

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DA RELAXAÇÃO DO POLÍMERO POLIAMIDA SECO EM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE TEMPERATURA**

por

Aramis Carlos Mundel Junior

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, agosto de 2024.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Mundel Junior, Aramis Carlos
ESTUDO DA RELAXAÇÃO DO POLÍMERO POLIAMIDA SECO EM
DIFERENTES CONDIÇÕES DE TEMPERATURA / Aramis Carlos
Mundel Junior. -- 2024.
17 f.
Orientador: Jakson Manfredini Vassoler.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Polímero. 2. Poliamida 6 . 3. Relaxação . 4.
Viscoelasticidade. 5. Temperatura. I. Manfredini
Vassoler, Jakson, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**ESTUDO DA RELAXAÇÃO DO POLÍMERO POLIAMIDA SECO EM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE TEMPERATURA**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel Milbrath De Leon (Presidente)

Prof. Carlos Eduardo de Souza

Prof. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, agosto de 2024

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Vanda, que através de sua certeza e confiança sempre me motivou e me inspirou a continuar, principalmente nos momentos de maior dificuldade.

Ao meu pai, Aramis, que me proporcionou todos os meios necessários para me fazer chegar até aqui.

À minha irmã, Luciana, que me mostrou força de vontade e superação para que eu chegasse a este momento.

À minha irmã, Caroline, e meu cunhado Tiago, que nunca me deixaram perder a resiliência para me manter focado no meu objetivo, mesmo conhecendo as dificuldades que eu enfrentaria.

À minha avó, Izaura, que com seus esforços sobre-humanos tornou este sonho realidade, através de todo seu apoio e amor incondicional.

À minha avó, Mimi, que desde o primeiro momento, vislumbrou o sucesso deste dia chegando.

À minha namorada, Angélica, que talvez nem tenha a dimensão de sua importância no meu processo de evolução e amadurecimento até aqui. Sofreu comigo e agora comemoramos juntos.

Ao meu Professor e Orientador, Jakson, que sempre esteve presente e disponível para que eu terminasse esta etapa com qualidade.

Ao Técnico, Rodrigo, que me deu todo o suporte para que este trabalho acontecesse.

Aos meus familiares e amigos que estiveram presentes ao longo dessa trajetória, incentivando, acreditando e entendendo cada momento pelos quais passei.

Mundel Junior, Aramis Carlos. **Estudo da relaxação do polímero poliamida seco em diferentes condições de temperatura**. 2024. 17 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

Os polímeros surgiram como uma revolução no campo dos materiais e mostraram-se uma boa alternativa para materiais aplicados aos diversos setores industriais, historicamente tão dependentes dos metais. Em razão das diversas vantagens que apresentam, tais como a grande versatilidade de aplicação, fácil manipulação, fabricação e baixo custo, os materiais poliméricos vêm atraindo muito interesse no seu comportamento estrutural. Sabendo da dificuldade de se caracterizá-los, por apresentarem comportamento viscoelástico, pela suscetibilidade a variações de suas propriedades mecânicas em função das condições ambientais a que estão expostos e no intuito de contribuir com a linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida pelo GMAp no que tange os efeitos das variações climáticas no comportamento dos polímeros, este trabalho apresenta um estudo experimental da influência da variação de temperatura na tensão de relaxação do polímero poliamida 6 após ser completamente seco. Através dos resultados percebe-se que a mudança de temperatura impacta no decaimento da tensão de relaxação, ainda que se mantenha as amostras secas, isto é, sem a influência da absorção de umidade. Os resultados demonstram que a poliamida 6 é bastante suscetível a variações de suas propriedades mecânicas, quando submetida a mudanças de temperatura, dificultando muito a caracterização de seu comportamento e a previsão de suas respostas às solicitações em que é submetida.

PALAVRAS-CHAVE: polímero; poliamida 6; relaxação; viscoelasticidade; temperatura.

Mundel Junior, Aramis Carlos. **Study of the relaxation of dry polyamide polymer under different temperature conditions.** 2024. 17 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

Polymers emerged as a revolution in the field of materials and proved to be a good alternative for materials applied to different industrial sectors, historically so dependent on metals. Due to the various advantages they present, such as great versatility of application, easy handling, manufacturing and low cost, polymeric materials have been attracting a lot of interest in their structural behavior. Knowing the difficulty of characterizing them, as they present viscoelastic behavior, because of their susceptibility to variations in their mechanical properties depending on the environmental conditions to which they are exposed, and with the aim of contributing to the line of research that has been developed by GMAp regarding the effects of climatic variations on the behavior of polymers, this work presents an experimental study of the influence of temperature variation on the relaxation tension of the polymer polyamide 6 after being completely dried. Through the results it is clear that the change in temperature impacts the decay of the relaxation tension, even if the samples are kept dry, that is, without the influence of moisture absorption. The results demonstrate that polyamide 6 is quite susceptible to variations in its mechanical properties when subjected to temperature changes, making it very difficult to characterize its behavior and predict its responses to the stresses to which it is subjected.

KEYWORDS: polymer; polyamide 6; relaxation; viscoelasticity; temperature.

NOMENCLATURA

	Descrição	Unidade
C	Concentração penetrante	[kg/m ³]
E_r	Módulo de relaxação	[Pa]
t	Tempo	[s]
D	Coefficiente de difusão	[m ² /s]

Símbolos gregos

ρ	Massa específica do sólido	[kg m ⁻³]
σ	Tensão	[MPa]
ϵ_0	Nível de deformação	

Abreviaturas

GMAp	Grupo de Mecânica Aplicada
DMA	Dynamic Mechanical Analysis (Análise Dinâmico-mecânica)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1 POLÍMEROS	2
3.2 ESTRUTURA POLIMÉRICA	3
3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS, TÉRMICAS E MECÂNICAS	4
3.4 VISCOELASTICIDADE	6
3.5 TENSÃO DE RELAXAÇÃO	7
4. METODOLOGIA	8
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS	8
4.2 PREPARAÇÃO E CONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS	8
4.3 ENSAIO DE RELAXAÇÃO DAS AMOSTRAS SECAS	10
5. RESULTADOS	11
5.1 RELAXAÇÃO DAS AMOSTRAS	11
5.1.1 RELAXAÇÃO NA CONDIÇÃO T1	11
5.1.2 RELAXAÇÃO NA CONDIÇÃO T2	13
5.1.3 RELAXAÇÃO NA CONDIÇÃO T3	13
5.2 MÉDIA DAS AMOSTRAS NAS CONDIÇÕES T1, T2 E T3	14
6. CONCLUSÃO	15
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1. INTRODUÇÃO

Com a preocupação pela manutenção de recursos materiais para aplicação em diversos setores industriais, segue incessante a busca por novos materiais a serem empregados. Como alternativa aos materiais metálicos, os materiais poliméricos vêm ganhando bastante espaço devido às vantagens que apresentam. Segundo Callister (2016), logo após o fim da Segunda Guerra Mundial, o advento dos materiais poliméricos sintéticos revolucionou o campo dos materiais. Grande versatilidade de aplicação, resistência à degradação por corrosão, fácil manipulação, fabricação e baixo custo, têm chamado muito a atenção da indústria aos polímeros.

Contudo, pouco se sabe sobre seu comportamento mecânico em aplicações estruturais, já que muitas dúvidas ainda surgem quanto a influência de fatores externos. Sensíveis à taxa de deformação, podendo apresentar plasticidade e um comportamento elástico não linear, geram diversas incertezas aos projetistas.

Sob condições de operação em situações climáticas e atmosféricas adversas, fica ainda mais complexo a caracterização do tipo de comportamento que irão apresentar. As consequências da exposição à variação de temperatura em seu comportamento mecânico, necessitam de um maior desenvolvimento experimental, ou mesmo numérico, para uma melhor compreensão, aumentando a segurança de suas aplicações, determinando seus limites de segurança e conseqüentemente expandindo seu emprego na engenharia.

De acordo com Fan (2008), ainda há muito a ser estudado, investigado e desenvolvido no que diz respeito ao conhecimento das respostas mecânicas dos polímeros submetidos condições ambientais adversas, como à absorção de água, juntamente com seus mecanismos de difusão. E assim, nesse contexto, vem sendo desenvolvidos estudos e pesquisas no Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) da UFRGS, acrescentando conhecimento que contribui para um melhor entendimento das consequências das condições ambientais em estruturas poliméricas. Trabalhos de Conclusão de Curso recentes realizados por Lopes (2023), Casagrande (2020) e Jost (2020), quantificaram e compararam através de ensaios dinâmico-mecânicos (DMA) os impactos da absorção de água para determinadas condições, possibilitando também os trabalhos de Silva (2021) e Pescador (2021), que realizaram estudos que descrevem o fenômeno

viscoelástico da poliamida através de modelos numéricos. Já no que tange a variação de temperatura mantendo-se as amostras secas, isto é, sem a influência da absorção de água, ainda há bastante a ser explorado. Ensaio dinâmico-mecânicos e de relaxação têm sido realizados para caracterizar a sensibilidade à variação de temperatura e à absorção de umidade dos polímeros. Para que sejam gerados dados úteis através destes ensaios experimentais, são necessárias metodologias e laboratórios com infraestrutura adequados.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo o estudo da influência da variação de temperatura no polímero poliamida 6 que pode ocorrer devido a mudanças ambientais, através de ensaios experimentais de relaxação. Não menos importante, este estudo pretende contribuir na linha de pesquisa de caracterização de absorção de água atualmente realizados no GMAp.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 POLÍMEROS

Buscando seu entendimento desde a origem da palavra polímero, do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição), conseguimos compreender a formação de uma macromolécula, composta por milhares de unidades de repetição chamadas meros, com ligações covalentes entre si (SEBASTIÃO V. CANEVAROLO JR, 2006). Os polímeros podem ser naturais, tais como madeira, algodão, lã, proteínas e enzimas, ou sintéticos, plásticos, borrachas e materiais fibrosos. Para que se entenda as propriedades dos polímeros, é necessário um olhar diretamente para a relação complexa que se tem com seus elementos estruturais (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Objeto de estudo deste trabalho, a poliamida, representa um material de grande interesse e representatividade atualmente, sendo considerada o primeiro plástico de engenharia (MARK, FRANCIS HERMAN, 2014).

3.2 ESTRUTURA POLIMÉRICA

Um polímero apresenta características físicas dependentes de seu peso molecular e de sua forma, assim como de diferenças nas estruturas das cadeias moleculares. Muitas possibilidades estruturais podem ser controladas consideravelmente através das técnicas modernas de sintetizar os polímeros (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Estruturas lineares, ramificadas, com ligações cruzadas e em rede, apresentam as seguintes características (CALLISTER; RETHWISCH, 2016):

Polímeros lineares: suas unidades repetidas estão ligadas entre si extremidade a extremidade, em cadeias únicas. Apresentam flexibilidade em suas longas cadeias, podendo haver ligações de hidrogênio e de van der Waals entre elas. Exemplos de polímeros comuns que apresentam estruturas lineares são o náilon, os fluorcarbonetos, o polietileno e o poliestireno.

Polímeros ramificados: suas cadeias principais possuem ligações com cadeias de ramificações laterais. Durante a síntese do polímero, de reações paralelas que ocorrem, pode-se resultar em ramificações, que são consideradas como parte da molécula da cadeia principal. Uma redução na massa específica do polímero é uma consequência da redução da eficiência de compactação da cadeia pela presença das ramificações laterais. Exemplo de polímero que apresenta estrutura ramificada em sua cadeia é o polietileno de baixa densidade (PEBD), contrariamente ao polietileno de alta densidade (PEAD), que é um polímero linear.

Polímeros com ligações cruzadas: apresentam cadeias lineares adjacentes ligadas umas às outras, em diferentes posições, através de ligações covalentes. Tanto durante a síntese do polímero quanto em decorrência de uma reação química irreversível, ocorre a formação das ligações cruzadas. Essa formação, muitas vezes se dá pela adição de moléculas ou átomos que através de ligações covalentes se unem às cadeias. Exemplo de polímeros que apresentam ligações cruzadas são diversos materiais elásticos do tipo borracha. Nas borrachas, a formação dessas ligações cruzadas é conhecida como vulcanização.

Polímeros em rede: são formados por monômeros multifuncionais que apresentam três ou mais ligações covalentes ativas, que resultam na formação de redes tridimensionais. Em tese, ao apresentar muitas ligações cruzadas, um polímero pode ser classificado com estrutura em rede. Suas propriedades térmicas e mecânicas são distintas. Exemplos de polímeros em rede são as resinas epóxi, poliuretanas e fenol-formaldeídos.

Vale ressaltar que, em geral, os polímeros apresentam mais de um tipo estrutural, não se restringindo a apenas um tipo de estrutura específica. Predominantemente linear, um polímero pode conter alguma ligação cruzada ou uma quantidade limitada de ramificações, por exemplo.

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS, TÉRMICAS E MECÂNICAS

Entre suas propriedades físicas, os polímeros apresentam grau de densidade, volume molar e peso molecular (KANTESH et al, 2015). Dependentes não só de sua forma e de seu peso molecular, os polímeros dependem também da configuração de suas estruturas moleculares, que podem ser consideravelmente controladas através das técnicas modernas de síntese polimérica. Por consistirem em um grande número de cadeias moleculares, que podem apresentar um extenso entrelaçamento e emaranhado entre as moléculas de cadeias vizinhas gerando uma situação análoga a uma linha de pesca emaranhada, uma vez que cada uma dessas cadeias pode dobrar, enrolar e contorcer, os polímeros possuem uma grande quantidade de características importantes. Os responsáveis por tais características, que incluem as grandes extensões elásticas apresentadas pelas borrachas, são esses espirais e emaranhados moleculares aleatórios (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Em relação às suas propriedades térmicas, podemos classificar os polímeros de acordo com a forma como se comportam dada uma elevação de temperatura. Conforme for sua estrutura molecular dominante, o polímero apresentará um comportamento frente às forças mecânicas a que for submetido. Então, seguindo essa classificação, os polímeros são divididos em termoplásticos e termorrígidos. Os termoplásticos, ao receber calor, sofrem um processo de amolecimento (podendo, por vezes, se liquefazer) e, ao serem resfriados, o processo inverso de

endurecimento, isto é, passam por processos totalmente reversíveis e que podem ser realizados diversas vezes. No que diz respeito à sua estrutura, ao se elevar a temperatura, há uma diminuição das forças de ligação secundárias (uma vez que aumenta o movimento das moléculas), resultando numa facilitação no movimento relativo entre cadeias adjacentes ao se aplicar uma tensão (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Ao aumentar excessivamente a temperatura de um polímero termoplástico fundido, ocorre uma degradação irreversível.

Uma outra característica apresentada pelos polímeros termoplásticos é sua relativa maciez. Seus processos de fabricação, geralmente, contam com a aplicação de calor e pressão, simultaneamente. Como exemplos de polímeros termoplásticos, temos os que em sua maioria são lineares e os que têm algumas estruturas ramificadas com cadeias flexíveis. Polietileno, poliestireno e poli(cloreto de vinila), são exemplos de polímeros termoplásticos comuns.

Os polímeros termorrígidos apresentam estrutura em rede, que durante sua formação torna-os rígidos de forma permanente, fazendo com que não amoleçam com a elevação de temperatura. Por possuírem ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes, os polímeros em rede, quando submetidos a tratamentos térmicos resistem aos movimentos de vibrações e rotações das cadeias durante o aumento de temperatura, com suas cadeias presas umas às outras. Um polímero termorrígido terá sua degradação com o rompimento de suas ligações cruzadas, mas por apresentar a densidade dessas ligações elevada (de 10% a 50% das unidades repetidas na cadeia têm ligações cruzadas), somente ocorrerá esse rompimento com um aquecimento do polímero até temperaturas excessivas (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Em geral, apresentam maior resistência, rigidez e melhor estabilidade dimensional quando comparados aos polímeros termoplásticos. Como exemplos de polímeros termorrígidos, temos os que em sua maioria possuem ligações cruzadas e em rede. Borrachas vulcanizadas, algumas resinas poliéster, resinas fenólicas e os epóxis, são exemplos de polímeros termorrígidos.

Em se tratando de propriedades mecânicas, um simples ensaio tensão-deformação empregado é suficiente para caracterizar algumas das propriedades dos polímeros, pois são especificadas por muitos parâmetros iguais aos utilizados para os metais, como limite de resistência à tração, limite de escoamento e módulo de elasticidade. Das propriedades mecânicas dos polímeros, também podemos dar ênfase à cristalinidade. Definida por

CALLISTER e RETHWISCH (2016) como “a compactação de cadeias moleculares para produzir um arranjo atômico ordenado”, os polímeros apresentam um grau de cristalinidade que pode ir desde completamente amorfo até aproximadamente 95% cristalino.

Segundo CASAGRANDA (2019), os polímeros rígidos apresentam alto grau de cristalinidade e alto ponto de fusão, enquanto sua resistência ao impacto é baixa. Os amorfos, contrariamente, apresentam maciez e baixo ponto de fusão. Quanto às regiões amorfas, podem ser facilitadoras para a penetração de solventes na matriz do polímero (KANTESH et al, 2015).

As respostas mecânicas aos carregamentos apresentadas pelos polímeros, estão intrinsecamente relacionadas às características de suas estruturas internas. Com comportamento de sólidos elásticos e por vezes de fluidos viscosos, os polímeros têm suas propriedades (mecânicas, elétricas etc.) dependentes do tempo e não podem ser tratadas pelas leis dos sólidos ou fluidos (BRINSON; BRINSON,2008).

Portanto, deve-se compreender muito bem as características mecânicas dos polímeros, visto que em sua maioria, apresenta alta sensibilidade à taxa de deformação, à temperatura e à natureza química do ambiente (presença de água, oxigênio, solventes orgânicos etc.) (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

3.4 VISCOELASTICIDADE

Por meio da observação do estado físico do material podemos compreender algumas de suas características. Materiais sólidos elásticos, por exemplo, por meio de uma análise elástica se obtém bons resultados através da Lei de Hooke, enquanto uma boa abordagem para fluidos viscosos é feita através de uma análise hidrodinâmica, com base na Lei de Newton (JOST, 2020). Os polímeros permeiam por estas características através de sua viscoelasticidade, isto é, apresentam características de um sólido elástico e de um fluido simultaneamente. A parte elástica da deformação se dá por variações dos ângulos e das distâncias de ligações atômicas da cadeia polimérica (principal e de grupos laterais). Já a parte plástica da deformação é resultado do atrito entre as cadeias poliméricas, fazendo com que o polímero tenha uma demora

de um tempo finito para responder à solicitação em que é submetido, ocasionando uma espécie de defasagem entre solicitação e resposta (SEBASTIÃO V. CANEVAROLO JR, 2006).

3.5 TENSÃO DE RELAXAÇÃO

Em um sólido viscoelástico, submetido a uma deformação instantânea, se estabelecerá uma tensão gerada em função do tempo. No início, essa tensão será proporcional à deformação. No transcorrer do tempo, essa tensão se reduzirá a valores mais baixos seguindo a uma taxa caracterizada pelo tempo de relaxação. No sólido elástico ideal, por outro lado, a tensão que se estabelece é finita e permanece constante ao longo do tempo.

Este comportamento viscoelástico dos polímeros apresenta dependência do tempo e da temperatura a que estão submetidos. A técnica experimental utilizada para medir e quantificar esse comportamento neste trabalho é através das medidas de relaxação de tensão. Segundo o procedimento descrito por Callister (2016), cada amostra foi deformada rapidamente em tração até um valor de deformação conhecido, predeterminado e relativamente baixo. Com a temperatura mantida constante ao longo do tempo de ensaio, mediu-se a tensão necessária para que se mantivesse essa deformação constante. A tensão diminui à medida que transcorreu o tempo, devido a reorganização interna das moléculas dos corpos de prova e de processos de relaxação das amostras poliméricas. Deste processo, é definido para os polímeros com comportamento viscoelástico, um módulo de elasticidade em função do tempo, um módulo de relaxação $E_r(t)$, como

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} \quad (2)$$

em que $\sigma(t)$ é a tensão medida em função do tempo, e ϵ_0 é o nível de deformação, com valor constante.

4. METODOLOGIA

Partindo-se da seleção e obtenção das amostras do polímero sintético de interesse, poliamida 6 (Nylon®), serão realizados ensaios mecânicos de relaxação em cada amostra. As amostras passarão inicialmente pelo procedimento de secagem e, posteriormente, serão ensaiadas na condição seca, onde cada grupo amostral será submetido a uma condição de temperatura diferente.

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS

Mantendo-se o padrão dos ensaios desenvolvidos anteriormente por Lopes (2023), foram cortadas as amostras que passarão pelo processo de tração, de uma chapa comercial com 2mm de espessura de poliamida 6 (Nylon®) fornecida pelo GMAp, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Corte das amostras de poliamida 6



Fonte: De autoria própria.

4.2 PREPARAÇÃO E CONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS

Após o corte dos corpos de prova da chapa de poliamida, através das diretrizes de Práticas Padrão para Condicionamento de Plásticos para Teste, norma ASTM D618 (2013), as

amostras passaram por um processo de secagem em um forno, por um período de 24h na temperatura de 50°C, apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Secagem das amostras por 24h no forno à 50°C



Fonte: De autoria própria.

A fim de mantê-las secas, impedindo-as de absorver novamente a umidade presente no ar atmosférico, as amostras retiradas do forno foram armazenadas imediatamente em um dessecador à vácuo com dessecante de sílica-gel (Figura 3), conforme previsto pela norma. Esta medida visa manter os corpos de prova na condição em que saíram do forno até serem ensaiados.

Figura 3 - Dessecador à vácuo com as amostras armazenadas



Fonte: De autoria própria.

As amostras secas, após o procedimento anteriormente descrito, estão em plenas condições para o ensaio de relaxação. Através de uma balança digital de alta precisão ATY224 - SHIMADZU, com resolução de 0,1mg, as amostras foram pesadas e, em seguida, postas novamente no dessecador à vácuo. A pesagem foi realizada a fim de se manter o controle das massas das amostras.

Figura 4 - Pesagem de um corpo de prova seco.



Fonte: De autoria própria.

4.3 ENSAIO DE RELAXAÇÃO DAS AMOSTRAS SECAS

Logo após a etapa de preparação das amostras, iniciou-se a realização dos ensaios. O equipamento utilizado para os ensaios de relaxação para as amostras secas foi a máquina SHIMADZU AG-X plus 250 kN, montada juntamente com extensômetro de deslocamento do tipo clip-gauge e com uma célula de carga de 1kN. A climatização do laboratório foi mantida padronizada durante a realização de cada ensaio por refrigeração do ambiente, de forma que variações das condições de temperatura externa não interferissem nos ensaios. Em ensaios de trabalhos anteriores do grupo observou-se que esta etapa pode influenciar nos resultados.

Mantendo-se o protocolo de ensaios realizados em experimentos anteriores no GMap, as amostras secas foram submetidas a deslocamentos resultando em 1,25% de deformação, o

que garante uma deformação em região elástica. Em um ensaio de tração na condição seca, Sharma (2019) demonstra através de seus resultados que o material mantém seu comportamento elástico com este percentual de deformação no diagrama “tensão x deformação”. De acordo com a norma ASTM D2990 (2017), os corpos de prova passam por esta deformação por um tempo de 3 segundos e são mantidos por 1000h (aproximadamente 42 dias). Contudo, este tempo para o monitoramento da alteração dos valores de força, associado ao número de repetições dos ensaios de cada condição de temperatura, inviabilizaria este estudo para a conclusão do curso de graduação. Então, foram escolhidas 5 horas para observação e registros dos dados de cada ensaio, viabilizando a elaboração deste trabalho. Os valores de força foram monitorados e registrados ao transcorrer de cada ensaio.

As temperaturas de ensaio foram classificadas em T1, T2 e T3, onde as amostras foram submetidas a ensaios de relaxação com 23°C, 35°C e 50°C, respectivamente. Para manter as condições, e por consequência, reduzir possíveis interferências na variabilidade entre os resultados, todas as amostras da condição T1 foram ensaiadas para que então se iniciasse os ensaios da condição T2, e assim, da mesma forma T3.

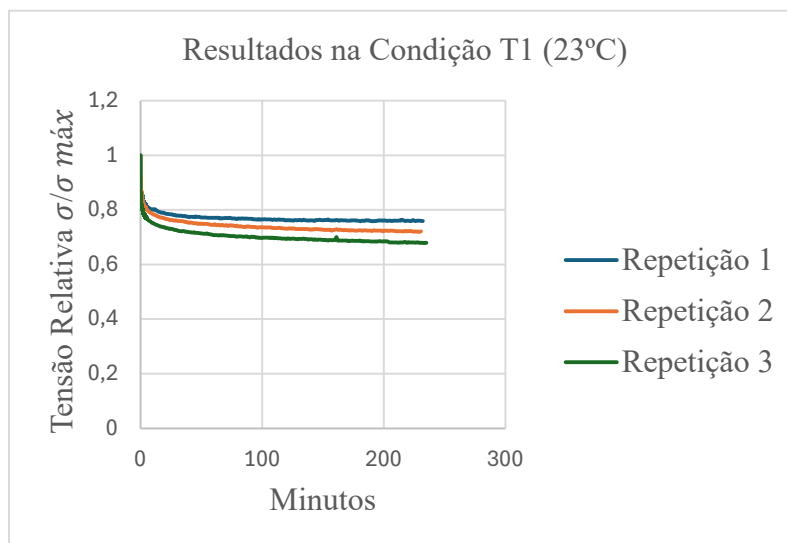
5. RESULTADOS

5.1 RELAXAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para cada temperatura, 3 amostras foram ensaiadas. Após o término dos ensaios é possível identificar que as amostras submetidas a mesma condição de temperatura, apresentam um decaimento de tensão em relação ao seu valor máximo semelhantes nas três repetições.

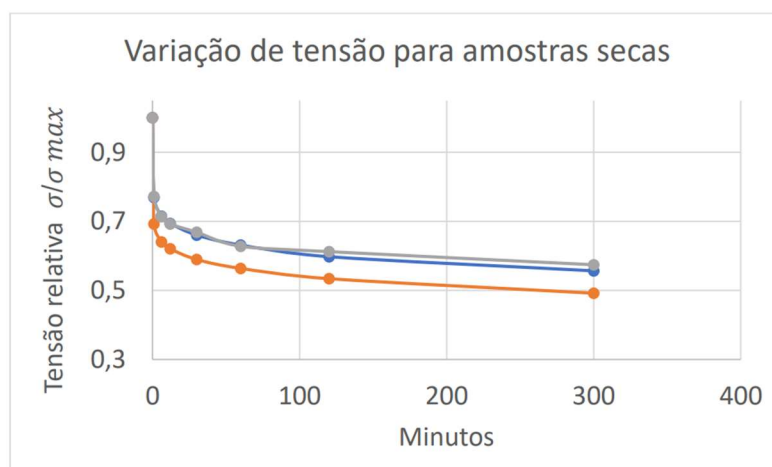
5.1.1 RELAXAÇÃO NA CONDIÇÃO T1

Conforme a Figura 5, pode-se perceber uma queda acentuada nos primeiros minutos do ensaio, permanecendo essa queda ao longo de toda a duração do teste.

Figura 5 – Experimento na Condição T1.

Fonte: De autoria própria.

Estes valores apresentam certas discordâncias dos resultados obtidos por Lopes (2023), em seus ensaios na mesma condição de umidade (seca), temperatura das amostras (ambiente de 23°C) e material, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Ensaio de relaxação das amostras secas

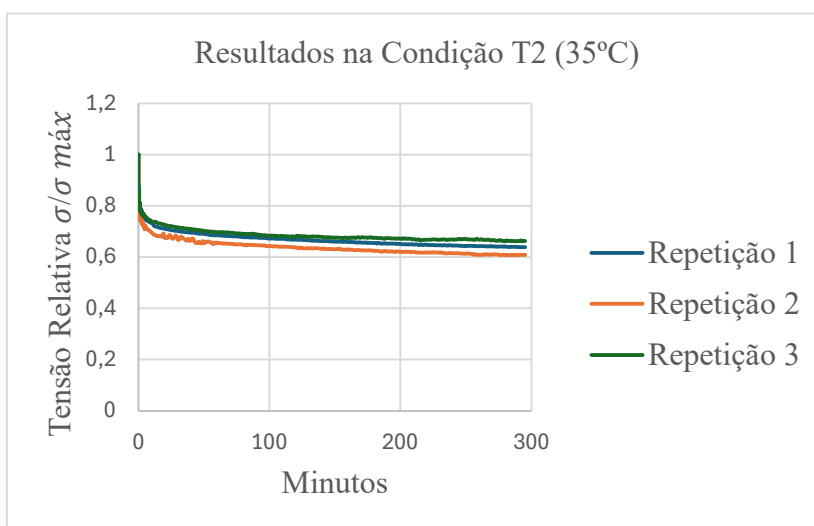
Fonte: Retirado de Lopes (2023).

Durante a execução dos ensaios de Lopes (2023), alguns problemas de condicionamento foram observados, levando a uma variabilidade significativa dos dados entre as repetições. Neste trabalho, a metodologia empregada possibilitou reduzir este desvio de forma expressiva.

5.1.2 RELAXAÇÃO NA CONDIÇÃO T2

Com o aumento de temperatura em aproximadamente 52% da Condição T1 para a Condição T2, é possível notar o processo de amolecimento das amostras, que apresentam redução de tensão de relaxação com cerca de 28% (Figura 5) para 36% (Figura 7).

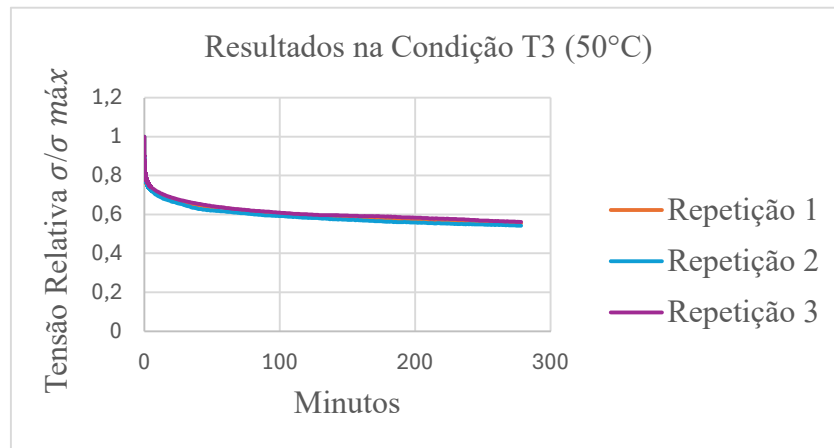
Figura 7 – Experimento na Condição T2



Fonte: De autoria própria.

5.1.3 RELAXAÇÃO NA CONDIÇÃO T3

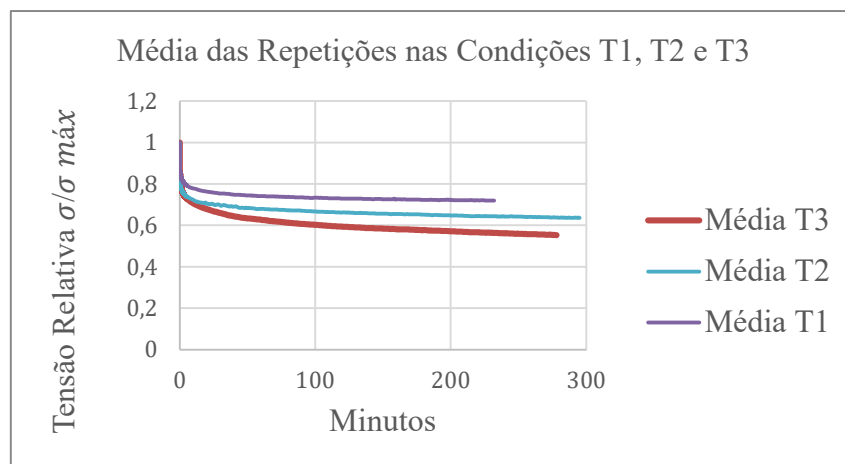
Observando as 3 amostras na Condição T3, fica evidente uma maior variação da relaxação entre os ensaios. Ao longo do domínio do tempo, foi a condição que apresentou a maior taxa de decaimento da tensão ao término dos testes, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Experimento na Condição T3

Fonte: De autoria própria.

5.2 MÉDIA DAS AMOSTRAS NAS CONDIÇÕES T1, T2 E T3

As médias das tensões relativas de relaxação, indicadas na Figura 9, demonstram na poliamida a característica presente nos polímeros termoplásticos, de que quando submetidos a aquecimento, com a temperatura mantida constante, são capazes de apresentar reorganização molecular, devido à diminuição das forças de ligação secundárias de suas estruturas.

Figura 9 – Resultados das Condições T1, T2 E T3

Fonte: De autoria própria.

A tensão necessária para se manter uma deformação conhecida vai diminuindo ao transcorrer o tempo, demonstrando seu comportamento viscoelástico. Com este experimento, pôde-se notar que à medida em que se aumentou a temperatura, diminuiu a tensão de relaxação em relação ao pico de tensão. E, na elevação da temperatura, a queda de tensão foi expressiva, passando de 28% (Condição 1) a 44% (Condição 3).

6. CONCLUSÃO

Dando seguimento nas pesquisas desenvolvidas pelo GMAp (UFRGS), este trabalho atingiu os resultados esperados com as condições propostas para o experimento, chamando a atenção ao comportamento da poliamida e sua correlação com a metodologia experimental. Com o aumento de temperatura, a poliamida apresentou o decaimento da tensão de relaxação ao transcorrer do tempo, de acordo com o esperado para sua característica térmica (termoplasticidade). Ao mudar as condições de temperatura dos ensaios, buscou-se simular situações em que as aplicações estruturais do polímero poliamida 6 serão expostas com as variações climáticas. Mesmo sendo considerada baixa a amplitude de temperatura entre as condições de ensaio (27°C), obteve-se uma redução considerável de tensão, o que gera um alerta sobre a grande suscetibilidade a variação das propriedades mecânicas do material sob condições variáveis de temperatura.

Para abordagens futuras, a combinação das variações de temperatura e de absorção de água enriquecerão os acervos e a literatura acadêmica, uma vez que ainda há muito espaço para desenvolvimento de material acerca das aplicações dinâmico-mecânicas destes polímeros. Ensaios com maior duração e grupos amostrais com maior número de corpos de prova podem ajudar a explicar a grande sensibilidade à mudança de condições físicas do material.

Portanto, é fortemente recomendado manter-se a contínua pesquisa e desenvolvimento de trabalhos voltados para o conhecimento e caracterização destes materiais sintéticos, visto se tratar de uma classe complexa, com inúmeras possibilidades de aplicação nos mais diversos setores das indústrias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **D 570-98: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics.** West Conshohocken. 2018.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **D 618-13: Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing.** West Conshohocken, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **D 2990: Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics.** West Conshohocken, 2017.

BRINSON, H. F.; BRINSON, L. C. **Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction.** Springer US, 2008.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction,** 16th Edition. Wiley, 2016.

CANEVAROLO, S. V. J. **Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros,** 2ª Edição, Artiliber, 2006.

CASAGRANDA, L. **Estudo do Efeito da Absorção de Água Sobre o Comportamento Viscoelástico do Polímero Poliamida 6.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 17. 2019.

Duda, J. M. ZIELINSKI, **Diffusion in Polymers.** Ch. 3, Marcel Dekker, New York, 1996.

JOST, M. **Estudo do Efeito da Absorção de Água e Variação da Temperatura Sobre o Comportamento Viscoelástico dos Polímeros Poliamida 6 e Poliuretano.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 18. 2020.

KANTESH, B.; VIVEK, V.; ARVIND AGARWAL, R. **PHYSICAL, THERMAL, AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMERS.** In: SOCIETY, T. A. C. **Biosurfaces: A Materials Science and Engineering Perspective.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015.

LOPES, I.A. **Efeito da Absorção de Água no Comportamento da Tensão de Relaxamento do Polímero Poliamida**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 22. 2023.

PESCADOR, M. **Numeric experimental study of thermal plastics subject to different water absorption ratios, different temperatures and its effects on viscoelastic behavior**. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2021.

SHARMA, Prateek et al. **Moisture transport in PA6 and its influence on the mechanical properties**. Continuum Mechanics and Thermodynamics, v. 32, p. 307-325, 2020.