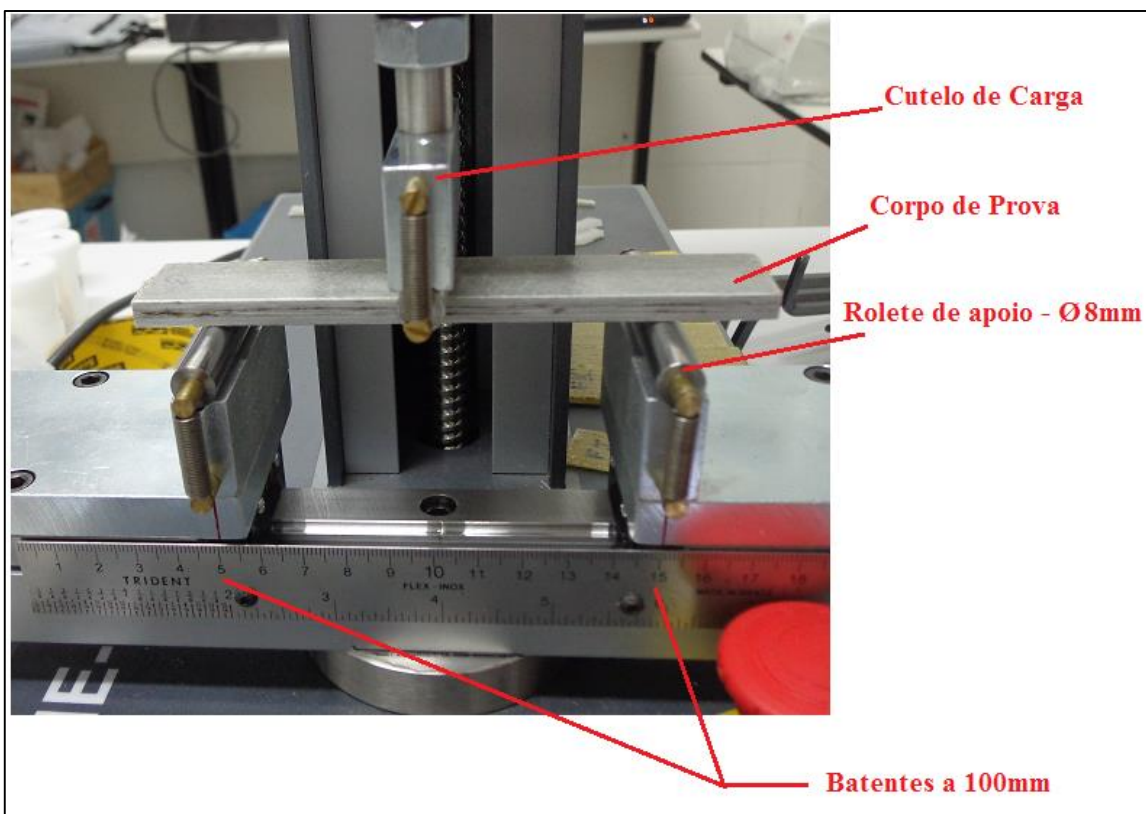


Figura 13 - Foto da Disposição do CP no Equipamento de Ensaio a Temperatura Ambiente

Como teste inicial foi feito um ensaio com duração de 24 horas e a carga de 500N, com o propósito de avaliar o menor tempo necessário de ensaio para obter uma taxa de fluência do material. Pôde-se observar que com um período de ensaio de 8 horas e descartando as primeiras 3 horas, já foi possível encontrar uma região de comportamento suficientemente linear e, portanto, pôde-se determinar a taxa de fluência estacionária.

Desse resultado foi estabelecido o parâmetro de tempo de 8 horas de ensaio para cada corpo de prova.

Foram utilizadas 8 condições diferentes para a realização dos ensaios de fluência. A descrição das condições de envelhecimento prévio aos ensaios e de temperatura dos ensaios são descritas na tabela 4. É apresentada também a nomenclatura que será usada

nesse trabalho para fazer referência aos CPs por tipo de envelhecimento e temperatura de ensaio.

Tabela 4 - Descrição dos Tipos de Envelhecimentos e Ensaio

Tipo de Envelhecimento	Tempo de Envelhecimento	Temperatura de Ensaio [°C]	Nomenclatura a ser usada nesse Trabalho
Não Envelhecido	-	25	Sem Env
Não Envelhecido	-	60	Sem Env 60
Água	6	25	A6
Água	6	60	A6 60
Água	14	25	A14
Água	14	60	A14 60
Óleo	14	25	O14
Óleo	14	60	O14 60

Na Figura 14 alguns corpos de prova em imersão em água e óleo para envelhecimento.



Figura 14 - Foto dos CPs em Envelhecimento

Água destilada foi usada como fluido de envelhecimento para verificar um provável efeito de envelhecimento físico causado pela difusão de água entre as cadeias poliméricas. A água destilada foi escolhida pois possui histórico de afetar mais as propriedades mecânicas dos polímeros que a salgada ou que a água tratada “de torneira”. Isso ocorre por uma questão de pressão osmótica, em que a água destilada, por possuir pouco ou nada de soluto, apresenta uma pressão osmótica maior. Com isso, tem-se uma maior tendência de difusão da água no material nela submerso.

Tempos de envelhecimento diferentes foram usados para a água com o propósito de avaliar se quantidades diferentes de fluido absorvido influenciariam diferentemente a taxa de fluência.

Óleo lubrificante foi usado como fluido de envelhecimento para verificar se possíveis alterações químicas ocorrem devido aos aditivos do óleo.

Duas temperaturas distintas, 25°C (temperatura ambiente) e 60°C foram usadas para grupos também distintos de corpos de prova durante os ensaios de fluência, no entanto o envelhecimento foi feito à temperatura de 25°C para todos os corpos. Objetivou-se verificar a influência da temperatura na taxa de fluência, tanto para materiais envelhecidos como para não envelhecidos.

Para cada uma das 8 condições de teste estabelecidas foram usados 5 corpos de prova com o propósito de se obter um valor estatisticamente válido conforme norma ASTM D790-07, com exceção do ensaio sem envelhecimento em temperatura ambiente (Sem Env), que somente foi testado 1 CP, visto que havia referência bibliográfica suficiente [5] sobre o mesmo material de onde foram tirados os CPs. No total foram testados, para esse trabalho, 36 corpos de prova.

Os ensaios à temperatura de 60°C foram realizados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Portugal (FEUP), onde equipamentos diferentes dos ensaios à temperatura ambiente foram utilizados:

1. Para aplicar carga aos CPs, utilizou-se um equipamento inteiramente mecânico, que possuía um “Braço de Carga” unido a uma base através de uma articulação rolamentada (Ver Figura 15). Um sistema de ajuste de carga estava acoplado ao “Braço de Carga”, de maneira que se podia ajustar a carga no ponto de aplicação para o valor desejado. Do “Braço de Carga” pendia uma haste que entraria em contato com o CP e assim transmitiria a carga. Essa haste era unida ao “Braço de Carga” por meio de um pino revestido de teflon com o objetivo de reduzir o atrito e, assim, a haste permanecer sempre na vertical e evitar perdas de carga ou cargas indesejadas. A carga percebida pelo CP era amplificada por meio de braços de alavanca, em que o braço de alavanca do centro de massa do “Braço de Carga” era maior que o da haste. Na Figura 15 uma foto do equipamento, com as indicações:

A – Sistema de aquecimento e suporte dos CPs;

B – Braço de Carga e Mecanismo de ajuste da carga;

C – Sistema de aquisição de dados.

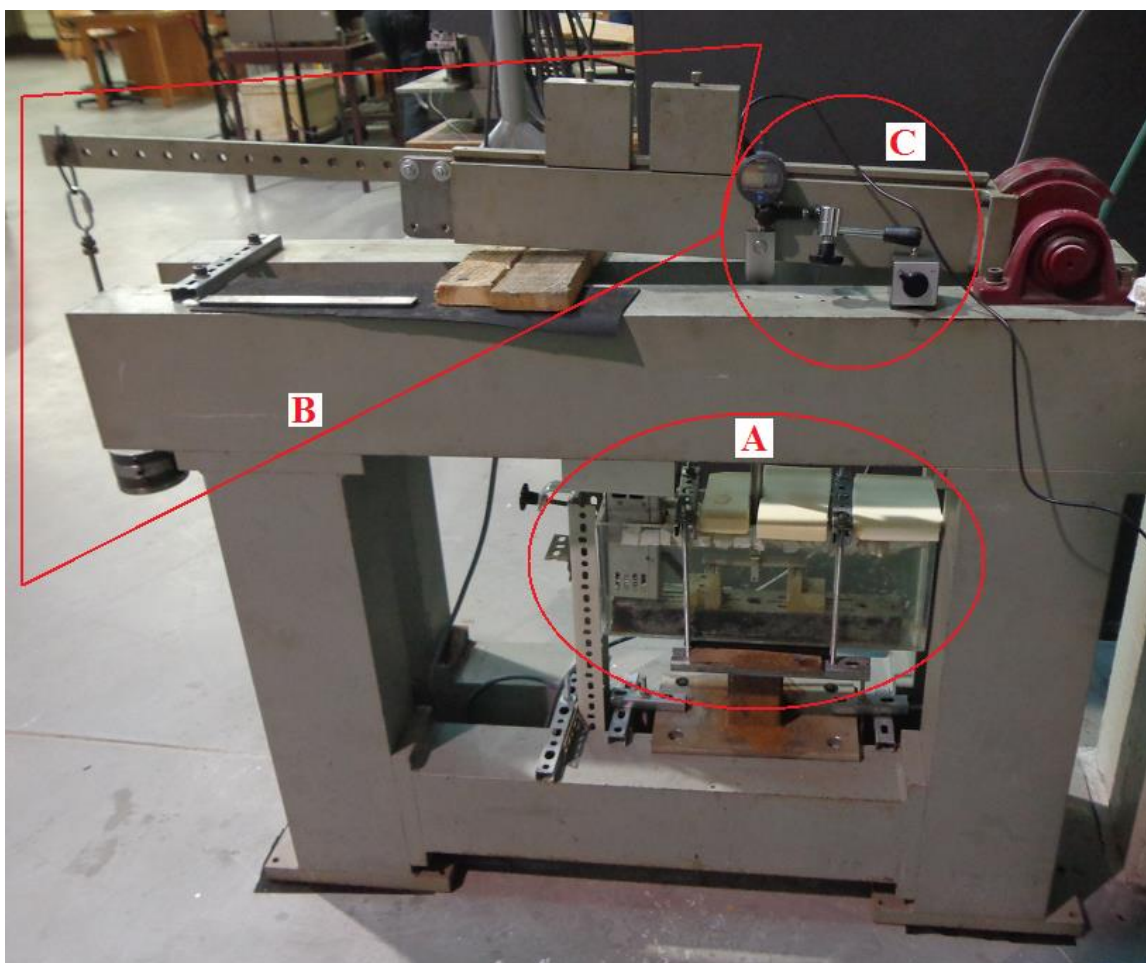


Figura 15 - Foto do Equipamento para Carregamento dos CPs

2. Para o suporte e aquecimento dos CPs, foi utilizado um tanque de material acrílico que foi preenchido de água, que servia de meio condutor de calor. No interior da caixa foi instalado um suporte com dois roletes de 8 mm de diâmetro separados de 100 mm, que serviram de pontos de apoio para os CPs. Essas dimensões são idênticas às utilizadas nos ensaios a 25°C, de maneira a manter as condições de ensaio. O aquecimento dos corpos de prova, foi feito por imersão dos corpos de prova nesse tanque com água aquecida e circulante. Dessa maneira os ensaios foram feitos com os corpos de prova o tempo todo imersos em água aquecida. Para isso foi utilizado um circulador de imersão que promove tanto o aquecimento quanto a circulação da água para

homogeneização da temperatura no interior do tanque. Por cima da água foram colocados pequenos pedaços de isopor com o propósito de reduzir ambas: a troca de calor da água com o ambiente e a evaporação da água. Na Figura 16 uma foto do sistema de suporte e aquecimento, em que as indicações:

- A – Roletes de suporte dos CPs;
- B – Haste de carga;
- C – Circulador/Aquecedor;
- D – Corpo de Prova.

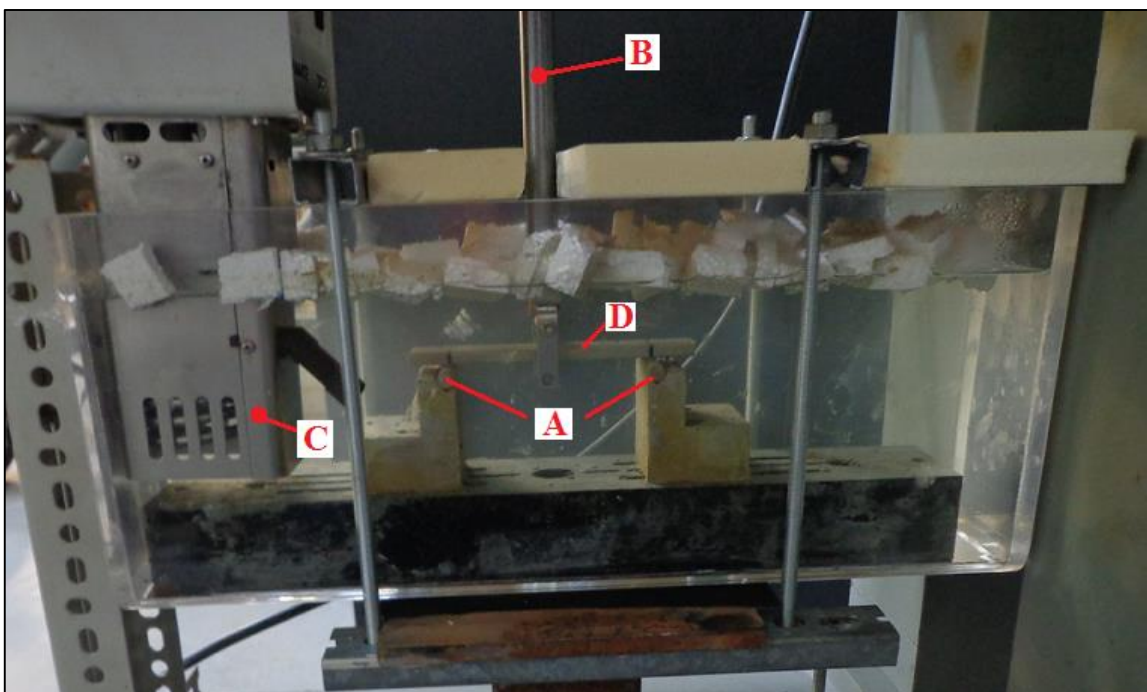


Figura 16 - Sistema de Suporte e Aquecimento dos CPs

3. Para a aquisição de dados, foi utilizado um relógio comparador digital. Esse medidor foi conectado a um computador e a um *software* desenvolvido e de propriedade da FEUP. O relógio comparador foi afixado à base do equipamento de carregamento por meio de um suporte magnético. Dessa maneira ficava suportado de forma estável em uma referência imóvel. A extremidade medidora do relógio comparador ficou apoiado sobre o topo da haste de carregamento.

Assim, qualquer deslocamento sofrido pelo corpo de prova era rigorosamente transmitido para o relógio. O *software*, por sua vez, era responsável por obter a uma taxa especificada (1 ponto a cada 2 segundos), armazenar e manipular os dados de deslocamento gerados pelo relógio comparador. Na Figura 17, uma foto do sistema de aquisição de dados.

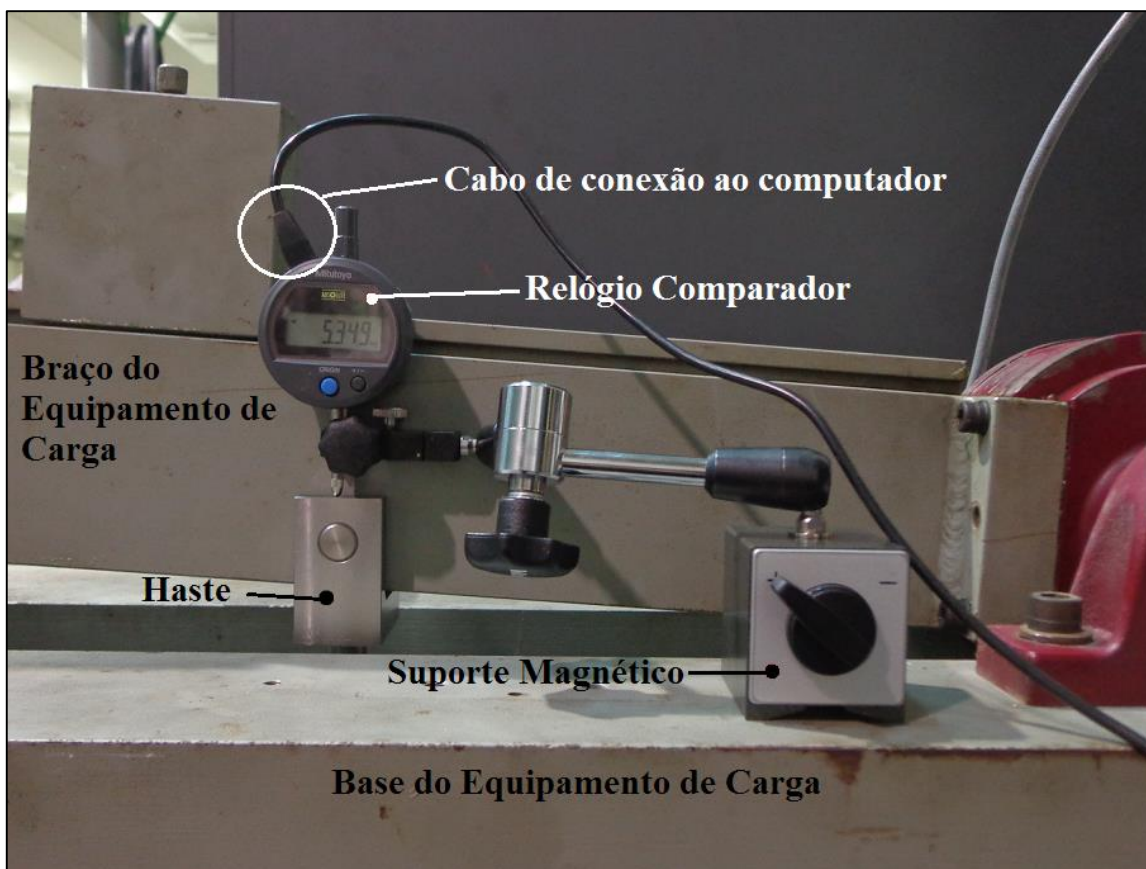


Figura 17 – Foto do Sistema de Aquisição de Dados

Na Tabela 15 estão apresentadas as principais características dos equipamentos utilizados nos ensaios à temperatura de 60°C.

Tabela 5 – Descrição dos Materiais Utilizados nos Experimentos

Item	Descrição	Propriedades
Relógio comparador	<ul style="list-style-type: none"> • Marca: Mitutoyo • Modelo: ID-S112SB 	<ul style="list-style-type: none"> • Resolução: 0,001mm • Curso Máximo: 12,7mm

	<ul style="list-style-type: none"> • N° Série: 12188436 	
Balança	<ul style="list-style-type: none"> • Marca: Kern-Sohn • Modelo: PLS 6200-2 • N° Série: WI1000490 	<ul style="list-style-type: none"> • Resolução: 0,01g
Paquímetro	<ul style="list-style-type: none"> • Marca: Mitutoyo 	<ul style="list-style-type: none"> • Curso Máximo: 150mm • Resolução: 0,05mm
Circulador de água	<ul style="list-style-type: none"> • Marca: Haake • Modelo: DC1 	<ul style="list-style-type: none"> • Resolução: 0,1°C
Termômetro	<ul style="list-style-type: none"> • Marca: Superior 	<ul style="list-style-type: none"> • Limite Superior: 150°C • Limite Inferior: -15°C • Resolução: 1°C
Balança	<ul style="list-style-type: none"> • Marca: Hälen 	<ul style="list-style-type: none"> • Resolução: 0,1Kg • Capacidade Máxima de Carga: 150Kg

3.2.1. Carga do Ensaio de Fluência

A carga dos ensaios de fluência foi definida de maneira que a tensão não ultrapassasse 40% da resistência à ruptura do material. Dessa forma, as chances de se romper o material durante os ensaios de fluência seriam minimizadas, mesmo porque os ensaios de resistência máxima do material foram feitos sem qualquer envelhecimento e em temperatura ambiente de aproximadamente 20°C e não havia como prever qual seria a perda de propriedades mecânicas para os diversos tipos de envelhecimento. Além disso, alguns corpos de prova experimentariam temperatura elevada de 60°C em seus ensaios.

Por outro lado, a tensão deveria ser grande o suficiente para permitir ensaios com deformações expressivas com o menor tempo de ensaio possível, tornando a execução dos ensaios de fluência dos 36 corpos de prova menos demorada.

A partir desse valor de 40% do valor de resistência à ruptura calculou-se a carga que seria empregada em todos os ensaios de fluência. A saber:

$$\sigma_u \text{ (Resistência à Ruptura Nominal)} = 200\text{MPa}$$

$$\sigma_f \text{ (Tensão do Ensaio de Fluência)} = 40\% \cdot 200\text{MPa} = 80\text{MPa}$$

As dimensões nominais dos corpos de prova são:

$$L \text{ (largura)} = 25,4\text{mm}$$

$$t \text{ (espessura)} = 6,2\text{mm}$$

O vão de flexão definido para os ensaios de fluência foi:

$$W \text{ (vão)} = 100\text{mm}$$

Com esses dados foi calculada a carga que seria aplicada nos ensaios de fluência, a partir da equação de tensão normal em um corpo sob flexão (Equação 12):

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot y}{I} \quad (12)$$

$$\sigma_{max} = \frac{\left[\left(\frac{F_{max}}{2}\right) \cdot \left(\frac{W}{2}\right)\right] \cdot \frac{t}{2}}{\frac{L \cdot t^3}{12}}$$

$$F_{max} = \sigma \cdot \left(\frac{L \cdot t^3}{12}\right) \cdot \left(\frac{2}{t}\right) \cdot \left(\frac{2}{W}\right) \cdot 2$$

$$F_{max} = 521\text{N}$$

Onde,

M = Momento de flexão na seção de interesse

y = Distância entre o ponto de interesse e a linha neutra da viga

I = Momento de inércia da viga na direção do carregamento de flexão

Assim a carga de ensaio de fluência foi definida como de 500N, de maneira que ficasse abaixo da carga máxima que representaria 40% da tensão de ruptura. Esse valor de 500N representa nominalmente 38% da resistência à ruptura do material.

É importante ressaltar que apesar da mesma carga nominal ter sido usada para todos os ensaios de fluência, na etapa de análise dos dados, os valores de deformação foram calculados para cada corpo de prova levando-se em consideração suas dimensões próprias.

4. Resultados Experimentais

4.1. Resultados dos Ensaios de Ruptura

Na figura 18 são apresentados os resultados dos ensaios de flexão até a ruptura. Os dados de todos os corpos de prova ensaiados foram plotados em um mesmo gráfico. Vale ressaltar que um dos corpos de prova ensaiados havia sido usinado com direção perpendicular à disposição das fibras e rompeu com cargas muito abaixo dos outros. Esse CP foi descartado das análises porque fugia do objetivo de analisar o comportamento do material no sentido das fibras.

Os dados resultantes dos ensaios até ruptura foram convertidos de Força para Tensão e de Flecha para Deformação usando as dimensões individuais dos CPs e a dimensão do vão de flexão. A média desses valores foi calculada e usada como a referência para análise dos resultados.

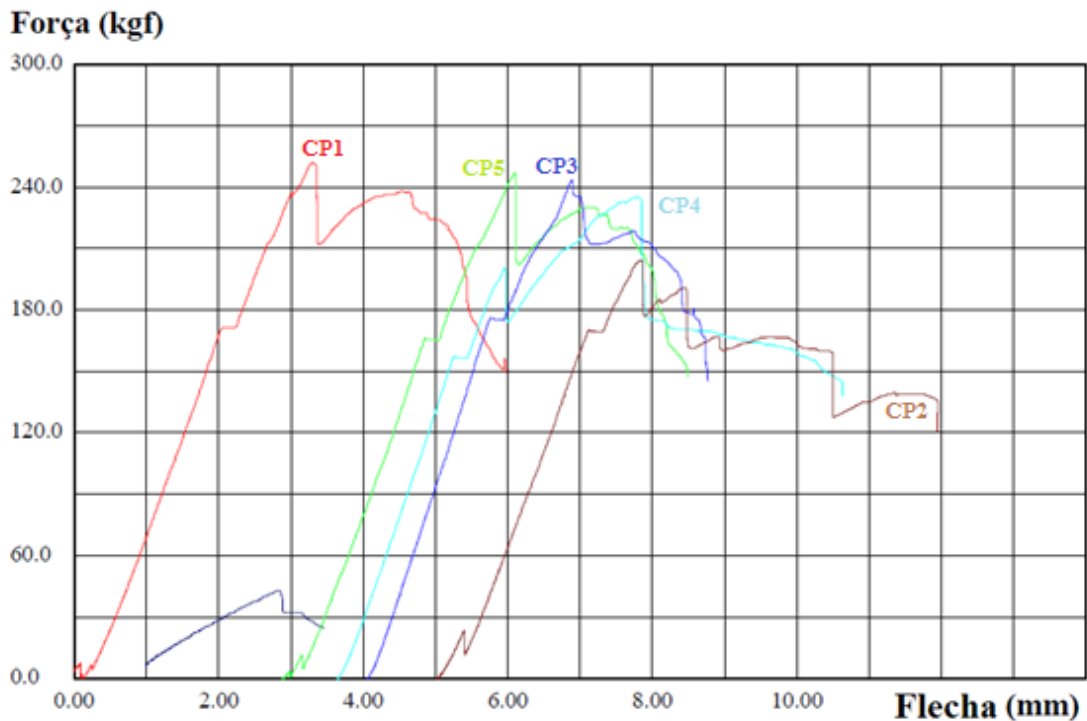


Figura 18 - Resultado dos Ensaios de Flexão até Ruptura

Tabela 6 - Resultados Calculados de Tensão e Deformação dos Ensaio de Ruptura

	Tensão [Mpa]	Deformação
CP1	229	3,26%
CP2	182	3,21%
CP3	221	4,22%
CP4	210	2,86%
CP5	222	2,86%
Média	212,8	3,28%
Desv. Padrão	16,6	0,497%

4.2. Parâmetros de Comparação

Seis parâmetros foram utilizados para comparação do comportamento dos corpos de prova nas diversas condições de envelhecimento e temperatura de teste. Entre parênteses é apresentada a nomenclatura que será utilizada ao longo do trabalho. Os parâmetros são mostrados na Figura 19. Vale observar que os parâmetros Módulo de Young (E) e Vida Prevista Calculada (V) não aparecem na Figura 19. Isso porque são valores teóricos calculados a partir de parâmetros obtidos experimentalmente.

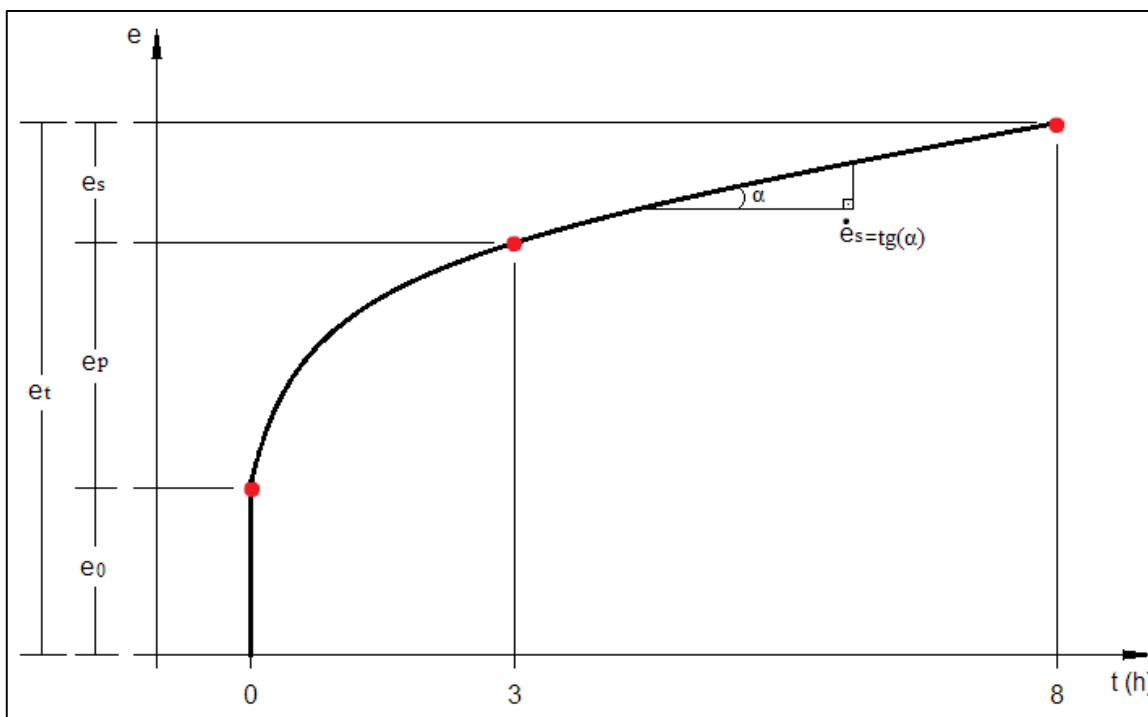


Figura 19 – Representação gráfica dos parâmetros investigados

- Módulo de Young (E)
- Deformação devido à fluência primária (e_p)
- Deformação devido à fluência secundária (e_s)
- Deformação total (e_t)
- Taxa de fluência (\dot{e}_s)
- Vida Prevista Calculada (V)

4.3. Ajuste dos Pontos Experimentais

4.3.1. Ajustes Iniciais

Como tentativa inicial para ajustar curvas aos pontos experimentais, foram usadas as equações que o *software Excel 2013* oferece com ajuste automático. Os tipos de equação testados foram:

- Linear – [$e = a \cdot t + b$]
- Logarítmica – [$e = a \cdot \ln(t) + b$]

- Exponencial – [$e = \exp^{(b.t)}$]
- Potência – [$e = a.t^b$]

Onde:

- e - representa deformação
- t - representa tempo
- 'a' e 'b' são constantes

Essas equações, no entanto, não possuem necessariamente significado físico. Ou seja, não existe necessariamente uma relação entre os parâmetros das equações testadas e propriedades micro estruturais, efeitos termodinâmicos ou qualquer outro efeito que explique o comportamento dos corpos de prova durante os ensaios de fluência. O motivo de se usar essas equações foi simplesmente a velocidade com que se poderia obter resultados e a possibilidade de se encontrar equações que não são diretamente utilizadas na literatura, mas que ainda assim pudessem ajustar bem os pontos experimentais obtidos.

No caso desses quatro tipos de equação, a que melhor se ajustou aos pontos experimentais foi a de potência. No entanto, ela apresenta uma incoerência com o comportamento esperado para esse tipo de ensaio. Nos ensaios de fluência, do tipo escolhido para serem realizados nesse trabalho, uma carga é aplicada ao corpo de prova da maneira mais próxima da instantânea possível no tempo $t=0$, e a carga é mantida constante ao longo de todo o ensaio. Desse modo, espera-se que haja uma deformação inicial ($e \neq 0$), devido ao comportamento elástico, de maneira igualmente instantânea no momento $t=0$. No entanto, essa equação de potência passa por $[0,0]$, ou seja, em $t=0$, $e=0$. O que não atende o requisito explicado anteriormente de $e \neq 0$ em $t=0$.

4.3.2. Equações de Ajuste

Portanto a equação de potência foi adaptada de maneira a incorporar a deformação elástica instantânea inicial.

$$e(t) = e_0 + a.t^b \quad (13)$$

Essa nova equação foi utilizada em todos os corpos de prova para verificar a capacidade de ajuste que apresentaria, e foi denominada ‘potência + e0’ e será referida como ‘pot+e0’ ao longo do trabalho.

Uma outra equação que também foi considerada para ajustar os pontos experimentais é a equação empírica de Andrade [8] para fluência sob tensão constante, que leva em consideração três comportamentos distintos:

- e_0 – Deformação elástica – Representa a deformação instantânea sofrida pelo material quando a carga é aplicada.
- β – Constante – Representa o transiente da fluência, com uma taxa decrescente com o tempo.
- k – Constante – Representa a o comportamento estacionário da fluência.

$$e(t) = e_0 \cdot \left(1 + \beta \cdot t^{1/3}\right) \cdot e^{(k \cdot t)} \quad (14)$$

As equações de 3 e 4 parâmetros de Maxwell+Kelvin-Voigt, utilizadas para modelar o comportamento de polímeros em fluência, também foram consideradas para ajustar os pontos experimentais.

A equação de 3 parâmetros é a representação de uma mola em série com um elemento Kelvin-Voigt e matematicamente é:

$$e(t) = \frac{\sigma_0}{k_1} + \left(\frac{\sigma_0}{k_2} \cdot 1 - e^{-(k_2 \cdot t / \eta_2)}\right) \quad (15)$$

Onde:

- σ_0 – Tensão aplicada ao material
- k_1 – Rigidez da mola do elemento de Maxwell
- k_2 - Rigidez da mola do elemento Kelvin-Voigt
- η_2 – Viscosidade do amortecedor do elemento Kelvin-Voigt
- t – Tempo

A equação de 4 parâmetros é a representação de uma mola em série com um amortecedor em série com um elemento Kelvin-Voigt e matematicamente é:

$$e(t) = \frac{\sigma_0}{k_1} + \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{k_2} \cdot \left(1 - e^{-(k_2 \cdot t / \eta_2)}\right) \quad (16)$$

Onde:

- σ_0 – Tensão aplicada ao material
- k_1 – Rigidez da mola do elemento de Maxwell
- η_1 - Viscosidade do amortecedor do elemento de Maxwell
- k_2 - Rigidez da mola do elemento Kelvin-Voigt
- η_2 – Viscosidade do amortecedor do elemento Kelvin-Voigt
- t – Tempo

4.4. Comparação das Equações

Todas as quatro equações (‘Pot+e0’, ‘Andrade’, ‘3 parâmetros’ e ‘4 parâmetros’) foram utilizadas para ajustar os pontos experimentais de todos os corpos de prova, para que fossem comparadas e se definisse a equação que melhor ajustava os pontos experimentais. Para tanto 3 parâmetros foram obtidos e comparados de cada equação:

- e_0 – Deformação Elástica
- $\dot{\epsilon}_s$ – Taxa de Fluência
- R^2 – Coeficiente de Determinação

Para a obtenção de ‘e0’ utilizou-se diretamente os pontos experimentais: Para cada corpo de prova gerou-se um gráfico deformação x tempo. Foram utilizados somente os primeiros (10 a 20) pontos experimentais, de modo a se ter uma boa visualização do comportamento inicial dos ensaios e, com isso, ser possível distinguir o trecho de deformação elástica do trecho de fluência. Um exemplo é mostrado na Figura 20.

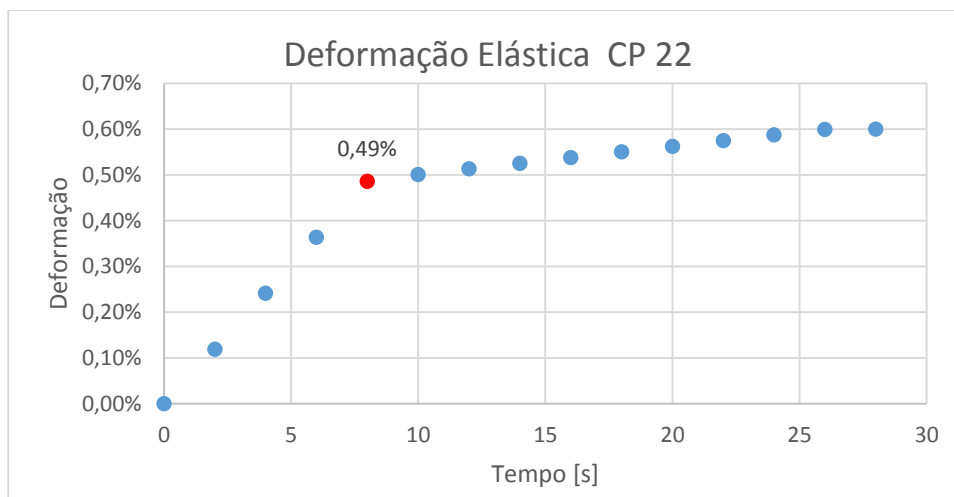


Figura 20 - Exemplo de Gráfico para Determinação de Deformação Elástica - CP 22

A partir desses gráficos foi determinado o valor de deformação elástica observado para cada corpo de prova. A região linear inicial do gráfico foi definida como deformação elástica, e a partir do ponto que a curva apresentava alteração de inclinação, foi considerada como deformação devido à fluência. No exemplo mostrado na figura 20 tem-se que a deformação elástica do corpo de prova 22 foi de 0,49%, conforme indicado pelo ponto experimental assinalado.

Então, esse valor de deformação elástica obtido diretamente dos pontos experimentais foi comparado com o valor de deformação elástica resultante do ajuste de cada equação aos pontos experimentais.

No caso das equações ‘Pot+e0’ e ‘Andrade’, o valor de ‘e0’ é explícito e obtido diretamente da variável de mesmo nome. Para as equações de ‘3 parâmetros’ e ‘4 parâmetros’ o valor de ‘e0’ foi obtido do termo $e_0 = \frac{\sigma_0}{R_1}$, que é o primeiro termo de ambas as equações e representa a deformação elástica inicial.

Para a taxa de fluência foi considerado o período de 5 horas de ensaio compreendido da 3ª hora até a 8ª hora de ensaio. Esse intervalo de ensaio já apresentava um comportamento suficientemente linear, então calculou-se a taxa de fluência usando a equação 17:

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{e_{14400} - e_{5400}}{t_{14400} - t_{5400}} \quad (17)$$

Onde,

e_{14400} – deformação no instante 8h

e_{5400} – deformação no instante 3h

t_{14400} – tempo em segundos no instante 8h

t_{5400} – tempo em segundos no instante 3h

Obs. Como a taxa de aquisição de dados foi de 1 ponto a cada 2 segundos, tem-se esses valores de ‘14400’ referente à hora 8 ($8h \cdot 60 \frac{min}{h} \cdot 60 \frac{s}{min} \cdot 0,5 \frac{ponto}{s} = 14400 \text{ pontos}$) e ‘5400’ referente à hora 3 ($3h \cdot 60 \frac{min}{h} \cdot 60 \frac{s}{min} \cdot 0,5 \frac{ponto}{s} = 5400 \text{ pontos}$).

Esse mesmo conceito foi utilizado para o cálculo da taxa de fluência tanto diretamente dos pontos experimentais quanto através das equações ajustadas.

O parâmetro R^2 foi obtido através equação 18:

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{resto}}{SQ_{total}}$$

$$Q_{resto} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (18)$$

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Onde,

y_i - Valor medido experimentalmente

\bar{y} – Valor médio das medidas experimentais

\hat{y}_i – Valor calculado através da equação

Os três parâmetros (e_0 , e_s , R^2) foram comparados da seguinte maneira:

- e_0 – O valor de e_0 obtido das equações que mais se aproximasse do valor de e_0 obtido diretamente dos pontos experimentais era considerado como ótimo.
- e_s – O valor da taxa obtida das equações que mais se aproximasse do valor da taxa obtida diretamente dos pontos experimentais era considerado como ótimo.
- R^2 – o maior valor era considerado ótimo.

A equação que apresentasse a maior quantidade de valores ótimos seria escolhida como a equação que melhor ajustava os pontos experimentais.

Nas tabelas de comparação de equações, foram colocados os 3 parâmetros (R^2 , e_0 , e_s) para todas as equações. Os valores que fossem mais adequados de acordo com os critérios descritos anteriormente foram marcados. No final da marcação de todos os parâmetros, os itens marcados foram contados, e a equação que apresentasse maior quantidade de parâmetros mais adequados era considerada como a que melhor ajustava os pontos experimentais.

O resultado dessa avaliação forneceu o seguinte resultado:

Para os corpos de prova ensaiados à temperatura ambiente, a equação que melhor se ajustou aos pontos experimentais foi a ‘Pot+e0’, conforme exemplificado na Tabela 7.

Tabela 7 - Exemplo de Comparação do Ajuste das Equações - Temperatura Ambiente - Água 14

CP 01 (Água 14)					
	Pot + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,89	0,67	0,74	0,78	-
e0	0,48%	0,61%	0,61%	0,60%	0,48%
Tx. últ. 5h	2,10E-009	3,99E-009	1,23E-009	2,85E-009	2,03E-009
CP 02 (Água 14)					
	Pot + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,96	0,79	0,88	0,91	-
e0	0,56%	0,69%	0,69%	0,69%	0,60%
Tx. últ. 5h	2,18E-09	4,38E-009	1,66E-09	2,92E-009	2,40E-09
CP 03 (Água 14)					
	Pot + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,82	0,66	0,64	0,88	-
e0	0,48%	0,60%	0,60%	0,47%	0,48%
Tx. últ. 5h	1,52E-009	2,08E-009	9,10E-010	2,67E-009	1,53E-009

CP 04 (Água 14)					
	Pot + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,79	0,66	0,63	0,65	-
e0	0,48%	0,61%	0,61%	0,61%	0,48%
Tx. últ. 5h	1,57E-009	2,21E-009	1,29E-009	2,04E-008	1,74E-009
CP 05 (Água 14)					
	Pot + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,84	0,50	0,66	0,72	-
e0	0,48%	0,59%	0,59%	0,59%	0,48%
Tx. últ. 5h	1,60E-009	3,42E-009	4,53E-010	2,36E-009	1,56E-009

Para os corpos de prova ensaiados à temperatura de 60°C, a equação que melhor se ajustou aos pontos experimentais foi a ‘Andrade’, conforme exemplificado na Tabela 8.

Tabela 8 - Exemplo de Comparação do Ajuste das Equações - Temperatura 60°C - Água 14

CP 16 (Água 14)					
	Potência + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,99	0,99	0,98	0,85	-
e0	0,55%	0,58%	0,61%	0,55%	0,56%
Tx. últ. 5h	1,82E-008	1,64E-008	1,17E-008	2,61E-008	1,49E-008
CP 17 (Água 14)					
	Potência + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,94	0,98	0,98	0,85	-
e0	0,30%	0,43%	0,45%	0,42%	0,39%
Tx. últ. 5h	1,55E-008	1,53E-008	1,24E-008	2,75E-008	1,57E-008
CP 18 (Água 14)					
	Potência + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,93	1	0,98	0,85	-
e0	0,83%	0,62%	0,67%	0,65%	0,62%
Tx. últ. 5h	1,24E-008	1,49E-008	1,17E-008	2,58E-008	1,51E-008

CP 19 (Água 14)					
	Potência + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,96	0,98	0,98	0,85	-
e0	0,44%	0,50%	0,52%	0,50%	0,48%
Tx. últ. 5h	1,30E-008	1,75E-008	1,12E-08	2,51E-08	1,43E-008
CP 20 (Água 14)					
	Potência + e0	Andrade	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,97	0,98	0,98	0,84	-
e0	0,15%	0,42%	0,44%	0,41%	0,40%
Tx. últ. 5h	1,16E-008	1,78E-008	9,98E-09	2,45E-08	1,34E-008

Uma vez definidas as melhores equações de ajuste para cada caso, todos os parâmetros necessários foram, então, obtidos através das respectivas equações, e não mais diretamente dos pontos experimentais.

4.5. Avaliação dos Resultados

4.5.1. Módulo de Young (E)

A primeira propriedade avaliada foi o módulo de Young, obtida indiretamente através da deformação elástica.

Cada valor de deformação elástica foi correlacionado de maneira inversamente proporcional ao módulo de Young do material através da equação da lei de Hooke, conforme equação 19. Uma vez que a carga aplicada nos ensaios de fluência foi a mesma para todos os corpos de prova, e também as dimensões nominais dos corpos de prova são iguais, a tensão nominal observada é a mesma em todos os casos.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (19)$$

Os valores de módulo de Young obtidos foram plotados em gráficos, conforme apresentado nas Figuras (21) e (22) para melhor visualização dos eventuais efeitos dos envelhecimentos e da temperatura. Os valores da abscissa não possuem significado físico, e foram escolhidos de maneira a possibilitar distinguir os diversos tipos de

envelhecimento. Vale ressaltar que nas Figuras (21), (23) e (24), está incluído um ponto denominado “Artigo”. Esse ponto foi adquirido de uma referência [5], que utilizou o mesmo material de estudo. E esse dado foi adicionado aos gráficos para permitir comparar os valores experimentais obtidos nesse trabalho com os da referência.

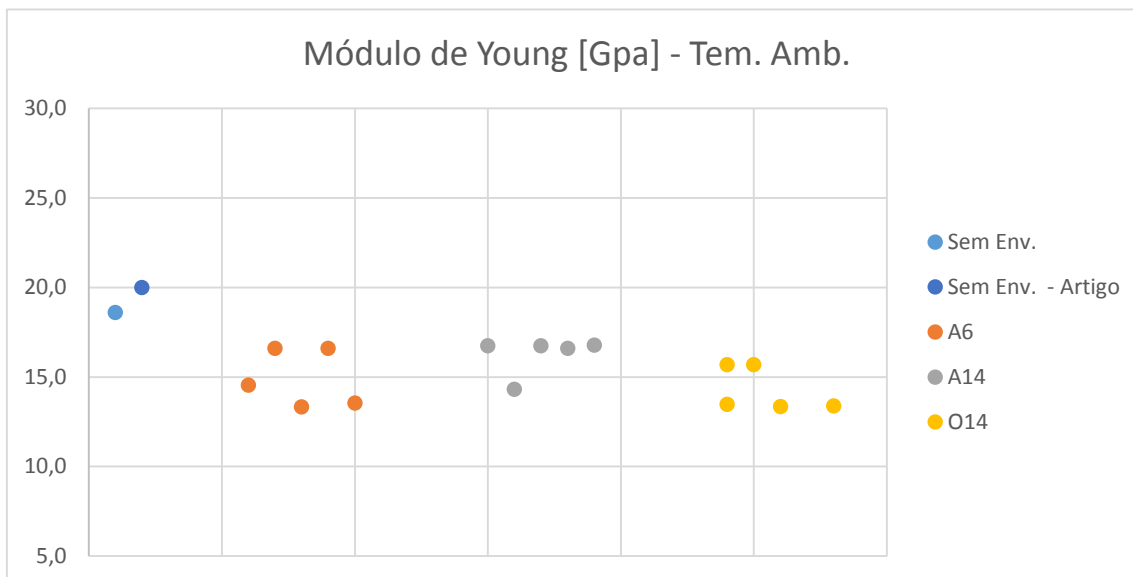


Figura 21 – Valores Calculados de Módulo de Young - Todos os CPs - Temp. Ambiente

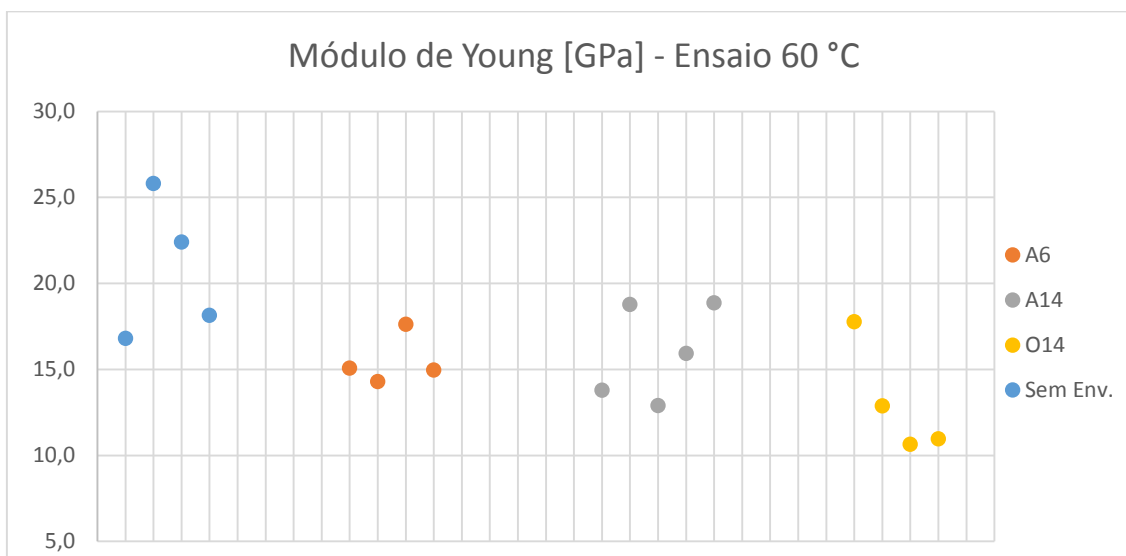


Figura 22 - Valores Calculados de Módulo de Young - todos os CPs - 60°C

Para cada tipo de envelhecimento calculou-se a média do módulo de Young, juntamente com o desvio padrão. Esses valores estão exibidos nas figuras (23) e (24).

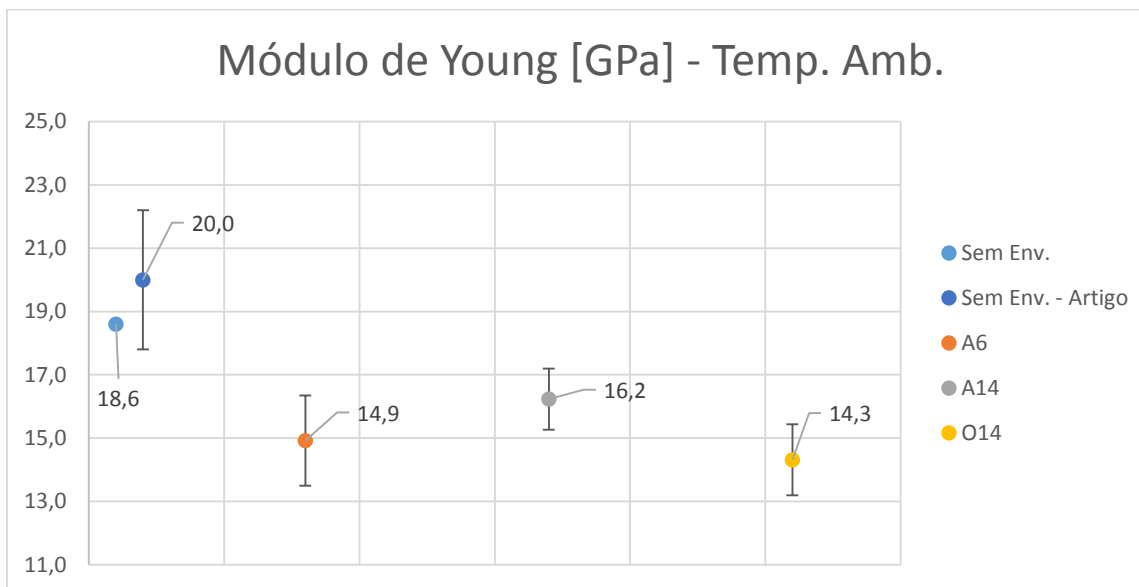


Figura 23 - Valores Médios de Módulo de Young Calculados para cada Grupo de Envelhecimento, com Barras de Desvio Padrão - Temperatura Ambiente

A primeira observação que pode ser feita é que o valor de módulo de Young do corpo de prova ‘Sem Env.’ testado neste trabalho está compatível com o valor encontrado no artigo usado como referência. [5]

Comparação entre envelhecimentos:

- ‘Sem Env.’ x A6 – É possível observar que houve uma queda representativa do módulo de Young devido ao envelhecimento. Tomando como referência o corpo de prova ‘Sem Env.’, tem-se uma diminuição percentual de 20%. O motivo da redução do módulo de Young é a própria difusão de água na matriz. A água atua como plastificante aumentando o espaço entre as macromoléculas, o que permite maior mobilidade dos átomos no que diz respeito à alteração dos ângulos das ligações primárias. Diminuindo sua rigidez.
- ‘A6’ x ‘A14 x O14’ – Não há variação expressiva no valor do módulo de Young. Utilizando o “Teste-t”, tem-se que estatisticamente os valores

do módulo não apresentam diferenças significativas entre os tipos de envelhecimento para essa condição de ensaio.

De maneira geral, então, observa-se que no caso de ensaios à temperatura ambiente, tem-se uma queda do módulo de Young devido aos envelhecimentos, no entanto, os fatores ‘tempo’ e ‘fluido de envelhecimento’ não foram relevantes. Dessa maneira os CPs A6, A14 e O14 apresentaram valores estatisticamente semelhantes entre si.

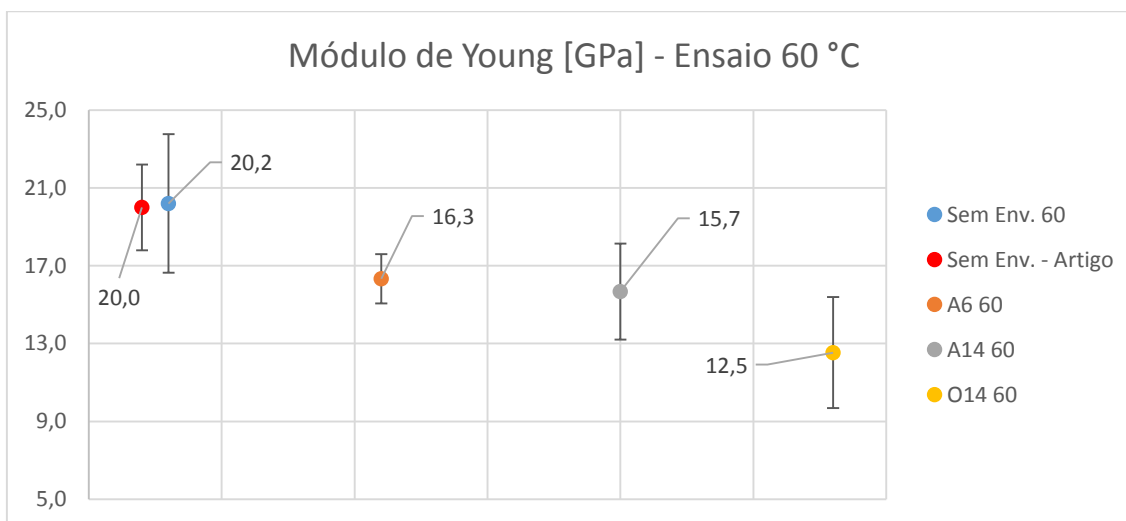


Figura 24 - Valores Médios de Módulo de Young Calculados para cada Grupo de Envelhecimento, com Barras de Desvio Padrão – 60°C

Como primeira observação tem-se que os valores de módulo de Young encontrados experimentalmente nos corpos de prova ‘Sem Env.’ deste trabalho estão compatíveis com o valor encontrado no artigo usado como referência [5]. O que já indica que esse material não tem o módulo de Young muito afetado quando ensaiado à temperatura ambiente ou a 60°C.

- ‘Sem Env.’ x ‘A6’ – Nota-se uma queda representativa do módulo de Young devido ao envelhecimento em água. Tem-se uma diminuição de 19%. Novamente é provável que a difusão de água tenha plastificado a matriz, diminuindo a rigidez do compósito.

- 'A6' x 'A14' – A variação do módulo de Young é desprezível. O “Teste-t” indica que não há diferença estatística significativa. Isso também pode ser observado através dos valores de média, que são diferentes por apenas 4%, e pelas barras de desvio padrão, que estão completamente sobrepostas.
- 'Sem Env.' x 'O14' – O valor do módulo dos CPs envelhecidos em óleo foi consideravelmente menor que os 'Sem Env.'. Observa-se uma queda de 38% no módulo de Young do material. Observa-se ainda que as barras de desvio padrão não estão nem um pouco sobrepostas. Esse valor de maior queda no módulo pode ser explicado pelo fato de a viscosidade do óleo, que está difundido na matriz, ser reduzida quando exposto à temperatura de 60°C. Conforme Figura 41 no anexo 2, a viscosidade de um óleo lubrificante é reduzida aproximadamente 10 vezes quando a temperatura varia de 20°C para 60°C, enquanto a água apresenta redução de aproximadamente 2,5 vezes. Além disso, o valor absoluto da viscosidade da água já é muito baixo em relação à do óleo (em torno de 250 vezes menor). Portanto o efeito da redução da viscosidade do óleo é mais intenso sobre as propriedades do material que o efeito causado pela redução da viscosidade da água. Isso justificaria haver diferença das propriedades dos CPs envelhecidos em óleo, quando comparados os ensaios à temperatura ambiente com os à temperatura de 60°C. Ao mesmo tempo justificaria não haver diferença de comportamento nos CPs envelhecidos em água e ensaiados nessas mesmas temperaturas.

De maneira geral observa-se, tanto nos CPs ensaiados à temperatura ambiente quanto nos ensaiados a 60°C, que o envelhecimento em água reduz o módulo de Young. O tempo de envelhecimento, considerados os tempos envolvidos nesse trabalho, não é relevante para afetar consideravelmente o módulo de Young. E o óleo lubrificante apresentou efeito mais intenso quando exposto à temperatura de 60°C. Pode-se concluir também que o óleo não envelheceu quimicamente o material, visto que apresentou o mesmo tipo de efeito sobre o módulo de Young que a água nos ensaios em temperatura

ambiente, e só teve efeito mais drástico que a água quando ensaiado em temperatura mais elevada.

Para fins de comparação dos efeitos somente da temperatura nos ensaios, ou seja, entre os ensaios feitos à temperatura ambiente e os feitos à temperatura de 60°C, um único gráfico com todos os valores de média de módulo de Young foi gerado. Os dados foram agrupados por tipo de envelhecimento e, novamente, o valor da abscissa não tem significado físico e foi definido somente com o intuito de permitir distinguir os tipos de envelhecimento.

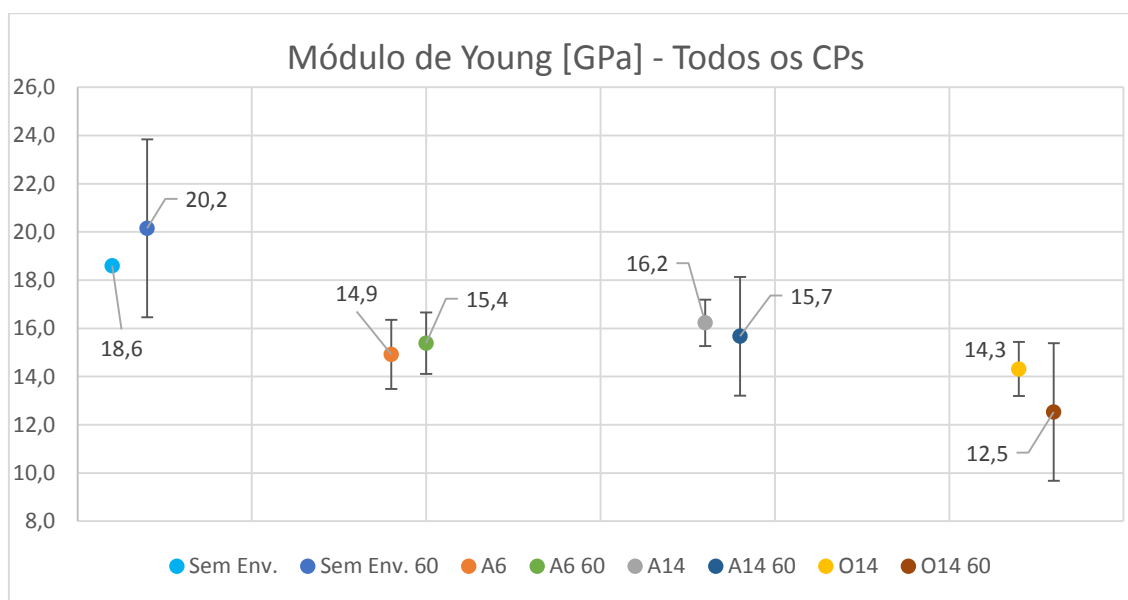


Figura 25 – Valores de Módulo de Young Médio Calculados para cada Grupo de Envelhecimento, com Barras de Desvio Padrão – Todos os CPs

É possível verificar que nos casos ‘Sem Env. x Sem Env. 60’, ‘A6 x A6 60’ e ‘A14 x A14 60’ a temperatura de ensaio não foi fator determinante para os valores de módulo de Young. Já no caso de ‘O14 x O14 60’, houve uma redução do módulo, provavelmente devido à redução da viscosidade do óleo difundido no material. De maneira geral os valores médios estão muito próximos entre si, com variação máxima de 13% no caso dos CPs envelhecidos em óleo, e, principalmente, pelo fato de que todas as barras de desvio padrão estão totalmente sobrepostas, pode-se afirmar que a

temperatura do ensaio não influenciou significativamente o módulo de Young do material.

E, mais uma vez, torna-se perceptível que há redução do módulo de Young dos CPs sem envelhecimento para os envelhecidos em água. O tempo de envelhecimento não foi relevante para esse parâmetro. Isso sugere que no tempo de 6 meses o material já estava saturado de água, e já havia plastificado ao máximo.

4.5.2. Deformação Devido à Fluência Secundária (e_s)

A deformação devido à fluência secundária foi calculada através das equações previamente selecionadas para ajuste dos pontos experimentais conforme equação (20).

$$e_s = e_{28800} - e_{10800} \quad (20)$$

Onde,

e_{14400} – deformação calculada pela respectiva equação de ajuste para $t=28800s$
(8h)

e_{5400} – deformação calculada pela respectiva equação de ajuste para $t=10800s$
(3h)

Três gráficos foram gerados com os dados de ‘ e_s ’ (Figuras 26, 27, 28):

- Ensaios à temperatura ambiente
- Ensaios a 60°C
- Todos os ensaios

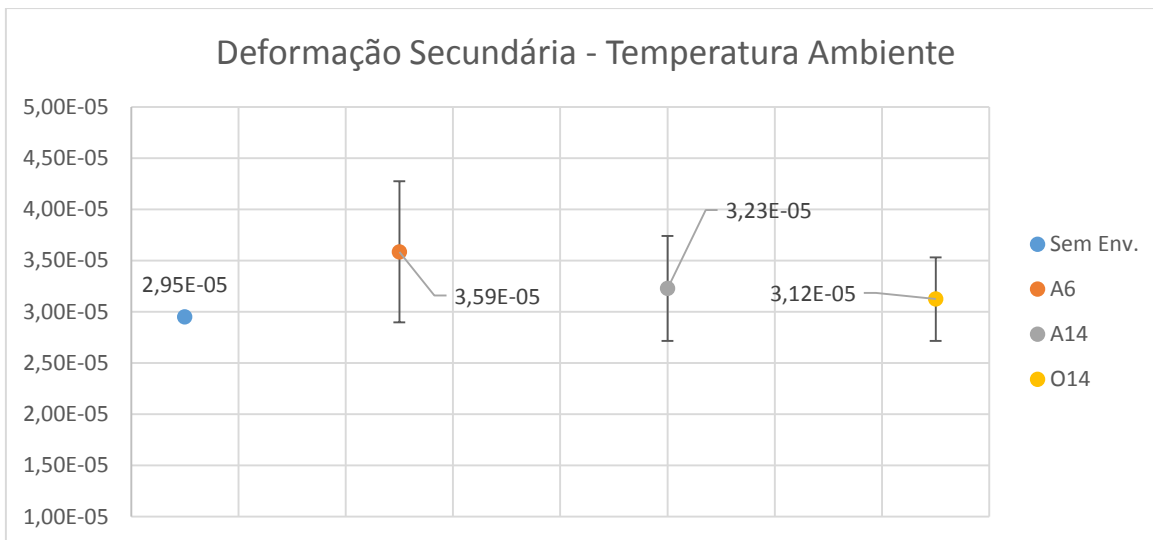


Figura 26 – Valores Médios de Deformação devido à Fluência Secundária, com Barras de Desvio Padrão - Temperatura Ambiente

Utilizando o “Teste-t”, tem-se que estatisticamente os valores de ‘es’ não apresentam diferenças significativas entre os tipos de envelhecimento para essa condição de ensaio. Portanto, o envelhecimento não influenciou a deformação devido à fluência na região estacionária nos ensaios à temperatura ambiente.

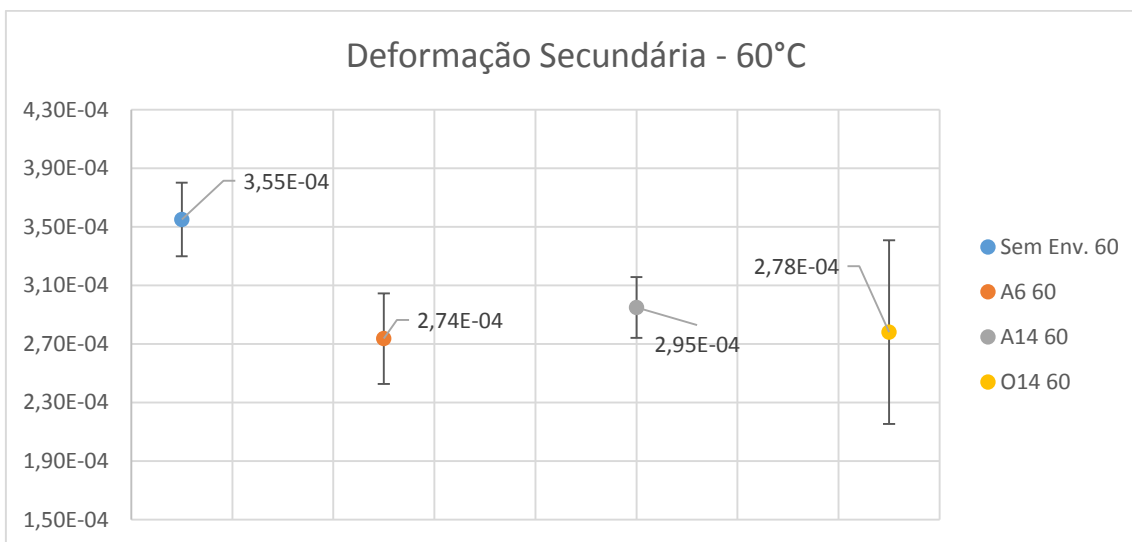


Figura 27 – Valores Médios de Deformação devido à Fluência Secundária, com Barras de Desvio Padrão - 60°C

De acordo com os resultados do “Teste-t”, tem-se que há redução em e_s dos CPs ‘Sem Env. 60’ para os ‘A6 60’, no entanto, entre os CPs envelhecidos não há diferença estatisticamente significante.

O fato de haver perda de rigidez da matriz ocasiona uma maior transferência de carga para as fibras, conforme estabelece a equação de transferência de carga em compósitos [1]:

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{E_f}{E_m} \cdot \frac{V_f}{V_m} \quad (21)$$

Onde,

P_f – Fração da carga total percebida pela fibra

P_m – Fração da carga total percebida pela matriz

E_f – Módulo de Young da fibra

E_m – Módulo de Young da matriz

V_f – Fração volumétrica de fibra

V_m – Fração volumétrica de matriz

Uma vez que V_f e V_m são constantes, tem-se:

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{E_f}{E_m} \cdot k$$

Observa-se, então, que quando E_m é reduzido e E_f não se altera, a razão ' $\frac{P_f}{P_m}$ ' aumenta, o que significa que uma parte maior da carga está sendo transferida para o reforço. Consequentemente um percentual menor da carga é depositada sobre a matriz.

Para o material desse trabalho sem envelhecimento tem-se:

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{80}{4} \cdot \frac{0,3}{0,7} = 8,57$$

Como $P_f + P_m = P_{\text{total}} = 500\text{N}$, então:

$$\frac{500 - P_m}{P_m} = 8,57$$

$$P_m = 52,25N$$

$$P_f = 500 - 52,25 = 447,75N$$

Supondo que o material envelhecido apresente a matriz degradada de maneira a ter seu módulo de Young reduzido em 50%, os novos valores de carga nas fases seriam:

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{80}{2} \cdot \frac{0,3}{0,7} = 17,14$$

Novamente $P_f + P_m = P_{total} = 500N$, então:

$$\frac{500 - P_m}{P_m} = 17,14$$

$$P_m = 27,56N$$

$$P_f = 500 - 27,56 = 472,44N$$

Nessa situação hipotética a carga na matriz, de acordo com os cálculos, seria reduzida de 52,25 N para 27,56 N, enquanto a carga na fibra aumentaria de 447,75 N para 472,44 N.

Desse modo, uma vez que a rigidez da matriz é reduzida, a transferência de carga ocorre de maneira mais eficiente para as fibras. Assim a carga diminui na matriz, que é a fase que sofre fluência. E, em última análise, a taxa de fluência no compósito diminui.

A consideração de que somente a matriz sofre fluência baseou-se no fato de que o fenômeno da fluência é altamente dependente da relação da temperatura durante o processo com a temperatura de transição vítrea (T_g) do material. Para o vidro e o poliéster tem-se:

- $T_g(\text{vidro}) \approx 560^\circ\text{C}$ [7]
- $T_g(\text{poliéster}) \approx 90^\circ\text{C}$ [5]

Como os ensaios foram feitos à temperatura ambiente (25°C) e à temperatura de 60°C , e a temperatura de transição vítrea do poliéster é aproximadamente 90°C , o comportamento do poliéster já apresenta uma porção considerável de viscosidade, o

que permite o efeito de fluência. Já o vidro encontra-se em temperaturas muito distantes da transição vítrea, portanto o comportamento esperado para o vidro é o de um material rígido linear-elástico, portanto qualquer fluência das fibras de vidro pode ser desprezada.

Como uma aproximação calculou-se os valores de tensão percebidos por cada fase. Para isso utilizou-se a carga em cada fase anteriormente calculada e calculou-se a tensão de flexão por meio da Equação 12:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$$

$$\sigma_m = \frac{\frac{52,25 \cdot 100}{4} \cdot \frac{6,2}{2}}{504,5}$$

$$\sigma_m = 8MPa$$

$$\sigma_f = \frac{\frac{447,75 \cdot 100}{4} \cdot \frac{6,2}{2}}{504,5}$$

$$\sigma_f = 69MPa$$

Onde,

σ_m – tensão na matriz

σ_f – tensão na fibra

Comparando as tensões observadas por cada fase com suas respectivas resistências tem-se (valores de resistência obtidos das Tabelas 2 e 3):

$$\frac{\sigma_m}{S_{y_m}} = \frac{8}{55} = 14\%$$

$$\frac{\sigma_f}{S_{y_f}} = \frac{69}{2500} = 3\%$$

Ou seja, a carga aplicada no compósito gera na matriz uma tensão equivalente a 14% de sua resistência à ruptura. Na fibra a mesma carga gera uma tensão equivalente a 3% de sua resistência à ruptura. Portanto, levando em consideração a razão da

temperatura pela T_g , e a razão da tensão observada por cada fase pela respectiva resistência, pode-se concluir que a fluência somente ocorre na região da matriz, e as fibras não sofrem fluência.

Comparando todos os CPs num mesmo gráfico (Figura 28), pode-se observar que a taxa de deformação aumentou em 1 ordem de grandeza devido à temperatura. O que já era esperado, visto que a taxa de fluência é fortemente dependente da temperatura, conforme equação (4) da seção 2.2.1.ii.

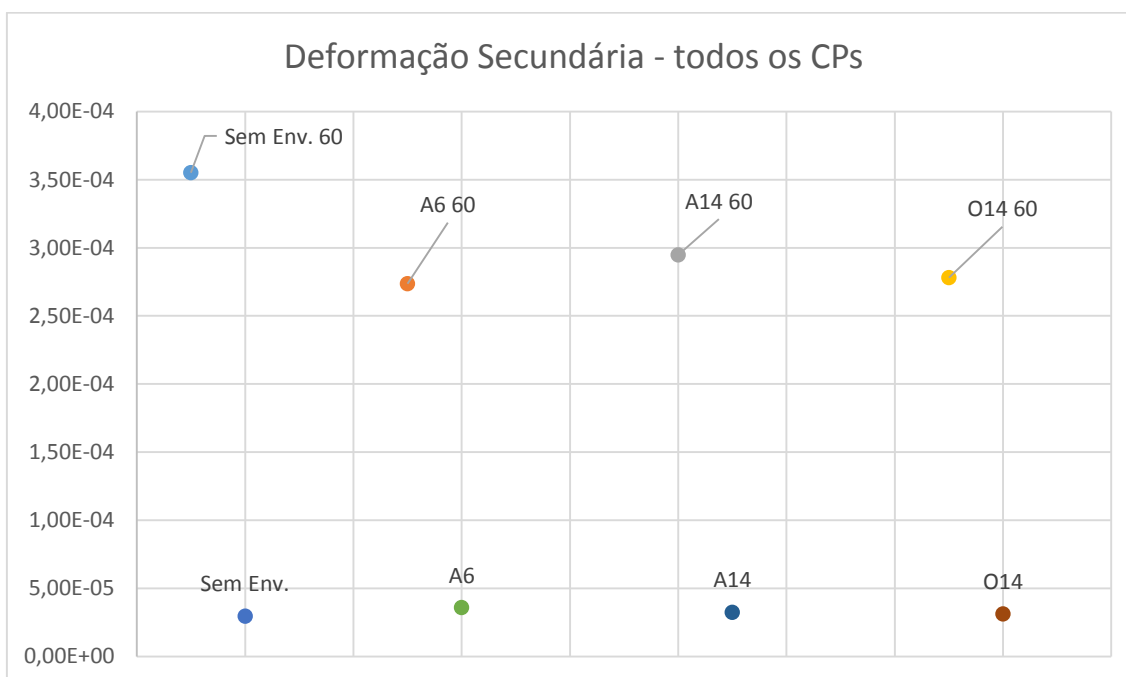


Figura 28 – Valores Médios de Deformação Devido à Fluência Secundária - Todos os CPs

Portanto, levando em consideração o explicado anteriormente a respeito da transferência de carga, conclui-se que a temperatura foi determinante para o comportamento dos CPs no período estacionário da fluência. No entanto, o envelhecimento apresentou maior efeito nos corpos de prova quando ensaiados em temperatura, o que permitiu uma maior transferência de carga para as fibras e, por fim, não permitiu que a taxa de fluência aumentasse tanto devido à temperatura quanto no caso dos corpos de prova sem envelhecimento.

4.5.3. Deformação Devido à Fluência Primária (e_p)

A deformação devido à fluência foi calculada pela equação (21):

$$e_p = e_t - e_0 - e_s \quad (22)$$

A deformação total (e_t) foi obtida diretamente dos dados experimentais em $t = 8h$.

A deformação elástica (e_0) foi obtida conforme seção 4.4.1.

A deformação devido à fluência secundária (e_s) foi obtida conforme seção 4.4.2.

Os valores médios de ' e_p ' para ensaios à temperatura ambiente estão representados na figura 29.

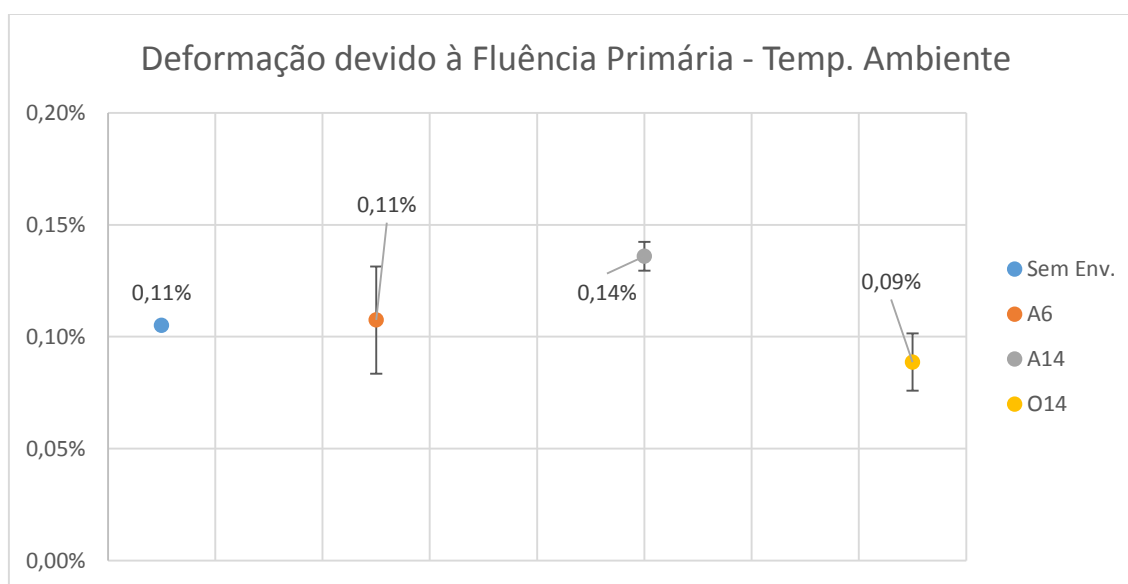


Figura 29 – Valores Médios de Deformação Devido à Fluência Primária (e_p), com Barras de Desvio Padrão - Temperatura Ambiente

Conforme resultado do “Teste-t”, todos os valores de e_p ensaiados à temperatura ambiente são equivalentes em termos estatísticos. Portanto os envelhecimentos não influenciaram significativamente a deformação total dos CPs durante o período primário da fluência quando ensaiados à temperatura ambiente. No entanto, isso é simplesmente uma medida do quanto os CPs deformaram no período das primeiras 3h de ensaio. E o fato da deformação ser a mesma, não significa que o comportamento durante esse período tenha sido o mesmo para todos os CPs. Ou seja, a variação de deformação no período foi a mesma, mas a curva não necessariamente é a mesma.

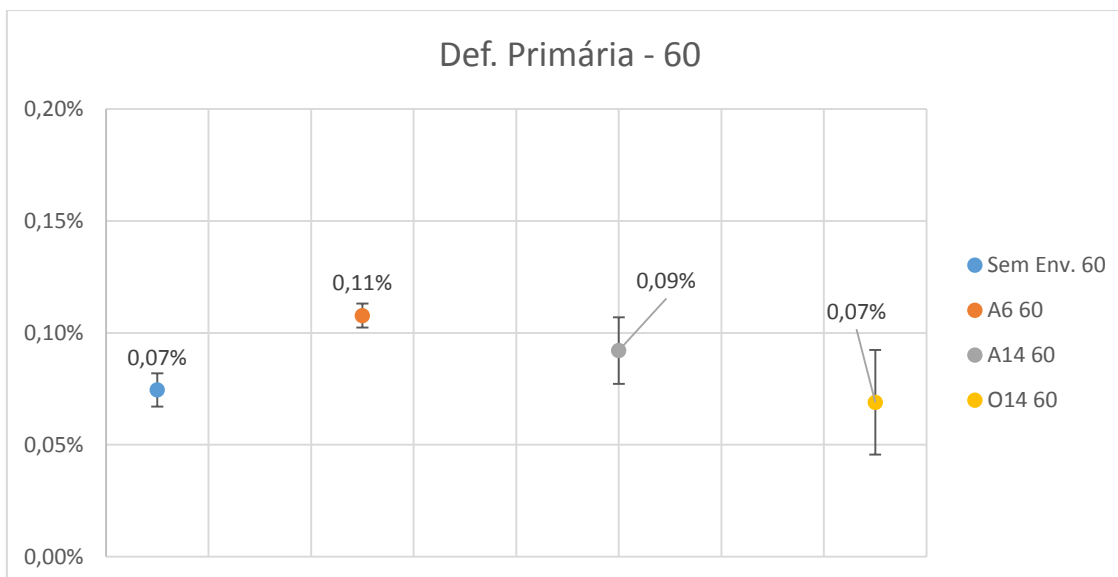


Figura 30 – Valores Médios de Deformação devido à Fluência Primária (ep), com Barras de Desvio Padrão – 60°C

Também para os ensaios a 60°C também foram obtidos valores de deformação primária estatisticamente equivalentes, segundo o “Teste-t”, como observado na Figura 30.

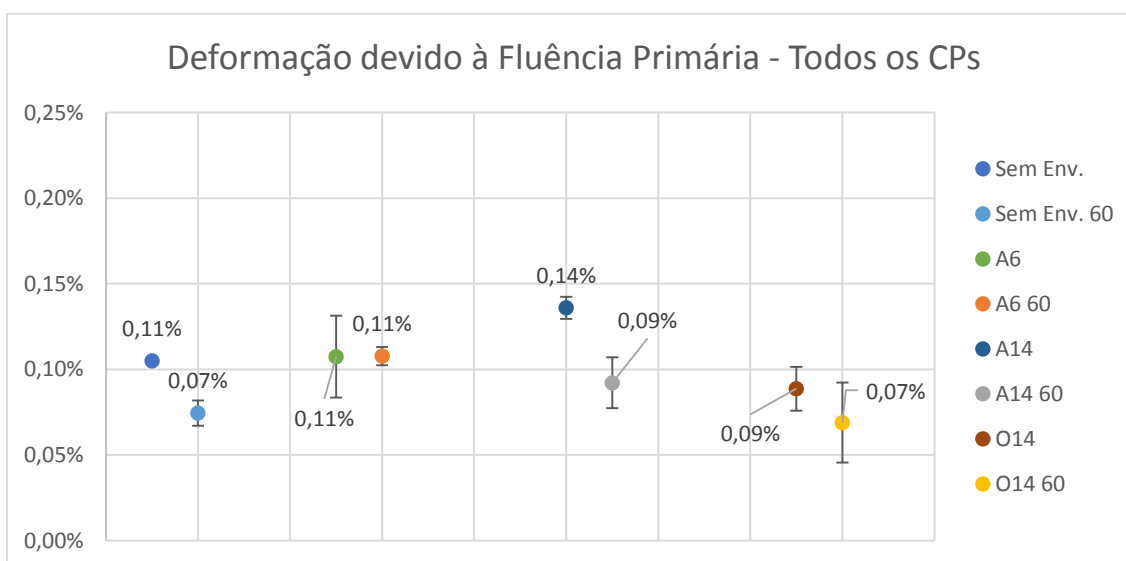


Figura 31 – Valores Médios de Deformação devido à Fluência Primária (ep), com Barras de Desvio Padrão - Todos os CPs

Observa-se, no entanto, que há uma tendência de os corpos de prova testados em temperatura de 60°C apresentarem deformações primárias menores que os que foram testados à temperatura ambiente, como pode ser observado na Figura 31. Uma possível explicação seria que em temperaturas elevadas, a taxa de deformação inicial é maior, fazendo com que a velocidade dos processos de aumento de resistência mecânica devido à deformação sejam maiores e mais intensas. Com isso, esse material chega à fluência secundária mais rapidamente. E a taxa de deformação na região estacionária é a menor possível para todo o evento de deformação por fluência. Como um tempo fixo de 3h foi considerado como fluência primária para a análise dos dados, e esse material entrou na região secundária antes das 3h, a deformação total nesse período foi menor.

Um gráfico hipotético e simplesmente esquemático é apresentado na Figura 32, de modo a se demonstrar essa análise de dois materiais sendo ensaiados em temperaturas diferentes.

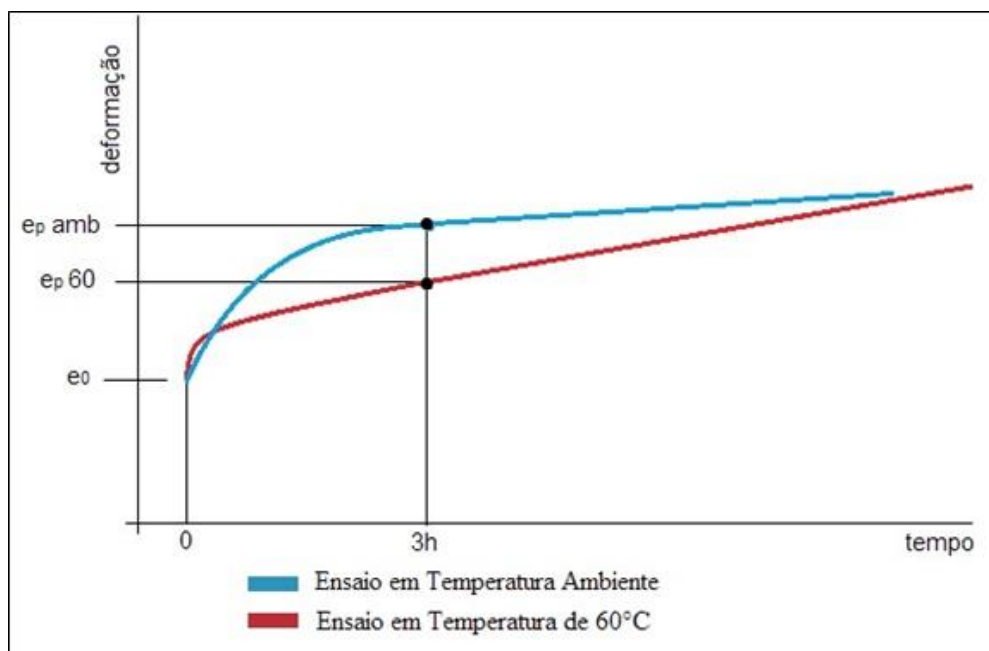


Figura 32 – Gráfico Esquemático de Velocidades Diferentes da Variação da Taxa de Deformação em Função da Temperatura de Ensaio

4.5.4. Deformação Total (e_t)

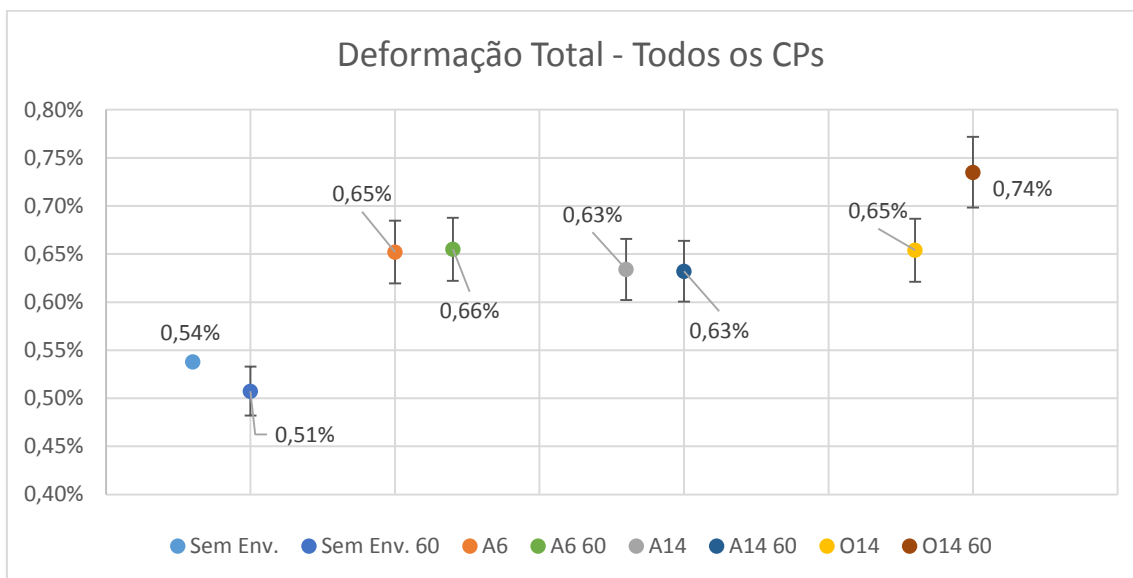


Figura 33 - Valores Médios de Deformação Total (e_t) nos Ensaio de 8 Horas de Duração, com Barras de Desvio Padrão - Todos os CPs

Observando a deformação total (e_t) dos CPs durante o período completo de 8h de ensaio, nota-se uma clara distinção entre o material sem envelhecimento e os envelhecidos. No entanto, quando um único gráfico é plotado para todos os tipos de ensaios (Figura 33), o tempo de envelhecimento e o fluido utilizado parecem não influenciar na deformação total.

Comparações:

- ‘Sem Env.’, ‘Sem Env. 60’ x ‘A6’, ‘A6 60’, ‘A14’, ‘A14 60’, ‘O14’ – Nota-se que há um aumento de aproximadamente 25% da deformação total nos CPs envelhecidos. Considerando que a deformação total é dada pela soma $e_t = e_0 + e_p + e_s$, e que e_0 foi o termo de maior valor, era esperado que o comportamento do material com respeito à deformação total fosse semelhante ao comportamento da deformação elástica. Os CPs ‘A6’, ‘A6 60’, ‘A14’, ‘A14 60’, ‘O14’ não apresentam diferença estatisticamente significativa entre si, segundo o “Teste-t”.

- ‘Sem Env.’, ‘Sem Env. 60’ x ‘O14 60’ – Para o caso dos CPs ‘O14 60’ houve um aumento maior da deformação total (42%). Devido à alta deformação elástica, esse foi o caso em que se obteve maior valor de deformação total.

Vale ressaltar que a deformação elástica foi predominante nesses ensaios porque o tempo de fluência foi pequeno. Para peças e equipamentos sob serviço real, o período de fluência pode durar tanto tempo quanto a peça for usada, o que significa eventualmente mais de 20 anos. E, sabendo que a taxa de fluência se mantém estável por todo esse tempo, tem-se que a deformação devido à fluência será cada vez maior e progressivamente mais relevante na deformação total.

4.5.5. Taxa de Fluência (\dot{e}_s)

A taxa de fluência foi calculada considerando que o comportamento de deformação era suficientemente linear para que se pudesse usar a equação (22):

$$tx = \frac{e_{14400} - e_{5400}}{t_{14400} - t_{5400}} \quad (23)$$

Onde,

e_{14400} – deformação no ponto experimental de número 14400 (ponto da hora 8 do ensaio)

e_{5400} – deformação no ponto experimental de número 5400 (ponto da hora 3 do ensaio)

t_{14400} – tempo no ponto experimental de número 14400 (8h convertido para segundos)

t_{5400} – tempo no ponto experimental de número 5400 (3h convertido para segundos)

Para os resultados, foram calculadas as médias em cada tipo de envelhecimento com seus respectivos desvios padrões e distribuídos em 3 gráficos (Figuras 34, 35 e 36):

- Ensaios à temperatura ambiente

- Ensaios à temperatura de 60°C
- Todos os ensaios

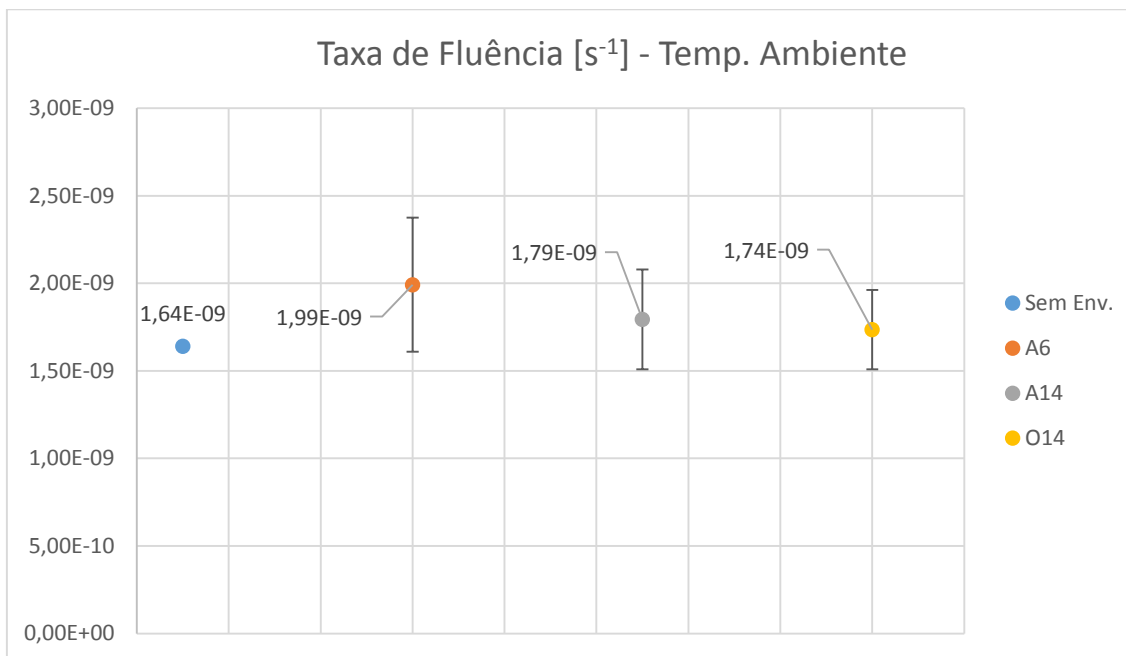


Figura 34 – Valores Médio de Taxa de Fluência ($\dot{\epsilon}_s$), com Barras de Desvio Padrão – Temperatura Ambiente

Os valores de taxa de fluência dos CPs ensaiados à temperatura ambiente não apresentaram variação estatística significativa segundo o “Teste-t”. Essa informação também é claramente observável pelas barras de desvio padrão, que estão todas quase que completamente sobrepostas (Figura 34).

O comportamento da taxa de fluência é muito semelhante ao da deformação devido à fluência secundária (ϵ_s), visto que a taxa foi calculada usando o valor de ϵ_s e dividindo-o pelo respectivo tempo de ensaio.

Em última análise verificou-se que nenhum dos envelhecimentos que foram feitos nesse trabalho afetou a taxa de fluência dos CPs quando ensaiados à temperatura ambiente. Nem mesmo alterando o tempo de exposição ou o tipo de fluido foi possível criar uma alteração perceptível no comportamento à fluência estacionária.

Na avaliação dos valores de taxa de fluência dos CPs ensaiados a 60°C nota-se uma redução considerável da taxa de fluência dos CPs sem envelhecimento para os envelhecidos. O motivo para isso é a redução do módulo de Young, que, conforme explicado anteriormente, melhora a transferência de carga da matriz para as fibras. Dessa maneira, a carga e, conseqüentemente, a tensão na matriz caem. Novamente, como a fase que sofre fluência é a matriz, e a tensão nela foi reduzida, a taxa de fluência tem a tendência de ser reduzida também.

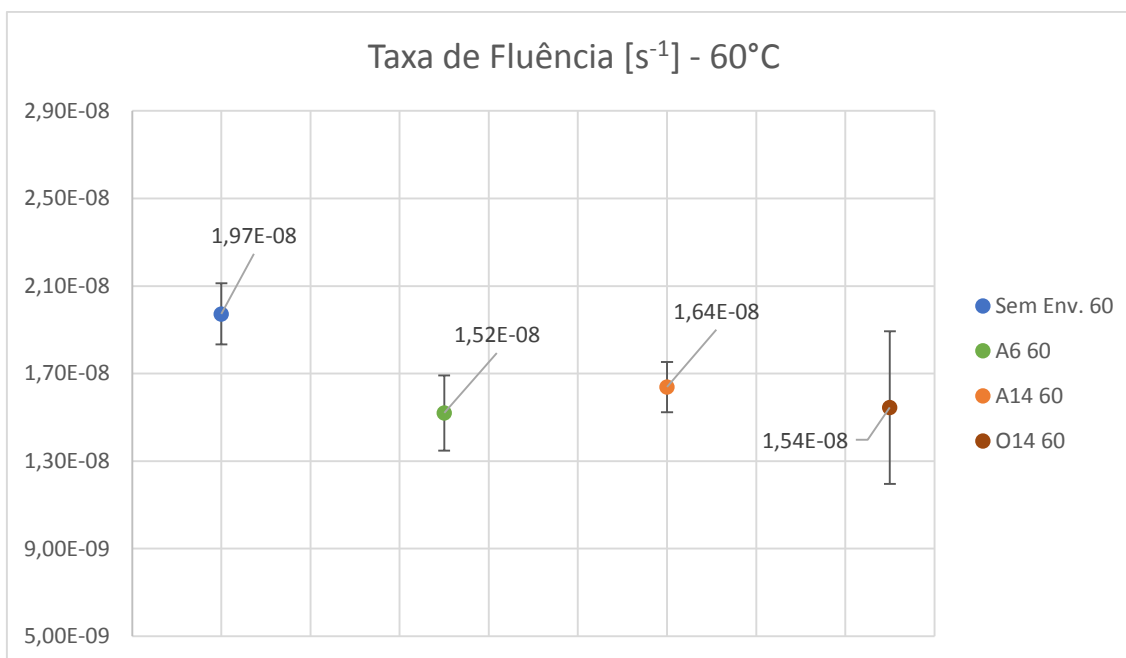


Figura 35 - Valores Médio de Taxa de Fluência ($\dot{\epsilon}_s$), com Barras de Desvio Padrão – 60°C

Comparando os três grupos de CPs envelhecidos, o “Teste-t” mostrou que não há diferença estatística significativa. Percebe-se, então, que o tempo de envelhecimento não foi capaz de alterar a taxa de fluência. Provavelmente porque o material já estava saturado quando chegou aos 6 meses, portanto não absorveu mais água nos 8 meses seguintes.

Quanto ao envelhecimento em óleo (O14), o fato de não apresentar efeito sobre a taxa de fluência diferente da apresentada pela água (A14) sugere que não tenha havido

envelhecimento químico sobre o material, uma vez que a água não reage quimicamente, em níveis expressivos, com o polímero termorrígido em questão.

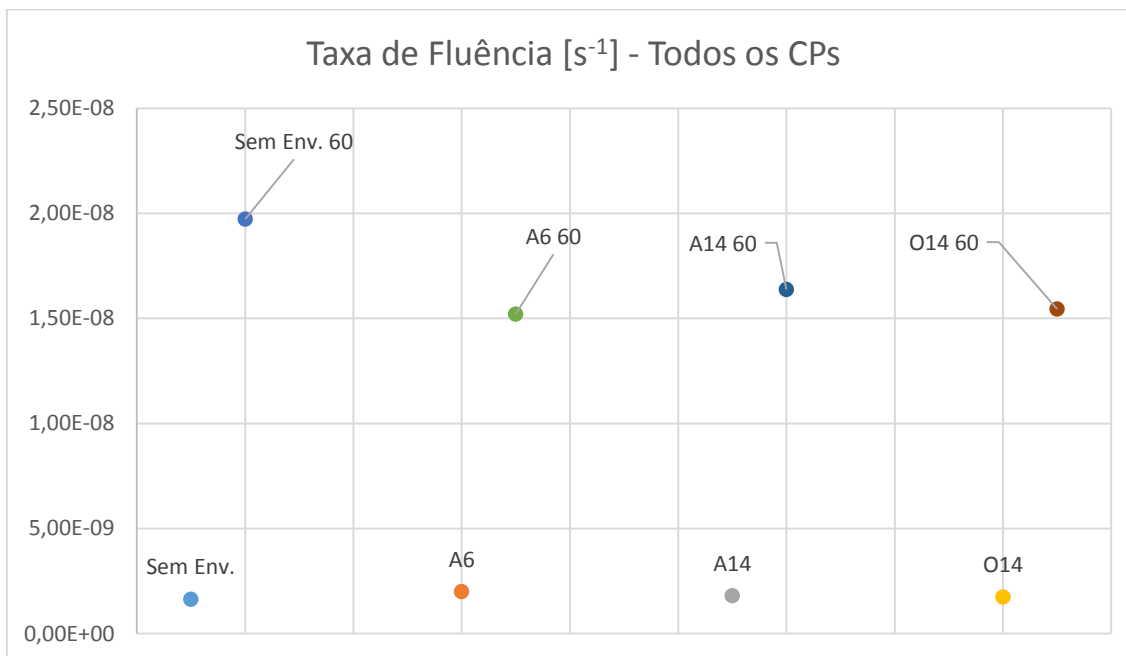


Figura 36 - Valores Médio de Taxa de Fluência ($\dot{\epsilon}_s$) – Todos os CPs

Comparando os ensaios nas duas temperaturas, conforme apresentado na Figura 36, nota-se a maior taxa de fluência dos CPs ensaiados a 60°C, consequência da alta influência da temperatura no processo da fluência. De acordo com a equação (4), tem-se que a taxa de fluência varia de maneira exponencial em função da temperatura.

Nota-se que a taxa de fluência aumentou basicamente de uma ordem de grandeza. No entanto, pode-se também observar que os CPs envelhecidos não foram tão influenciados pela temperatura quanto os sem envelhecimento. O envelhecimento e a temperatura parecem ter funcionado de maneira sinérgica sobre o módulo de Young, de maneira que o efeito total se mostrou mais intenso que a soma dos efeitos isoladamente.

Isso pode ser verificado quando se comparam os CPs ensaiados em temperatura ambiente. É possível ver que o efeito isolado de qualquer dos envelhecimentos não foi perceptível.

Comparando os CPs ‘Sem Env.’ e ‘Sem Env. 60’, nota-se que a taxa de fluência aumentou de aproximadamente uma ordem de grandeza devido à influência da temperatura, conforme descrito na equação (4). E nesse aumento já está contemplado o efeito da redução do módulo de Young devido ao aumento da temperatura isoladamente.

Já, ao comparar os CPs envelhecidos ensaiados em temperatura ambiente com os envelhecidos ensaiados a 60°C, nota-se que o aumento da taxa de fluência não foi tão intenso quanto no caso dos sem envelhecimento. E como a variação de temperatura foi a mesma em todos os casos, a variação de módulo de Young deveria ser a mesma e, conseqüentemente, a variação da taxa de fluência deveria ser a mesma também. Parece, então, que houve algum outro fator influenciador além da temperatura e do envelhecimento. No entanto, os parâmetros foram controlados para que não houvesse esse tipo de ocorrência. Então pode-se concluir que foram os dois efeitos em conjunto que diminuíram de maneira mais intensa o módulo de Young da matriz dos CPs envelhecidos e ensaiados a 60°C e, conseqüentemente, não permitiram um aumento tão acentuado da taxa de fluência.

4.5.6. Vida à Fluência (V)

A vida à fluência de um componente é o tempo que resiste sob fluência até a falha. Para esse trabalho a falha foi definida como o instante em que a carga é máxima no ensaio de flexão. A partir desse ponto iniciam-se falhas por fratura de fibras, delaminação, deslizamento das fibras na matriz, escoamento da matriz etc. Então a resistência do material já começa a diminuir, e já não suporta os mesmos valores de carga que inicialmente.

Para o cálculo tomou-se a deformação obtida experimentalmente nos ensaios de flexão até a ruptura sofrida pelo material até o momento de carga máxima. Essa deformação foi considerada como deformação máxima permitida para o material.

A vida foi calculada pela equação (23):

$$V = \frac{e_{max} - e_0 - e_p}{\dot{e}_s} \quad (24)$$

Onde,

V – Vida à fluência [s]

e_{\max} – Deformação máxima permitida para o material.

e_0 – Deformação elástica

e_p – Deformação primária

\dot{e}_s – Taxa de fluência

Os valores de ‘ e_0 ’ e ‘ e_p ’ são subtraídos de ‘ e_{\max} ’ no cálculo da vida pois ambas as deformações podem ser consideradas instantâneas se comparadas ao tempo total de ensaio de fluência até a ruptura. Além disso, são deformações que não dependem do tempo, ou seja, são constantes. Com isso, o que sobra da subtração é uma parcela da deformação máxima permitida para o material (e_{\max}) que pode utilizada pela fluência secundária até a ruptura.

Para cada CP foi calculada a vida em dias conforme equação (24), e para cada tipo de envelhecimento foram calculadas as médias e desvios padrão. Os resultados estão representados nas Figuras 37, 38 e 39.

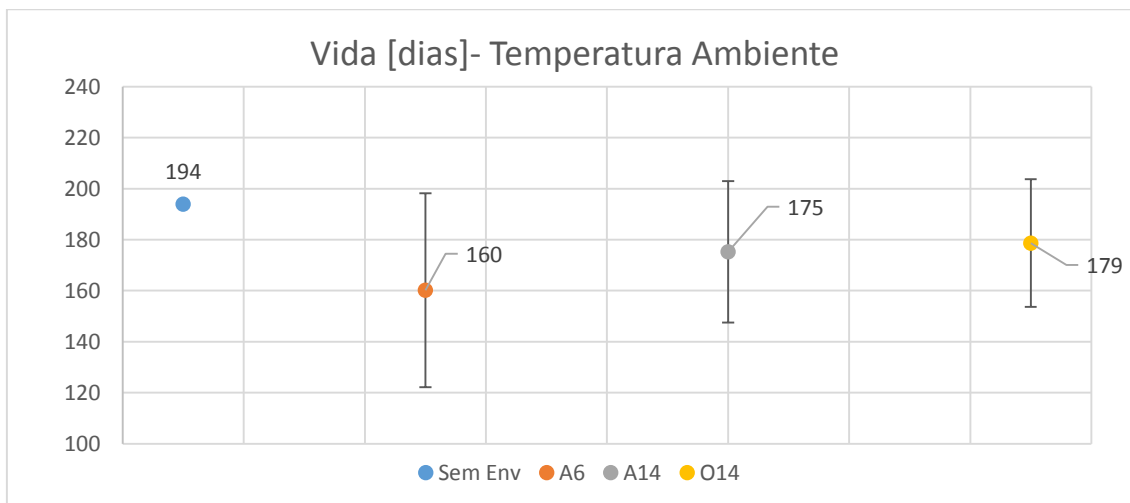


Figura 37 – Valores Médios da Vida Calculada, com Barras de Desvio Padrão - Temperatura Ambiente

Segundo o “Teste-t”, todos os valores de vida calculados para CPs ensaiados à temperatura ambiente não apresentam diferença estatisticamente significativa.

Principalmente devido ao espalhamento dos valores experimentais, visto que as médias variam consideravelmente.

Nota-se, no entanto, uma tendência de a vida dos corpos de prova envelhecidos serem mais curtas que a vida dos corpos de prova sem envelhecimento. Isso já era esperado visto que o envelhecimento tende a reduzir a rigidez do material, e especialmente envelhecimento em fluidos tendem a plastificar a matriz polimérica. E de maneira geral o envelhecimento degrada o material no sentido de fazê-lo perder propriedades mecânicas. Fatores esses que contribuem para a redução da vida à fluência do material.

Porém, a tendência de redução da vida à fluência não foi tão óbvia quanto esperado. O que denota uma baixa intensidade dos efeitos dos envelhecimentos. Um dos fatores responsáveis por isso é que nessas condições de ensaio, somente a matriz está sujeita à fluência, portanto qualquer envelhecimento que a fase de reforço tenha sofrido, não influencia no comportamento de fluência do material como um todo. Além disso, como a propriedade do compósito tem parcelas da matriz e da fibra, por mais que se reduzam as propriedades da matriz, isso afeta em menores proporções a propriedade do compósito. Isso exemplificado em números seria:

E_c - Módulo de Young do compósito

$E_m = 4 \text{ GPa}$ – Módulo de Young da matriz

$E_f = 80 \text{ GPa}$ - Módulo de Young da fibra

$V_m = 0,7$ – Fração volumétrica de matriz

$V_f = 0,3$ – Fração volumétrica de fibra

$$E_{c1} = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

$$E_{c1} = 80 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,7 = 26,8 \text{ GPa}$$

Supondo uma redução de 50% do módulo de Young da matriz:

$$E_{c2} = E_f \cdot V_f + V_m \cdot 0,5 \cdot E_m$$

$$E_{c2} = 80 \cdot 0,3 + 0,7 \cdot 0,5 \cdot 4 = 25,4 \text{ GPa}$$

Portanto, para uma redução de $0,5 \times 4 \text{ GPa} = 2 \text{ GPa}$ do módulo da matriz, reduz-se em $1,4 \text{ GPa}$ ($0,7 \times 2 \text{ GPa}$) o módulo do compósito. A variação da propriedade depende das frações volumétricas.

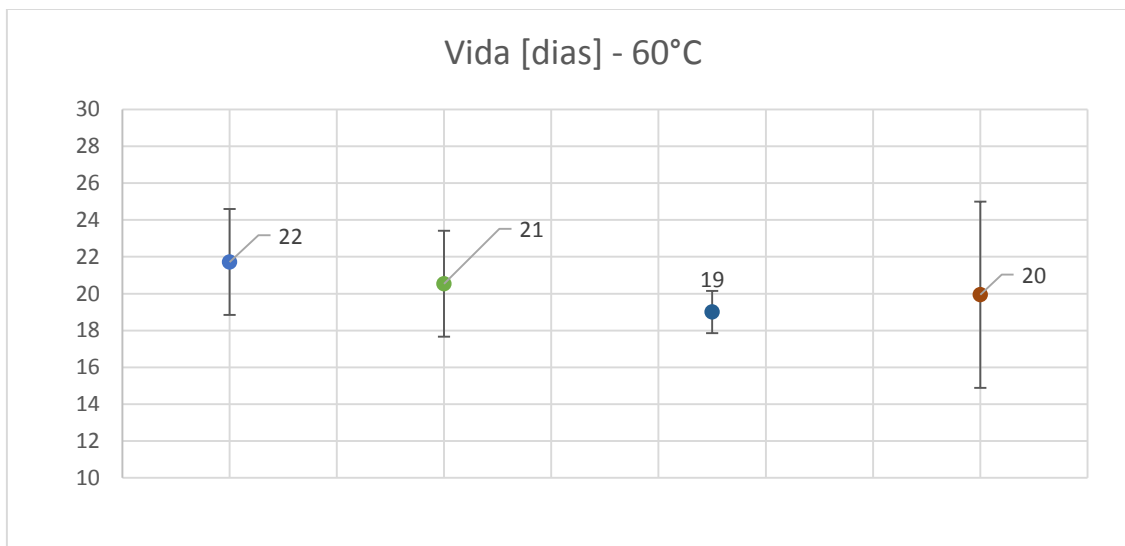


Figura 38 - - Valores Médios da Vida Calculada, com Barras de Desvio Padrão - 60°C

No caso dos CPs ensaiados a 60°C, novamente o “Teste-t” aponta que não há diferença estatisticamente significativa dos resultados, como pode ser observado na Figura 38. Porém, diferentemente dos CPs ensaiados à temperatura ambiente, não se nota qualquer tendência de alteração da vida dos CPs devido aos envelhecimentos. Isso indica que a temperatura foi muito mais importante para o comportamento da fluência que os envelhecimentos. Observando a equação (3), percebe-se que a temperatura influencia o valor da taxa de fluência de maneira exponencial e, por isso, dominou o comportamento à fluência.

Outra questão importante a ser notada é que nos ensaios em temperatura de 60°C, os CPs que tiveram maior deformação elástica, foram os que tiveram menores taxas de fluência, e vice-versa. Um efeito é consequência do outro, e ocorrem por conta da relação do módulo de Young com a transferência de carga matriz-fibra, conforme descrito na seção “Deformação Devido à Fluência Secundária”. Esses efeitos, em certo

nível, se compensaram, de modo que a vida final do material praticamente não foi afetada pelo envelhecimento.

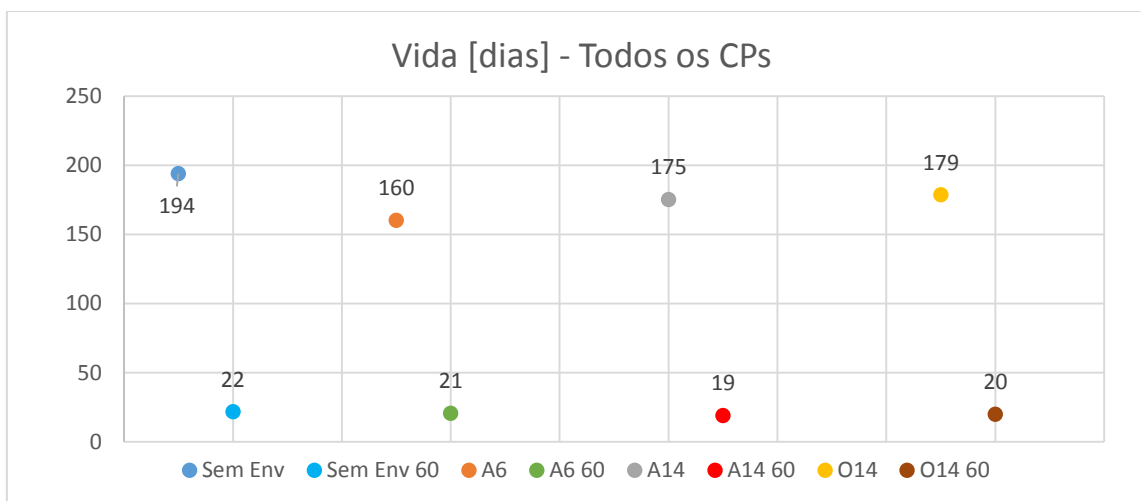


Figura 39 – Valores Médios da Vida Calculada - Todos os CPs

Na comparação dos ensaios em temperatura ambiente com os de 60°C, nota-se que a vida do material à fluência se reduziu em aproximadamente 9 vezes. Observando o comportamento da taxa de fluência em função da temperatura de ensaio, percebe-se que a taxa de fluência aumentou em aproximadamente 9 vezes nos ensaios a 60°C. Reforça-se, com isso, que a temperatura foi dominante no processo de fluência, controlando a vida do material. Nesse quesito os diversos envelhecimentos tiveram pouco efeito, sobre a vida, se comparados aos efeitos da temperatura.

4.5.6.1. Análise Adicional da Vida

A análise da vida em termos absoluto, no entanto, resultou em tempos muito curtos e longe do esperado para um material desse sob essas condições de carga e temperatura. Esse fato levou a uma análise adicional da taxa de fluência.

Nessa, um último corpo de prova sem envelhecimento foi ensaiado em temperatura ambiente por um período de 129,5h (5,3 dias). Da mesma maneira que foi feita com todos os outros CPs, valores de flecha foram convertidos em deformação e um gráfico foi gerado, para que se pudesse manipular as informações. Dos dados

obtidos desse CP, calculou-se que a taxa de fluência para as últimas 24h de ensaio foi de $8,47E-11 \text{ s}^{-1}$. Comparando com os valores de taxa de fluência encontrados nos ensaios de 8h à temperatura ambiente, nota-se que a taxa do ensaio de 129,5h é duas ordens de grandeza menor. E, finalmente, calculando a vida com essa nova taxa de fluência, tem-se um valor nominal de 18000 dias (49 anos).

Essa análise traz duas informações importantes à tona:

- Os ajustes das últimas 5 horas dos ensaios de 8 horas pareciam lineares, visto que retas eram ajustadas com coeficiente de determinação $R^2 > 0,90$. No entanto a respectiva região do gráfico ainda se encontrava na região transiente da fluência. Porém, essa aparente linearidade se deu por conta de se observar uma região proporcionalmente pequena, se comparada à curvatura dada pela variação da taxa de fluência. Outra característica que influenciou a análise do ensaio de 8 horas, foi que a variação da deformação era muito pequena a cada ponto de aquisição, em torno da resolução de leitura do equipamento, o que gerou gráficos muito escalonados levando a valores de R^2 maiores.
- Outra conclusão proveniente da análise de 129,5 horas é que não se pôde calcular o valor real da vida para os corpos de prova, visto que a taxa de fluência está consistentemente maior que a real. No entanto, comparativamente, a análise da vida apresentada é correta, já que todos os parâmetros foram padronizados (tempo de ensaio, temperatura, tipo de envelhecimento, tempo de envelhecimento, carga, dimensões dos CPs, dimensões do vão de flexão, dimensões dos roletes de carga etc.). Dessa maneira, o que foi medido em um CP é exatamente o que foi medido em todos os outros, portanto é válido compará-los.

Na Figura 40 é apresentado o gráfico gerado para o ensaio de 129,5h. Nele está indicado, aproximadamente, o período de 5 horas usado para o cálculo da taxa de

fluência de todos os CPs. Nota-se claramente que a taxa de fluência nesse período é muito maior que no período final do mesmo gráfico.

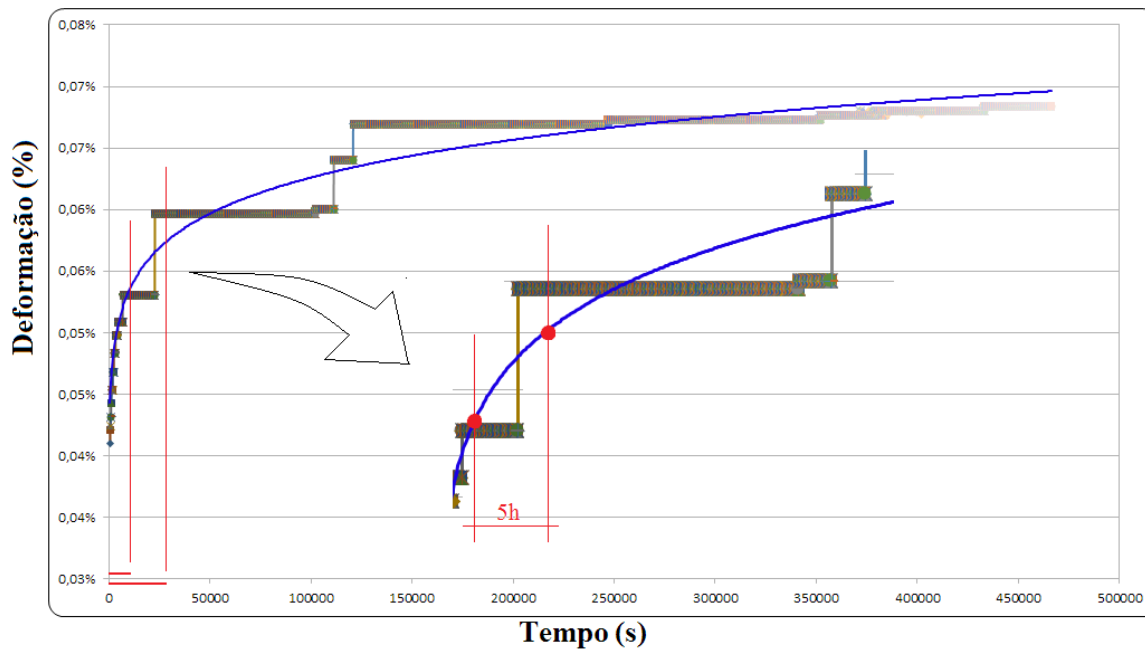


Figura 40 – Gráfico de Deformação (%) x Tempo[s] do ensaio de 129,5h

5. Conclusão

A temperatura foi dominante em todos os casos de ensaio, independentemente do tipo ou tempo de envelhecimento. Os efeitos da temperatura no processo de fluência foram tão intensos que determinaram inclusive os modelos que melhor se ajustaram aos pontos experimentais. Na temperatura de 25°C, o modelo de melhor ajuste foi o 'Pot+e0', enquanto que na temperatura de 60°C, o modelo de 'Andrade' foi o que melhor se ajustou aos pontos experimentais.

As equações de '3 parâmetros' e '4 parâmetros' não se ajustaram muito bem a nenhuma situação de ensaio. Essas equações são basicamente usadas para polímeros, e, embora a fase que sofre fluência desse compósito seja um polímero, um compósito é muito influenciado pelas fibras, no sentido que a taxa de fluência seria outra, caso se testasse a matriz isoladamente.

Os envelhecimentos não tiveram efeito significativo quando se variou o tempo ou o fluido. No entanto, de maneira geral, o envelhecimento influenciou o comportamento do material. Primariamente o módulo de Young foi alterado, os CPs envelhecidos apresentaram 'E' com valores menores. Isso teve como consequência uma melhor transferência de carga da matriz para as fibras, e conseqüentemente as taxas de fluência foram reduzidas. No entanto, isso não significou que a vida dos CPs envelhecidos tenha sido maior que a dos não envelhecidos, porque a deformação elástica inicial foi muito relevante, e quando 'E' diminui, 'e0' aumenta, e isso compensa a menor taxa de fluência.

Outro detalhe é que um equipamento que está sujeito à fluência e ao envelhecimento ao mesmo tempo, tem os efeitos do envelhecimento indefinidamente progressivos, e com o tempo, o envelhecimento começa a agir por outros meios, como rompimento de ligações, degradação da interface fibra-matriz e lixiviação de aditivos da matriz, dentre outros efeitos. Isso promoveria, provavelmente, que o comportamento observado de menor taxa de fluência nos CPs envelhecidos não ocorresse. Dessa maneira, a vida desses CPs seria reduzida não só por um valor de deformação elástica maior, mas também por uma taxa de fluência maior.

6. Sugestões para Trabalhos Futuros

Dados os resultados e observações feitos nesse trabalho, sugerimos as seguintes variações sobre o tema:

- Envelhecimento em temperatura;
- Ensaio mais longos;
- Pesar amostras e controle da variação volumétrica para verificar quantidade de fluido absorvido;
- Variar tempo de envelhecimento em óleo.

7. Referências bibliográficas

- 1 CALLISTER, W. D. JR. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais. Oitava edição. 817p. LTC Editora ISBN 978-85-216-2124-9,
- 2 MALKIN, A. Ya., ISAYEV, A. I. Rheology – Concepst, Methods, & Applications. First Edition. 474p. Chemtec Publishing ISBN 1-895198-33-X,
- 3 MAXWELL, A. S. et al. National Physical Laboratory Report DEPC MPR 016. Review of Accelerated Ageing Methods and Lifetime Prediction Techniques for Polymeric Materials. March 2005.
- 4 Toxicological Profile for Synthetic Vitreous Fibers (U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry), September 2004, p. 17
- 5 CHACÓN, Y. G. Análise de um Compósito Pultrudado – Microscopia Digital, Caracterização Mecânica e Envelhecimento. Tese de Doutorado, PUC-Rio. Rio de Janeiro – 2008.
- 6 ASTM D790 – 07. Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, United States.
- 7 www.azom.com/article.aspx?ArticleID=764. – E-Glass Fibre Acesso em julho 2015.
- 8 DIETER, GEORGE E., Mechanical Metallurgy., Second Edition. McGRAW-HILL KOGAKUSHA.
- 9 BAGHERPOUR, S. / BAGHERI, R. / SAATCHI, A. *Estimation of Long-Term Stiffness of Storage Aged GFRP Composite Samples Immersed in HCl Acid by TTSP Method*. Hindawi international Scholarly Research Notices, 2011. 7p.
- 10 TORRES, A. A. U. Envelhecimento *Físico Químico De Tubulações De Polietileno De Alta Densidade Empregadas Em Redes De Distribuição De Derivados De Petróleo*. 2007. 180p. Dissertação. PUC-Rio. Rio de Janeiro abril,2007.

- 11 GUEDES, R. J. M. Análise de Comportamento à Fluência de Materiais Compósitos. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 92p 1992
- 12 SHIGLEY, J. E. et al. Projeto de Engenharia Mecânica. 7ª Edição
- 13 REYES, B. Los plásticos reforzados em fibra de vidro (PRFV), sus aplicaciones y desarrollo em la indústria nacional. Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima 2002. Monografia de Graduação
- 14 FILHO, J. J. H. S. Reforço de Vigas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono. Tese de Doutorado PUC-Rio 2007
- 15 LUCAS, E. F. et al. Caracterização de Polímeros – Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. E-papers Serviços Editoriais Ltda., 2001 ISBN 85-87922-25-4
- 16 BROUGHTON, W. R. et al. National Physical Laboratory Report 13 - Life assessment and Prediction – Accelerated Test Method for Assessing Environmental Degradation of Composite Laminates. November 2000
- 17 www.ebah.com.br – JOSÉ, C., RENAN, C. - Seminário Materiais Cerâmicos e Materiais à base de Carbono
- 18 HULL, D. An Introduction to composite materials. New York: Cambridge University Press, 1985. 244p. ISBN 0 521 23991 5.
- 19 TORRES, A. A. U. Envelhecimento físico químico de tubulações de polietileno de alta densidade empregadas em redes de distribuição de derivados de petróleo, PUC-Rio, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, Abril de 2007

Anexo 1

Tabela 9 – Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – Temperatura Ambiente

CP 06 (Óleo 12)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,95	0,01	0,88	0,90	-
e0	0,59%	0,68%	0,68%	0,67%	0,60%
Tx. últ. 5H	1,80E-009	6,89E-009	1,35E-009	2,03E-009	1,82E-009
CP 07 (Óleo 12)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,86	0,63	0,72	0,75	-
e0	0,51%	0,59%	0,59%	0,59%	0,49%
Tx. últ. 5H	1,49E-009	3,13E-009	9,89E-010	1,81E-009	1,57E-009
CP 08 (Óleo 12)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,99	0,73	0,83	0,83	-
e0	0,60%	0,66%	0,65%	0,65%	0,61%
Tx. últ. 5H	2,09E-009	1,49E-009	2,25E-010	2,31E-010	2,10E-009
CP 09 (Óleo 12)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,82	0,60	0,62	0,88	-
e0	0,51%	0,61%	0,61%	0,49%	0,49%
Tx. últ. 5H	1,49E-009	1,38E-009	8,75E-010	2,60E-009	1,62E-009
CP 10 (Óleo 12)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,97	0,89	0,78	0,81	-
e0	0,60%	0,67%	0,67%	0,67%	0,60%
Tx. últ. 5H	1,81E-009	2,47E-009	1,02E-009	2,12E-009	1,73E-009

Tabela 10 - Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – Temperatura Ambiente

CP 21 (Agua 6)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,97	0,84	0,94	0,98	-
e0	0,55%	0,63%	0,63%	0,63%	0,60%
Tx. últ. 5H	1,83E-009	3,75E-009	1,52E-009	2,41E-009	2,11E-009
					-2,79E-001
CP 22 (Agua 6)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,90	0,69	0,76	0,80	-
e0	0,48%	0,61%	0,60%	0,60%	0,49%
Tx. últ. 5H	2,10E-009	4,01E-009	1,42E-009	2,78E-009	2,26E-009
CP 23 (Agua 6)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,53	0,60	0,76	0,80	-
e0	0,60%	0,66%	0,60%	0,60%	0,60%
Tx. últ. 5H	2,16E-009	3,02E-009	1,42E-009	2,78E-009	2,24E-009
CP 24 (Agua 6)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,81	0,68	0,72	0,73	-
e0	0,48%	0,58%	0,58%	0,58%	0,48%
Tx. últ. 5H	1,36E-009	3,04E-009	1,69E-009	1,87E-009	1,79E-009
CP 25 (Agua 6)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,95	0,84	0,84	0,87	-
e0	0,59%	0,71%	0,71%	0,70%	0,60%
Tx. últ. 5H	2,51E-009	3,24E-009	1,38E-009	2,97E-009	2,32E-009

Tabela 11 Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – Temperatura Ambiente

Sem Env.					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,97	0,98	0,98	1,00	-
e0	0,43%	0,52%	0,53%	0,53%	0,49%
Tx. últ. 5H	1,64E-009	2,40E-009	1,54E-009	1,92E-009	1,81E-009

Tabela 12 - Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – 60°C

CP A (Sem envelhecimento)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,99	0,99	0,99	0,93	-
e0	0,47%	0,48%	0,49%	0,46%	0,45%
Tx. últ. 5H	2,02E-008	2,14E-008	1,79E-008	2,78E-008	1,96E-008
CP B (Sem Envelhecimento)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,992	0,998	0,99	0,93	-
e0	0,27%	0,31%	0,34%	0,29%	0,30%
Tx. últ. 5H	2,21E-008	2,19E-008	1,81E-008	2,76E-008	1,93E-008
CP C (Sem Envelhecimento)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,97	0,99	0,99	0,93	-
e0	0,28%	0,36%	0,38%	0,33%	0,34%
Tx. últ. 5H	1,73E-008	2,00E-008	1,85E-008	2,94E-008	1,98E-008
CP E (Sem Envelhecimento)					
	Potência + e0	Eq. Livro	3 parâmetros	4 parâmetros	Medido no Gráfico
R ²	0,97	0,98	1,00	0,90	-
e0	0,38%	0,44%	0,46%	0,43%	0,44%
Tx. últ. 5H	2,21E-008	1,86E-008	1,67E-008	2,98E-008	1,71E-008

Tabela 13 - Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – 60°C

CP 11 (Óleo 12)					
	3 parâmetros	4 parâmetros	Potência + e0	Eq. Livro	Medido no Gráfico
R ²	0,98	1,00	0,99	0,96	-
e0	0,45%	0,44%	0,42%	0,45%	0,41%
Tx. últ. 5H	1,39E-008	1,69E-008	1,47E-008	1,93E-008	1,61E-008
CP 12 (Óleo 12)					
	3 parâmetros	4 parâmetros	Potência + e0	Eq. Livro	Medido no Gráfico
R ²	0,98	0,98	0,98	0,97	-
e0	0,64%	0,61%	0,50%	0,62%	0,58%
Tx. últ. 5H	1,00E-008	1,53E-008	1,29E-008	1,66E-008	1,25E-008
CP 14 (Óleo 12)					
	3 parâmetros	4 parâmetros	Potência + e0	Eq. Livro	Medido no Gráfico
R ²	0,98	0,89	0,98	0,98	-
e0	0,80%	0,75%	0,15%	0,75%	0,74%
Tx. últ. 5H	1,21E-008	2,24E-008	1,11E-008	1,61E-008	1,48E-008
CP 15 (Óleo 12)					
	3 parâmetros	4 parâmetros	Potência + e0	Eq. Livro	Medido no Gráfico
R ²	0,98	0,85	0,99	0,99	-
e0	0,76%	0,74%	0,30%	0,73%	0,73%
Tx. últ. 5H	9,11E-009	1,99E-008	1,06E-008	9,78E-009	1,14E-008

Tabela 14 - Tabela Comparativa de Equações de Ajuste – 60°C

CP 27 (Água 6)					
	3 parâmetros	4 parâmetros	Potência + e0	Eq. Livro	Medido no Gráfico
R ²	0,98	0,85	0,99	0,99	-
e0	0,58%	0,56%	0,53%	0,53%	0,52%
Tx. últ. 5H	1,27E-008	2,74E-008	1,67E-008	1,52E-008	1,47E-008
CP 28 (Água 6)					
	3 parâmetros	4 parâmetros	Potência + e0	Eq. Livro	Medido no Gráfico
R ²	0,98	0,84	0,98	0,98	
e0	0,59%	0,58%	0,54%	0,56%	0,50%
Tx. últ. 5H	1,22E-08	2,88E-008	1,87E-08	1,68E-008	1,47E-08
CP 29 (Água 6)					
	3 parâmetros	4 parâmetros	Potência + e0	Eq. Livro	Medido no Gráfico
R ²	0,98	0,85	0,95	0,99	-
e0	0,50%	0,47%	0,46%	0,45%	0,44%
Tx. últ. 5H	1,15E-008	2,66E-008	2,29E-008	1,24E-008	1,48E-008
CP 30 (Água 6)					
	3 parâmetros	4 parâmetros	Potência + e0	Eq. Livro	Medido no Gráfico
R ²	0,98	0,85	0,98	0,98	-
e0	0,58%	0,56%	0,52%	0,54%	0,50%
Tx. últ. 5H	1,25E-008	2,66E-008	1,61E-008	1,64E-008	1,46E-008
CP 31 (Água 6)					
	3 parâmetros	4 parâmetros	Potência + e0	Eq. Livro	Medido no Gráfico
R ²	0,93	0,89	0,98	0,97	-
e0	0,42%	0,37%	0,38%	0,37%	0,29%
Tx. últ. 5H	2,25E-008	2,38E-008	2,24E-008	2,36E-008	2,73E-008

Anexo 2

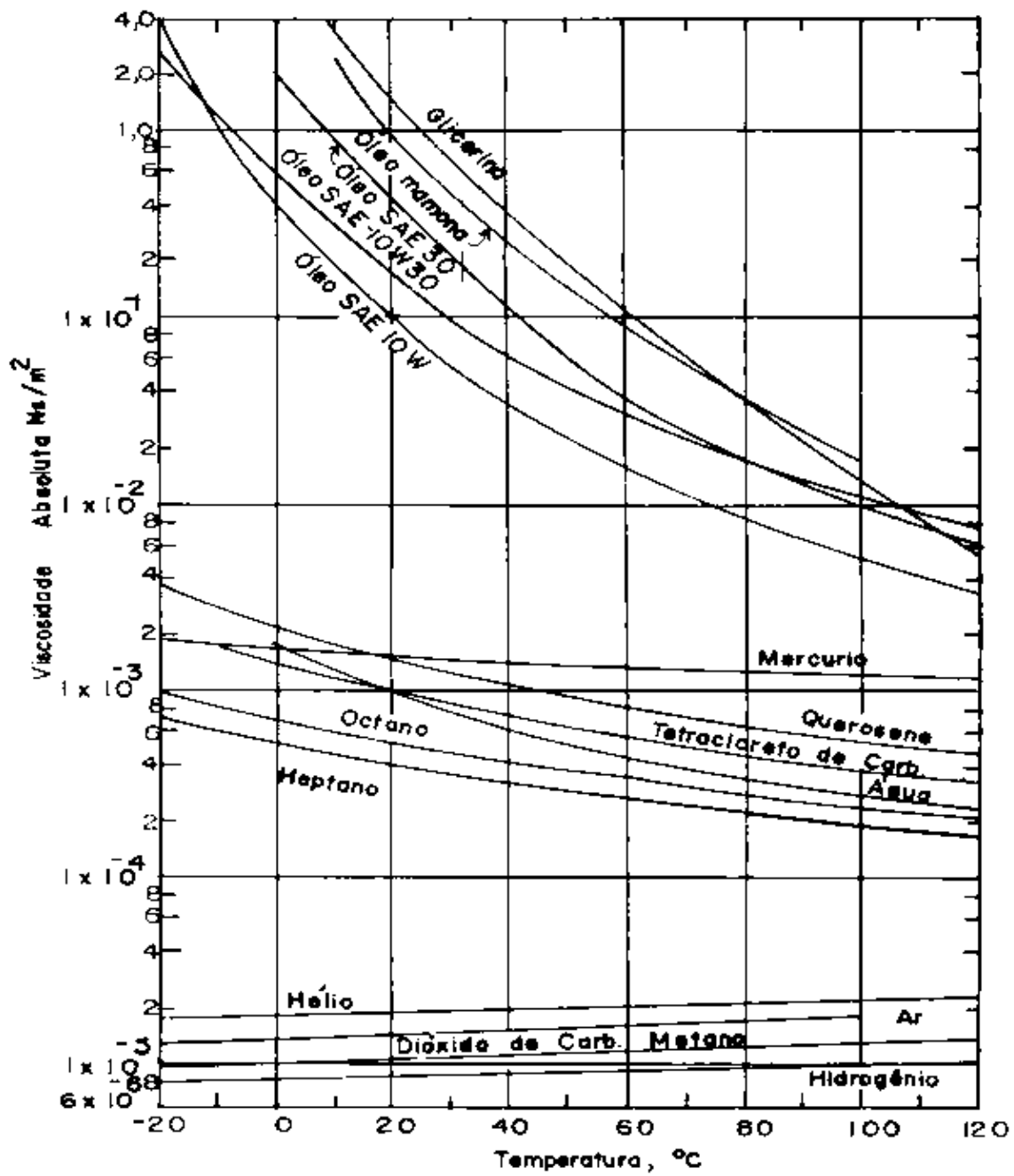


Figura 41 – Gráfico Viscosidade x Temperatura de alguns Fluidos

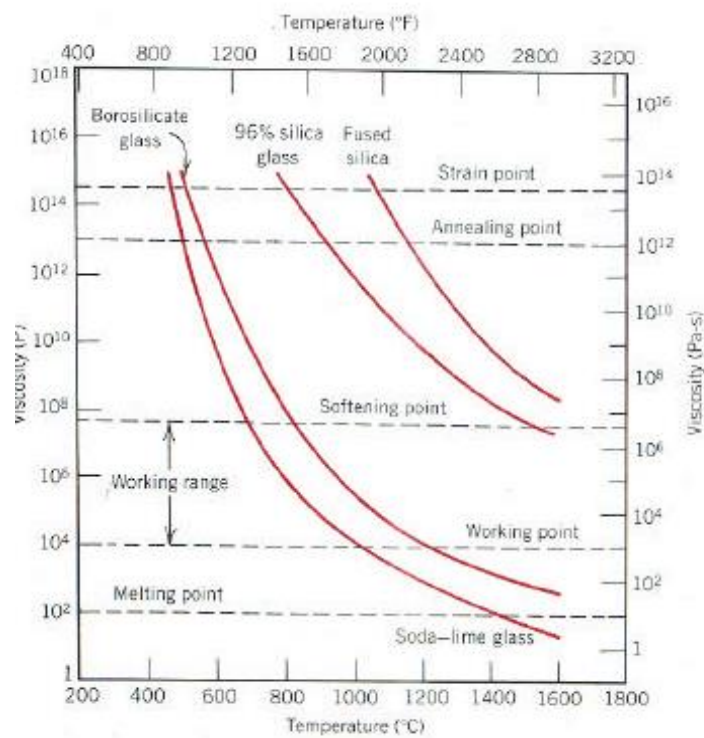


Figura 42 – Gráfico Viscosidade x Temperatura de alguns Vidros [17]