



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

JOÃO VICTOR SANTOS MONTEIRO

FISSURAÇÃO EM FORMAS PLÁSTICAS PARA LAJES: ANÁLISE NUMÉRICA E
CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL SOB ENVELHECIMENTO ACELERADO

FORTALEZA

2024

JOÃO VICTOR SANTOS MONTEIRO

FISSURAÇÃO EM FORMAS PLÁSTICAS PARA LAJES: ANÁLISE NUMÉRICA E
CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL SOB ENVELHECIMENTO ACELERADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo.
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M777f Monteiro, João Victor Santos.

Fissuração em formas plásticas para lajes : análise numérica e caracterização experimental sob envelhecimento acelerado / João Victor Santos Monteiro. – 2024.
100 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo.

Coorientação: Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior.

1. Envelhecimento UV. 2. Análise numérica. 3. MEF. 4. Formas plásticas. I. Título.

CDD 624.1

JOÃO VICTOR SANTOS MONTEIRO

FISSURAÇÃO EM FORMAS PLÁSTICAS PARA LAJES: ANÁLISE NUMÉRICA E
CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL SOB ENVELHECIMENTO ACELERADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Evandro Parente Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Alex Correia Monteiro
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

AGRADECIMENTOS

Nesses anos de muita dificuldade e luta, muitas noites de sono perdidas quero agradecer a todos que tornaram esse momento possível e não me deixaram desistir em nenhum momento.

Agradeço à minha esposa Natália Monteiro pelo apoio e amor em todos os momentos difíceis durante essa caminhada.

Agradeço aos meus pais pelo apoio emocional durante todo o período do mestrado e ao meu irmão pela companhia e modelo de confiança e de amizade contínua.

Sou grato em especial aos professores Dr. Antônio Macário e Dr. Marcelo Medeiros pela orientação e paciência ao longo desse percurso para que esse trabalho fosse desenvolvido.

Sou grandiosamente grato à empresa Impacto Protensão, pela ajuda para que os ensaios fossem realizados de forma plena, em especial aos Engenheiros Joaquim Caracas e Lucas Buffat.

Agradeço ao SENAI que conduziu os experimentos com maestria e permitiu a todo momento informações sobre todos os ensaios realizados.

Agradeço à Universidade Federal do Ceará, em especial ao PEC e ao DEECC pelo incentivo à pesquisa, ao desenvolvimento acadêmico e ao ensino que me tornaram um profissional e estudante mais completo.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

As lajes nervuradas têm sido amplamente adotadas como o sistema para pisos de edificações multifamiliares. Uma grande vantagem destes sistemas, além da possibilidade de uso de protensão não aderente, é a utilização de um sistema de formas plásticas padronizadas que torna o processo de execução muito eficiente. O sistema PavPlus® da empresa Impacto®, tem sido amplamente utilizado em diversas construções, entretanto, a vida útil das formas é afetada pela exposição à luz ultravioleta (UV), que causa o envelhecimento do material. Outro fator prejudicial são as elevadas deformações aplicadas durante a fase de desmoldagem, além da manipulação pós extração. Devido a estes fatores, fissuras recorrentes e bem caracterizadas podem ser notadas depois de ciclos de uso, sempre próximo da região de aplicação da carga de extração, o que requer a execução de reparos nas formas plásticas. O presente trabalho objetiva mitigar os efeitos negativos produzidos pelo processo de envelhecimento e de extração nas formas plásticas de lajes nervuradas prolongando ainda mais a vida útil dessas peças. Para isso, ensaios experimentais de tração, flexão e impacto foram realizados em amostras com diferentes composições envelhecidas em câmara UV buscando avaliar as mudanças de comportamentos e propriedades do material. Após a caracterização do material, foram realizadas análises numéricas com modelos constitutivos elastoplásticos com dano, avaliando-se o efeito deste no comportamento da forma em serviço e, em particular, no processo de extração. Os resultados mostraram que a radiação UV tem um alto potencial de causar mudanças nas propriedades constitutivas e no comportamento mecânico do material, reduzindo a rigidez e outros limites de ruptura que podem contribuir para o aparecimento de fissuras. A simulação numérica de uso da forma para cargas usuais em serviço mostrou que não ocorre dano, todavia já o processo de arrancamento, provocou dano à superfície da aba. O modelo de extração utilizando a ferramenta pelo meio e pelos cantos da forma foram estudados para avaliar se são as causas de futuros danos.

Palavras-chave: *Envelhecimento UV, Análise Numérica, MEF, Formas plásticas*

ABSTRACT

Ribbed slabs have been widely adopted as the flooring system for multi-family buildings. A major advantage of these systems, in addition to the possibility of using non-bonded prestressing, is the use of a standardized plastic formwork system that makes the execution process very efficient. The PavPlus® system from Impacto® has been widely used in several constructions; however, the useful life of the forms is affected by exposure to ultraviolet (UV) light, which causes the material to age. Another detrimental factor is the high deformations applied during the demolding phase, in addition to post-extraction handling. Due to these factors, recurrent and well-characterized cracks can be noticed after cycles of use, always close to the region of application of the extraction load, which requires the execution of repairs to the plastic forms. This work aims to mitigate the negative effects produced by the aging and extraction process on the plastic forms of ribbed slabs, further extending the useful life of these parts. For this purpose, experimental tensile, flexural and impact tests were performed on samples with different compositions aged in a UV chamber, aiming to evaluate the changes in the material's behavior and properties. After characterizing the material, numerical analyses were performed with elastoplastic constitutive models with damage, evaluating the effect of this on the behavior of the form in service and, in particular, on the extraction process. The results showed that UV radiation has a high potential to cause changes in the constitutive properties and mechanical behavior of the material, reducing the stiffness and other rupture limits that can contribute to the appearance of cracks. The numerical simulation of the use of the form for usual loads in service showed that no damage occurs, however, the pull-out process caused damage to the surface of the flange. The extraction model using the tool through the middle and corners of the form was studied to evaluate whether they are the causes of future damage.

Keywords: *UV Aging, Numerical Analysis, FEM, Plastic forms*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de formas para lajes	16
Figura 2 – Extração das formas plásticas	16
Figura 3 – Ilustração da deformação da forma no arrancamento.....	17
Figura 4 – Fissuras típicas	18
Figura 5 – Reparos emergenciais nas formas.....	18
Figura 6 – Estrutura molecular dos polímeros.....	22
Figura 7 – Estrutura molecular de um polímero semicristalino.....	23
Figura 8 – Processo base de formação do polipropileno	25
Figura 9 – Fórmula estrutural do policarbonato.....	26
Figura 10 – Comparação da irradiância UV entre lâmpadas artificiais e a luz do sol.	27
Figura 11 – Efeitos do envelhecimento no módulo de elasticidade.....	28
Figura 12 – Efeitos do envelhecimento na tensão de ruptura	28
Figura 13 – Representação tridimensional dos critérios de von Mises e Tresca.....	31
Figura 14 – (a) Plasticidade perfeita, (b) Endurecimento isotrópico, (c) Endurecimento Cinemático e (d) Endurecimento misto	32
Figura 15 – Elemento representativo de volume	34
Figura 16 – RVE uniaxial.....	36
Figura 17 – Gráfico tensão-deformação com variação do módulo de elasticidade com o dano (a) e relação do módulo no dano com o módulo inicial (b)	37
Figura 18 – Esquema de ensaio para cada material	44
Figura 19 – Esquema de ensaio para cada material	44
Figura 20 – Ensaio de flexão em três pontos exemplo.....	46
Figura 21 – Corpo de prova ensaio de tração	47
Figura 22 – Ensaio de tração na máquina universal EMIC DL-2000.....	48
Figura 23 – Detalhe corpo de prova e máquina de ensaio impacto IZOD	49
Figura 24 – Condições de contorno da forma sob trabalho normal.....	51
Figura 25 – Encarte do sistema PavPlus	51
Figura 26 – Cargas usuais de trabalho aplicadas na forma	52
Figura 27 – Malha discretizada utilizada na análise e elemento C3D10	52
Figura 28 – Condições de contorno da forma sob processo de arrancamento	53
Figura 29 – Acoplamento da carga para arrancamento pelo meio.....	54
Figura 30 – Modelo do corpo de prova.....	55

Figura 31 – Malha discretizada do modelo de tração e elemento	55
Figura 32 – Parâmetros utilizados na análise do dano dúctil	56
Figura 33 – Evolução de dano no gráfico tensão <i>versus</i> deformação.....	58
Figura 34 – Interface da ferramenta de calibração.....	59
Figura 35 – Gráfico Tensão-Deformação Polipropileno Virgem– 0h	61
Figura 36 – Gráfico Tensão- Deformação Polipropileno Virgem – 120h	62
Figura 37 – Gráfico Tensão- Deformação Polipropileno Virgem – 240h	62
Figura 38 – Gráfico Tensão- Deformação Polipropileno Virgem – 360h	63
Figura 39 – Gráfico Tensão- Deformação Policarbonato – 0h	63
Figura 40 – Gráfico Tensão- Deformação Policarbonato – 120h	64
Figura 41 – Gráfico Tensão- Deformação Policarbonato – 240h	64
Figura 42 – Gráfico Tensão- Deformação Policarbonato – 360h	65
Figura 43 – Gráfico Tensão- Deformação PP Reciclado – 0h.....	65
Figura 44 – Gráfico Tensão- Deformação PP Reciclado – 120h.....	66
Figura 45 – Gráfico Tensão- Deformação PP Reciclado – 240h.....	66
Figura 46 – Gráfico Tensão- Deformação PP Reciclado – 360h.....	67
Figura 47 – Módulo de Elasticidade de ensaio de tração <i>versus</i> envelhecimento	68
Figura 48 – Força Máxima de tração <i>versus</i> envelhecimento	70
Figura 49 – Tensão na ruptura de tração <i>versus</i> envelhecimento.....	70
Figura 50 – Tensão na força máxima de tração <i>versus</i> envelhecimento	71
Figura 51 – Tensão <i>versus</i> deformação na tração para o PP virgem no envelhecimento	72
Figura 52 – Tensão <i>versus</i> deformação na tração para o PC no envelhecimento	73
Figura 53 – Tensão <i>versus</i> deformação para o PP reciclado no envelhecimento.....	74
Figura 54 – Tenacidade <i>versus</i> envelhecimento	75
Figura 55 – <i>Box plot</i> dos resultados da tenacidade <i>versus</i> envelhecimento	75
Figura 56 – Módulo de Elasticidade na flexão.....	77
Figura 57 – Tensão máxima de flexão	78
Figura 58 – Força máxima de flexão	79
Figura 59 – Resistência ao Impacto IZOD com efeito do envelhecimento	80
Figura 60 – Corpo de prova simulado numericamente.....	81
Figura 61 – Representação do dano na curva tensão-deformação.....	82
Figura 62 – Comparativo evolução de dano linear PPV 0h.....	83
Figura 63 – Pontos do dano tabular na curva tensão x deslocamento.....	84

Figura 64 – Curva dano <i>versus</i> deslocamento plástico	85
Figura 65 – Curva calibrada Polipropileno virgem (PPV)	86
Figura 66 – Curva calibrada Policarbonato (PC)	86
Figura 67 – Curva calibrada Polipropileno reciclado (PPRec).....	87
Figura 68 – Resultados de von Mises para cargas usuais 0h (PPRec).....	88
Figura 69 – Resultados de deslocamentos para cargas usuais 0h (PPRec).....	89
Figura 70 – Resultados de von Mises para cargas usuais 360h (PPRec).....	89
Figura 71 – Resultados de deslocamentos para cargas usuais 0h (PPRec).....	90
Figura 72 – Curva tensão-deformação dos três materiais não envelhecidos	91
Figura 73 – Tensões de von Mises em MPa para arrancamento de canto da forma	92
Figura 74 – Propagação do dano no arrancamento de canto da forma	93
Figura 75 – Tensões de von Mises em MPa para arrancamento no meio da forma .	93
Figura 76 – Propagação do dano no arrancamento de canto no meio da forma.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das misturas para as formas plásticas estudadas	43
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PE	Polietileno
PU	Poliuretano
PPV	Polipropileno virgem
PC	Policarbonato
PPR	Polipropileno reciclado
UMAT	User Material
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	19
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	19
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Polímeros	21
2.1.1	<i>Estrutura molecular</i>	21
2.1.2	<i>Morfologia</i>	22
2.1.3	<i>Classificação mecânica</i>	23
2.1.4	<i>Classificação térmica de polímero</i>	24
2.2	Polipropileno	24
2.3	Policarbonato	25
2.4	Efeito do envelhecimento	26
2.5	Teoria da plasticidade	29
2.5.1	<i>Introdução</i>	29
2.5.2	<i>Critério de falha de von Mises</i>	30
2.6	Leis de endurecimento	31
2.7	Mecânica do dano	33
2.7.1	<i>Contextualização</i>	33
2.7.2	<i>Representação da mecânica do dano</i>	34
2.7.3	<i>Conceito de tensão efetiva</i>	35
2.7.4	<i>Princípio da deformação equivalente</i>	36
2.7.5	<i>Critério de ruptura</i>	37
2.7.6	<i>Dano crítico</i>	38
2.8	Modelo de dano de Lemaitre	38
3	METODOLOGIA	42
3.1	Ensaio de laboratório	42
3.1.1	<i>Ensaio de flexão</i>	45
3.1.2	<i>Ensaio de tração</i>	47
3.1.3	<i>Ensaio de impacto IZOD</i>	49
3.2	Simulações Numéricas	50

3.2.1	<i>Forma plástica sob cargas usuais de trabalho</i>	50
3.2.2	<i>Forma plástica em processo de pré-arrancamento</i>	53
3.2.3	<i>Implementação de ensaio de tração</i>	54
3.2.4	<i>Análise de dano</i>	55
3.2.5	<i>Calibração do modelo numérico</i>	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	Ensaio de laboratório	60
4.1.1	<i>Resultados de tração</i>	67
4.1.2	<i>Tenacidade</i>	74
4.1.3	<i>Resultados de flexão</i>	76
4.1.4	<i>Resultado de Impacto IZOD</i>	79
4.2	Simulações numéricas	81
4.2.1	<i>Ensaio de tração dos corpos de prova</i>	81
4.2.2	<i>Cargas usuais de operação</i>	87
4.2.3	<i>Arrancamento</i>	90
5	CONCLUSÕES	95
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

A madeira já foi muito utilizada como formas e escoramentos nas construções de estruturas em concreto. Entretanto, com o avanço da tecnologia de materiais, novos métodos surgiram para otimizar o processo de produção na construção civil. Dentre eles, a adoção de formas de plástico combinado com o cimbramento metálico ganhou destaque e popularidade entre os processos construtivos no Brasil.

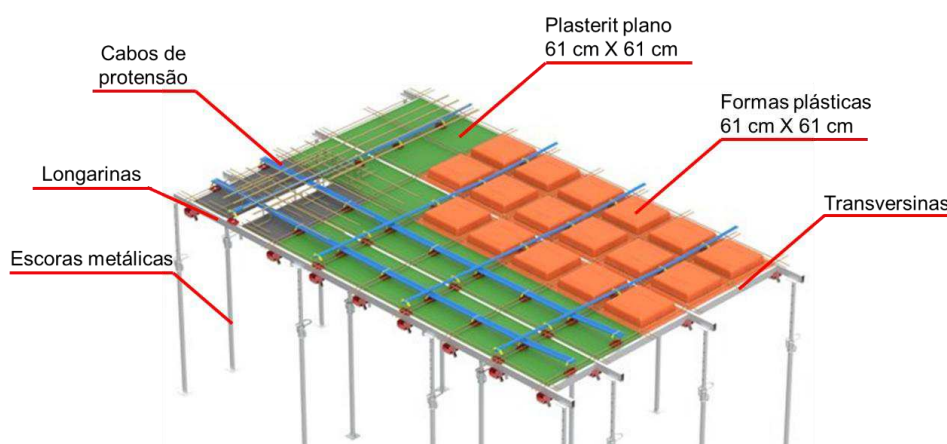
O uso de materiais plásticos em formas de lajes de concreto armado, facilitou a aplicabilidade e modularidade desses elementos garantindo mais eficiência e celeridade no processo de concretagem. Ademais, viabilizou a flexibilidade na produção de formas geométricas diversas, o que possibilitou a adaptação às lajes nervuradas.

As formas plásticas são leves e podem ser ambientalmente amigáveis uma vez que podem utilizar em sua composição material reciclável permitindo o reprocessamento. Outrossim, elas reduzem a adoção de madeira e de resina que possuem alto dano ambiental devido a sua baixa longevidade.

Para garantir uma boa eficiência, as formas plásticas devem ter resistência e rigidez suficientes para garantir a segurança durante todo o processo de montagem, concretagem e desforma, além de serem duráveis para que possam ser reutilizadas diversas vezes.

Existem vários modelos de formas plásticas e de tamanhos variados para cada uso específico de projeto. Dentre eles, cita-se o modelo PavPlus® cujas formas são escopo de estudo deste trabalho. A Figura 1 mostra o sistema de cimbramento metálico combinado com o uso de formas plásticas, cabos de protensão e formas plásticas planas.

Figura 1 – Sistema de formas para lajes



Fonte: Adaptado de Impacto® (2022)

O encaixe das formas plásticas na estrutura metálica provisória é feito com o apoio direto sobre as transversinas que são apoiadas nas longarinas. O processo de desforma se inicia quando o concreto atinge seu estado endurecido e a resistência mínima estabelecida em projeto.

Como as escoras metálicas que sustentam a estrutura estão fixadas somente nas longarinas principais, após a concretagem e dado o tempo de cura, é possível retirar as transversinas desengatando seus apoios sem remover o escoramento e as formas plásticas ficam livres para serem removidas.

No processo de endurecimento, o concreto adere às formas plásticas e os esforços de contato precisam ser vencidos para que a forma seja extraída. O processo para desmoldagem é feito utilizando uma ferramenta de extração simples e é realizado pelos funcionários de cada obra. A Figura 2 ilustra a extração das formas.

Figura 2 – Extração das formas plásticas



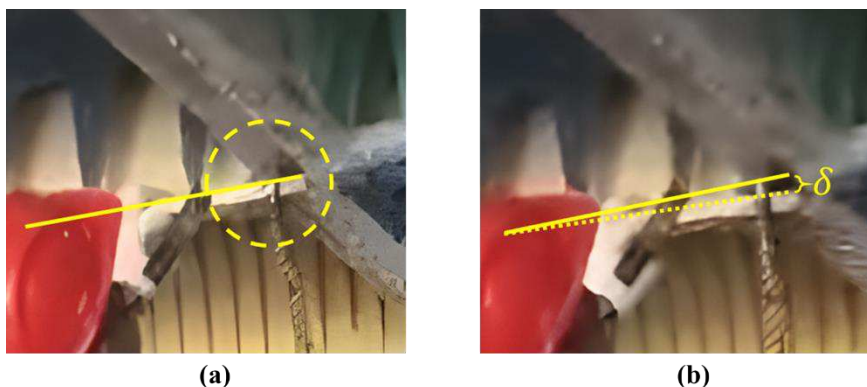
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

1.1 Justificativa

As formas plásticas são projetadas para que possam permitir a sua reutilização sem comprometimento dos requisitos básicos de durabilidade. Ademais, a eficiência das formas no que concerne ao melhor custo-benefício é essencial para se ter um sistema otimizado.

Percebe-se que a extração manual da forma, mostrada na Figura 2, normalmente acontece pelos cantos das bordas devido à melhor facilidade de encaixe das alavancas. No momento que o operário aplica uma força, deformações acentuadas são visualizadas nas bordas da forma, como ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Ilustração da deformação da forma no arrancamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Além disso, durante o processo de montagem do sistema, enquanto não há a concretagem, as formas ficam expostas à luz solar e conseqüentemente sofrem com os efeitos da exposição à radiação ultravioleta (UV) que aceleram o processo de degradação das propriedades do plástico.

Ante o exposto, as aplicações recentes mostraram que a vida útil dessas formas poderia ser prolongada, mas devido às exposições massivas às ações ambientais, combinado com o processo mecânico de desforma e manuseio, surgem fissuras típicas, bem caracterizadas, sempre nas regiões onde a ferramenta de extração é acoplada. Adicionam-se ainda eventuais danos causados pelo modo como as formas são às vezes jogadas no piso e danos causados pelo transporte e armazenamento. A Figura 4 ilustra as fissuras e fraturas características supracitadas.

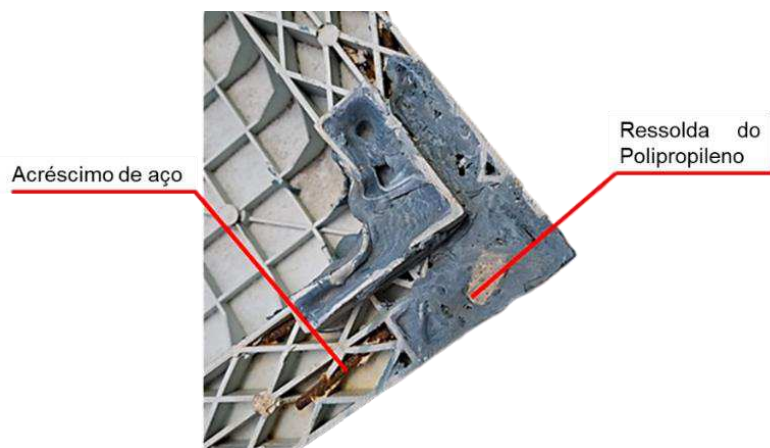
Figura 4 – Fissuras típicas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Embora as formas tenham uma vida útil muito boa, como uma tentativa de aumentá-la ainda mais, assim como sua eficiência e seu custo-benefício, reparos são realizados nas peças. Uma das tentativas de reparo muito utilizada é a colocação de um reforço com fios de aço para melhorar a resistência à flexão na região, em conjunto com a ressolda do polipropileno à quente. A Figura 5 mostra alguns reparos emergenciais normalmente realizados.

Figura 5 – Reparos emergenciais nas formas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Estudos preliminares têm detectado aspectos que podem ser aperfeiçoados visando melhorar a qualidade e a eficiência do sistema. No que concerne à forma plástica, sem realizar alterações no projeto atual, dois aspectos podem ser investigados: um relativo ao material e outro ao processo mecânico de extração das formas.

Portanto, encontrar por meio de análises experimentais, a caracterização do material, o comportamento de suas propriedades com o tempo em função da exposição ambiental aos raios UV e a definição de modelos constitutivos e de falha adequados são necessários para que ações possam ser realizadas no sentido de mitigar os danos.

O estudo aprofundado das propriedades do material utilizado nas formas plásticas é primordial para aperfeiçoar ainda mais a qualidade e a durabilidade das formas.

Além disso, compreender o processo de arrancamento em termos de esforços e deformações produzidas possibilita a proposição de metodologia e ferramental adequados para uma extração menos danosa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho objetiva avaliar os efeitos do envelhecimento do material na fissuração de formas plásticas para lajes, decorrentes do uso e do processo de extração, por meio de caracterização experimental e análises numéricas.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Conhecer o estado da arte sobre os efeitos de envelhecimento do material da forma plástica devido à exposição aos raios ultravioleta e sobre a modelagem numérica para análise do seu comportamento mecânico.
- b) Avaliar o comportamento das propriedades do material das formas plásticas, em particular do módulo de elasticidade, para as composições usualmente empregadas e para vários graus de envelhecimento por meio de ensaios em laboratório;
- c) Investigar e representar o comportamento dos materiais na fase plástica para as diferentes idades de envelhecimento;
- d) Estabelecer modelos constitutivos do compósito e simular numericamente o comportamento do material com a consideração de modelos de dano de materiais dúcteis;
- e) Avaliar a aplicabilidade de modelos de dano dúctil em compósitos de plásticos;

- f) Estimar se efeitos das cargas usuais são capazes de provocar dano nas formas plásticas através do método dos elementos finitos;
- g) Simular os efeitos de arrancamento na forma através de modelo numérico utilizando o método dos elementos finitos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentada a base teórica dos polímeros e suas características, em particular do polipropileno e do policarbonato que são os materiais estudados neste trabalho. Além disso, serão apresentadas as teorias de como o efeito do envelhecimento se comporta nos materiais e a base teórica de plasticidade e dos modelos de dano que serão utilizados no presente trabalho.

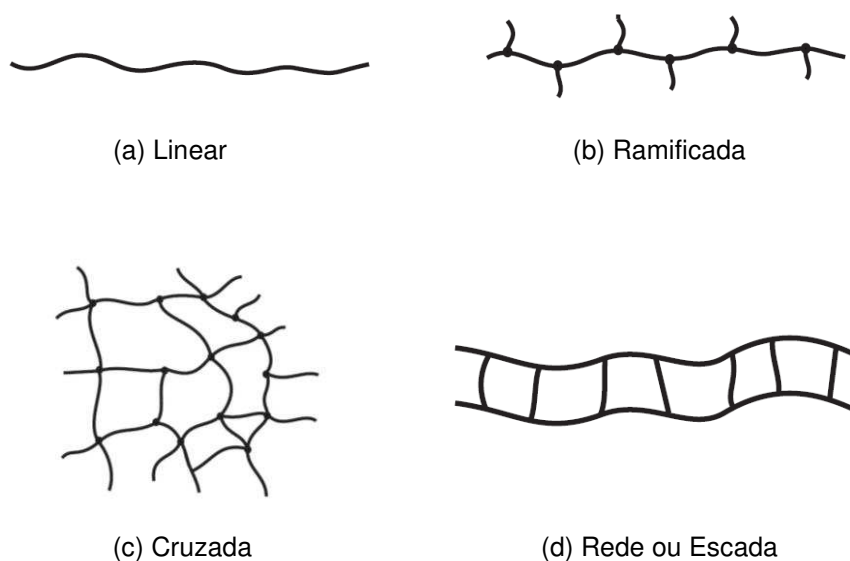
2.1 Polímeros

Os polímeros são materiais muito utilizados na indústria global nos mais diversos produtos como plásticos, espumas, resinas, entre outros. Esses materiais são compostos por macromoléculas que possuem uma padronização de repetições de compostos denominados de monômeros, os quais, têm ligações covalentes chamadas de *meros*, daí a denominação “polímeros” (MANO; MENDES, 2004).

2.1.1 Estrutura molecular

Chanda (2013) cita que os polímeros podem ter diferentes estruturas moleculares, dependendo de como os monômeros são organizados. Os principais tipos de estruturas moleculares dos polímeros são os polímeros lineares, ramificados, com ligações cruzadas e em rede (ou escada). A Figura 6 sintetiza os tipos de estrutura molecular dos polímeros.

Figura 6 – Estrutura molecular dos polímeros



Fonte: Adaptado de Chanda (2013)

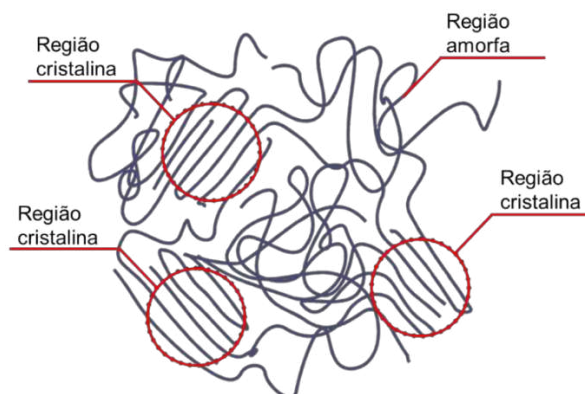
2.1.2 Morfologia

Os materiais podem também ser classificados em três grupos morfológicos dependendo da forma como a sua estrutura molecular é organizada. Estes podem ser cristalinos, semicristalinos ou amorfos.

O grau de cristalinidade de um material está diretamente relacionado à sua alta organização molecular, isto é, as moléculas estão compactadas em um alinhamento perfeito se aproximando de um cristal (CHANDA, 2013). Um material será considerado totalmente amorfo quando o estado de suas moléculas for completamente desordenado, representando o extremo oposto do polímero cristalino.

Nos polímeros, frisa-se que as suas estruturas nunca serão totalmente cristalinas, porém podem ser totalmente amorfas. Além disso, os polímeros podem conter traços das características cristalinas e amorfas em sua composição sendo denominados de semicristalinos. A Figura 7 ilustra a estrutura molecular de um polímero semicristalino.

Figura 7 – Estrutura molecular de um polímero semicristalino



Fonte: Adaptado de Canevarolo Jr., 2020

2.1.3 Classificação mecânica

Comumente, considera-se que todos os materiais poliméricos são plásticos; no entanto, é importante notar que nem todos os polímeros se classificam como plásticos. O que traduz um polímero como um plástico nada mais é que seu comportamento mecânico. Canevarolo Júnior (2020) cita que os polímeros são classificados em plásticos, elastômeros e fibras, já que cada um desses materiais tem propriedades mecânicas distintas.

Os plásticos são polímeros sintéticos que podem ser moldados em diversas formas e tamanhos, por meio de processos de injeção, extrusão ou moldagem por sopro. Apresentam baixa densidade, boa resistência à corrosão e facilidade de fabricação (CANEVAROLO JUNIOR, 2020). Estes materiais são amplamente utilizados na engenharia na fabricação de formas plásticas, tubos, eletrodutos flexíveis e rígidos, entre outros.

Já os elastômeros são polímeros com propriedades elásticas capazes de se deformar apresentando cadeias flexíveis amarradas umas às outras e com baixa densidade de ligação cruzada, que podem se deformar até duas vezes o seu comprimento original na temperatura ambiente e retornar rapidamente ao seu comprimento original após a remoção do esforço (CANEVAROLO JUNIOR, 2020). São muito utilizados em situações em que se exige resistência ao desgaste, amortecimento de vibrações, vedação e isolamento como a borracha sintética, as borrachas vulcanizadas e o silicone.

Por fim, define-se a fibra polimérica quando sua fabricação é dimensionalmente orientada, isto é, o comprimento da fibra é pelo menos 100 vezes superior ao seu diâmetro tornando-a com características particulares em uma dimensão principal (CANEVAROLO JUNIOR, 2020). A orientação forçada das cadeias poliméricas permite que as fibras se apresentem na forma de fios finos aumentando a resistência mecânica desses materiais. As fibras já são muito utilizadas em diversos materiais para fornecer, principalmente, uma melhora significativa da resistência à tração.

2.1.4 Classificação térmica de polímero

Os polímeros podem ser classificados em termofixos e termoplásticos. São classificados em termofixos os materiais que não amolecem quando aquecidos e não podem ser moldados novamente. Isso ocorre por que estes materiais são caracterizados por terem uma estrutura química tridimensional que é formada por ligações cruzadas covalentes, o que significa que a estrutura da cadeia de polímeros é rígida. (CANEVAROLO JUNIOR, 2020).

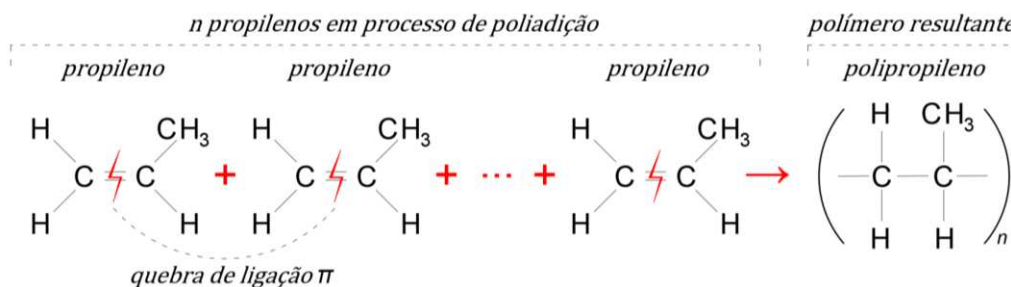
Os polímeros termoplásticos são conhecidos por serem materiais que, quando aquecidos e sob pressão substancial, amolecem e se tornam moldáveis nessa circunstância. Ao serem resfriados os termoplásticos endurecem tornando-se utilizáveis novamente, além de que estes materiais podem ser reciclados repetidamente sem sofrer alterações químicas significativas provendo um benefício ambiental.

2.2 Polipropileno

O polipropileno (PP) é um composto termoplástico de grande importância industrial devido à sua grande diversidade de uso, dentre eles nas formas plásticas de lajes nervuradas.

O PP tem esse nome, por ser formado pela polimerização de várias cadeias de propileno (também denominado propeno) que é um gás derivado do petróleo e atinge forma filamentosa após o processo (JAFELICE, 2013). A cadeia carbônica do PP pode ser obtida pela poliadicação de propileno como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Processo base de formação do polipropileno



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As propriedades mecânicas do polipropileno dependem diretamente da relação entre as suas fases cristalinas e amorfas e, por ser um polímero semicristalino, a temperatura de injeção afeta diretamente na orientação molecular o que muda as propriedades do material final (MANRICH, 2005).

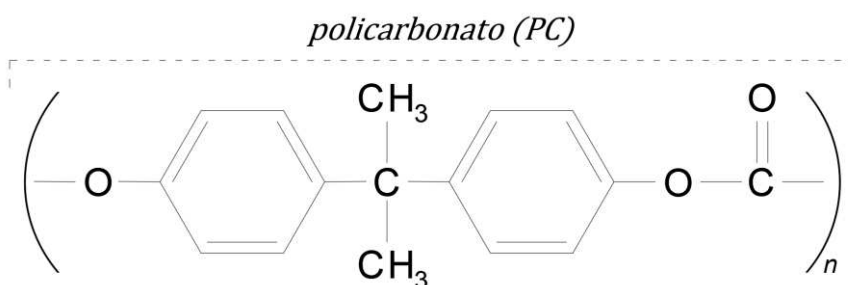
Callister (2008) cita que o PP é um tipo de plástico de boa resistência a produtos químicos e à alta umidade ambiental, todavia, apresenta baixa resistência ao impacto e à incidência de radiação ultravioleta (UV).

As formas plásticas têm em sua grande maioria a composição de polipropileno e, por isso, têm suas propriedades atreladas principalmente a esse material. Desse modo, o efeito ultravioleta afeta significativamente a estrutura molecular e propriedades mecânicas das peças.

2.3 Policarbonato

O policarbonato (PC) é um termoplástico de engenharia praticamente transparente, que se justifica devido às suas cadeias predominantemente amorfas, com excelentes resistências mecânicas à tração e ao impacto sendo muito utilizado como substituto do vidro em situações que a exigência mecânica é maior (CANEVAROLO JUNIOR, 2020). A Figura 9 mostra a formulação química estrutural da composição do policarbonato.

Figura 9 – Fórmula estrutural do policarbonato



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O policarbonato é quimicamente inativo e sua estrutura simétrica confere-lhe uma notável estabilidade dimensional. Além disso, é autoextinguível, exibindo uma resistência significativa ao fogo, deformação sob carga e às adversidades climáticas, além de serem mais leves de que vidros e outros plásticos de engenharia (CANEVAROLO JUNIOR, 2020).

2.4 Efeito do envelhecimento

Quando se discute sobre os efeitos do envelhecimento nas propriedades mecânicas dos materiais devido à incidência de raios ultravioleta, sabe-se que a origem primordial desses raios é a luz solar.

Todavia, nem toda a luz solar é composta por raios UV. Esse tipo de raio compreende uma faixa de frequência abaixo da cor violeta com comprimento de onda abaixo dos 400 nanômetros e resulta em cerca de 4% a 6% de todo o espectro luminoso vindo do sol (TAVARES, 2003).

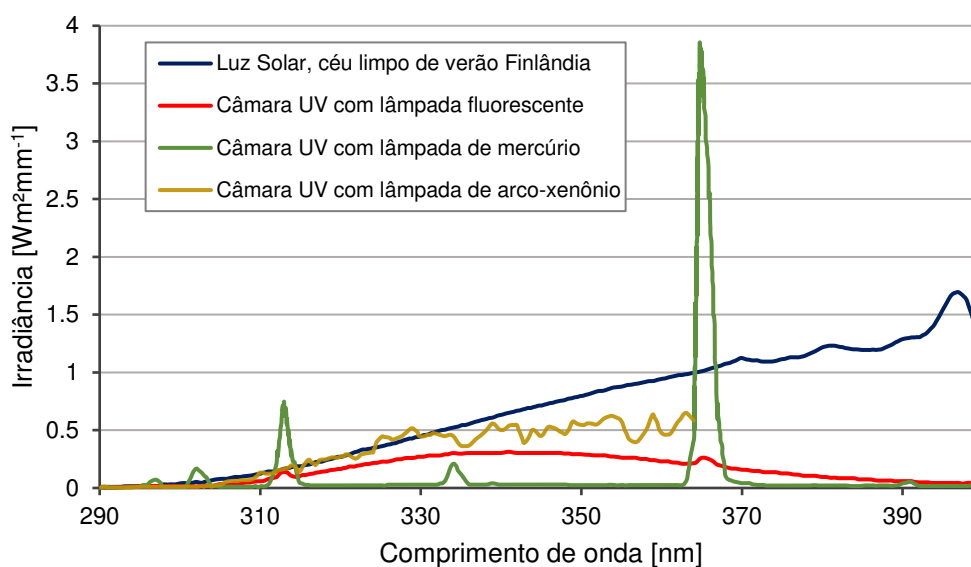
No mercado, existem diversos equipamentos que emitem tipos de ondas diferentes sendo as mais encontradas as lâmpadas arco-xenônio, as fluorescentes e as de mercúrio a vapor (BRENNAN; FEDOR, 1987).

Conforme Tavares (2003), as lâmpadas de arco-xenônio têm espectro mais equivalente à luz solar natural, enquanto as fluorescentes possuem mais favorecimento à degradação por maior concentração do espectro abaixo da casa dos 400 nanômetros, isto é, raios UV.

Heikkilä *et. al.* (2017) comprovaram que a faixa de comprimento de onda comportada pelos raios UV da energia vindo do sol é relativamente equivalente ao comportamento das lâmpadas de arco-xenônio.

Além disso, os autores mostraram que as câmaras de vapor de mercúrio apresentam picos de irradiância e as lâmpadas fluorescentes têm maior distribuição dos raios UV-A (320 nm a 400 nm) e UV-B (280 nm a 320 nm) decrescendo em seguida. A Figura 10 mostra o comparativo de diferentes lâmpadas que causam o envelhecimento acelerado com a luz solar.

Figura 10 – Comparação da irradiância UV entre lâmpadas artificiais e a luz do sol



Fonte: Adaptado de Heikkilä *et al.* (2017)

Tavares (2003), Callister (2008) e Manrich (2005), citam que os polímeros em geral são muito sensíveis à radiação, incluindo a ultravioleta. Tavares (2003) frisa que a exposição ambiental à radiação UV proveniente da luz solar tem grande influência no desempenho geral e durabilidade dos materiais poliméricos e que, por isso, o estudo dos efeitos da luz ultravioleta na degradação de propriedades mecânicas desses materiais é comumente estudado por diversos autores.

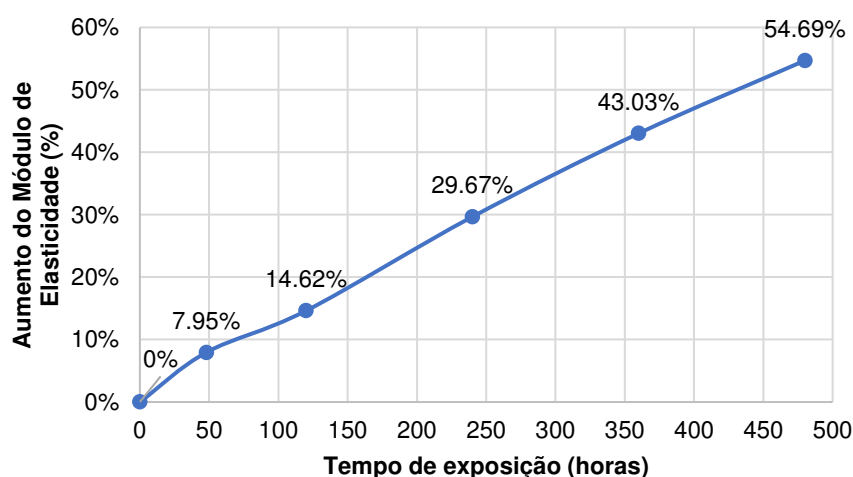
Boubakri *et al.* (2010) investigaram o impacto nas propriedades mecânicas do poliuretano termoplástico (TPU) e verificaram que o efeito dos raios UV afetavam a absorção de água pelas moléculas do polímero o que acarreta alterações significativas nas propriedades do material.

Liu *et al.* (2014) apuraram os efeitos da exposição artificial de filmes de poliuretano termoplástico (TPU) à luz UV com temperatura e umidade controladas. O autor cita que esse estudo foi importante para verificar a degradação do

envelopamento de naves espaciais estratosféricas com o TPU de modo a ratificar os danos causados pelos raios ultravioletas.

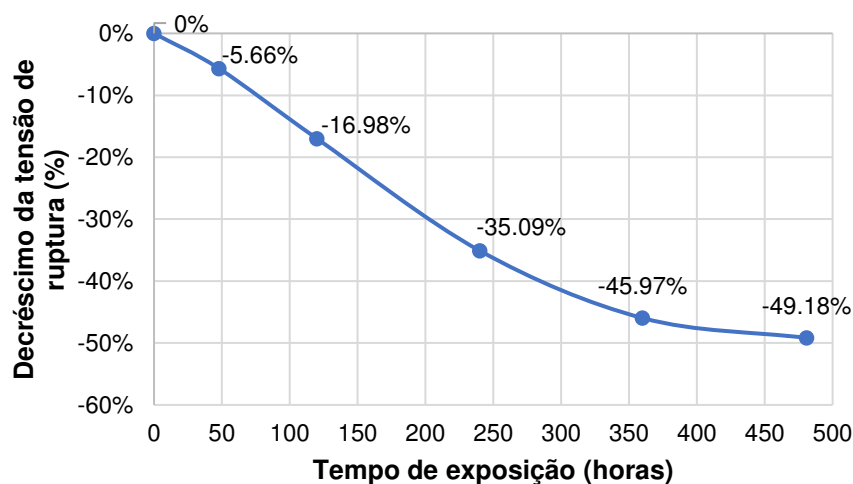
Os resultados dos estudos de Boubakri *et al.* (2010) e Liu *et al.* (2014) mostraram que tempos de exposição artificial de até 480 h produziram uma grande diminuição das tensões de ruptura dos filmes de poliuretano e que o módulo de elasticidade do material aumentou significativamente. A Figura 11 e Figura 12 mostram os efeitos do envelhecimento para o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura, respectivamente.

Figura 11 – Efeitos do envelhecimento no módulo de elasticidade



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2014)

Figura 12 – Efeitos do envelhecimento na tensão de ruptura



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2014)

O aumento do módulo de elasticidade de um material elastoplástico induz o aumento da rigidez de suas moléculas e diminui significativamente o tempo de permanência no regime elástico de deformação atingindo mais rapidamente o escoamento e a conseqüente falha completa.

Apesar de que esse aumento da rigidez possa parecer benéfico ele não é, uma vez que diminui a quantidade de água absorvida no processo de fusão do plástico, reduzindo a resistência termoplástica do material.

Os experimentos realizados que avaliaram os efeitos mecânicos e químicos que ocorreram nos polímeros só foram possíveis devido à utilização de câmaras artificiais que geraram a luz ultravioleta.

A literatura mostra que os efeitos da radiação UV é maléfica para as propriedades dos plásticos derivados do petróleo, por isso, serve de base para a avaliação dos resultados obtidos em experimentos nas câmaras UV.

2.5 Teoria da plasticidade

2.5.1 Introdução

A teoria da plasticidade busca explicar como os materiais se comportam quando, submetidos a solicitações, apresentam uma resposta elasto-plástica. A deformação total pode ser expressa pela soma de uma parcela elástica e outra plástica.

As deformações elásticas são reversíveis, enquanto as plásticas permanecem após a remoção da carga, sendo irreversíveis ou permanentes com o descarregamento. Essas deformações irreversíveis podem ser plásticas ou viscosas e ocorrem em nível cristalino. Essas deformações correspondem ao deslocamento relativo dos átomos que permanece após a carga ser retirada.

Além disso, o endurecimento (*hardening*) do material é um fenômeno que pode ocorrer. Nesse caso, ocorre que a resistência ao escoamento de certos materiais reais é influenciada pela quantidade de deformação plástica acumulada. Isso significa que a superfície de escoamento, que representa o limite de tensão em que o material começa a deformar permanentemente, pode variar em cada etapa de deformação plástica devido à história da deformação (POCKSZEVNICKI, 2004).

Ao aplicar cargas cíclicas de tração uniaxiais em um corpo, percebe-se que, em materiais dúcteis, a inclinação da curva tensão-deformação tende a diminuir, o que indica uma diminuição do módulo de elasticidade ao longo dos ciclos.

Para a correta análise de diferentes tipos de materiais, critérios de escoamento têm sido propostos na literatura, tais como os de Tresca e de von Mises para materiais dúcteis, e os de Drucker-Prager e de Mohr-Coulomb para materiais frágeis. Independente do critério a ser utilizado, a função de escoamento é dependente do tensor tensão (σ) e de variáveis potenciais termodinâmicas (A):

$$f(\sigma, A) = 0 \quad (1)$$

Dentre os critérios supracitados, o critério de falha de von Mises será mais explanado no presente trabalho, porque é um critério utilizado na análise de materiais dúcteis.

Sabe-se que essa teoria é aplicada principalmente em materiais metálicos, que possuem comportamento plástico, todavia o comportamento dos polímeros termoplásticos é similar e, por isso, será utilizado para avaliar os modelos de dano desses materiais.

2.5.2 Critério de falha de von Mises

O critério de falha de von Mises indica que o escoamento de um material se inicia quando a tensão octaédrica de cisalhamento (τ_{oct}) atinge um valor crítico k (CHEN; HAN, 2007). Usando a τ_{oct} em função do segundo invariante do tensor desviador (J_2), escreve-se

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}J_2} = \sqrt{\frac{2}{3}}k \quad (2)$$

onde k é a tensão de escoamento no cisalhamento puro e J_2 o segundo invariante do tensor desviador. Alternativamente, escreve-se

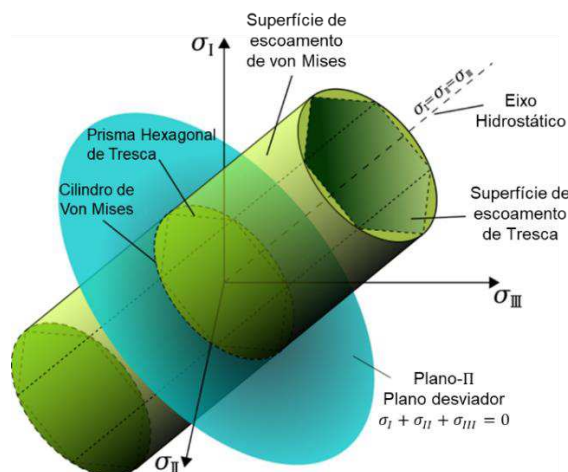
$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0 \quad (3)$$

Assim, o critério de von Mises pode ser expresso, em termos das tensões principais como como função da parcela desviadora, $f(\sigma^D)$, representada por

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 \quad (4)$$

De modo a qualificar as expressões acima, a Figura 13 mostra a representação do critério de falha de von Mises no espaço tridimensional simbolizando, também, o eixo hidrostático e o critério de Tresca.

Figura 13 – Representação tridimensional dos critérios de von Mises e Tresca



Fonte: Adaptado de Wikipedia (2009)

2.6 Leis de endurecimento

O processo de endurecimento (*hardening*) refere-se ao processo de aumento da rigidez do material baseado na quantidade de deformações plásticas acumuladas, já que há dependência da tensão de escoamento dos materiais com as tensões plásticas acumuladas. Desse modo, a superfície de escoamento pode ter diferentes estágios de deformação, devido ao histórico das deformações do corpo (CHEN; HAN, 2007)

Para representar esse fenômeno, diversos modelos foram desenvolvidos para esse comportamento. De modo geral, a lei do endurecimento isotrópico é dada por

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, k) = F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) - k^2(\varepsilon_{ij}^p) = 0 \quad (5)$$

em que k^2 é o tamanho da superfície de escoamento, e $F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p)$ representa o formato da superfície.

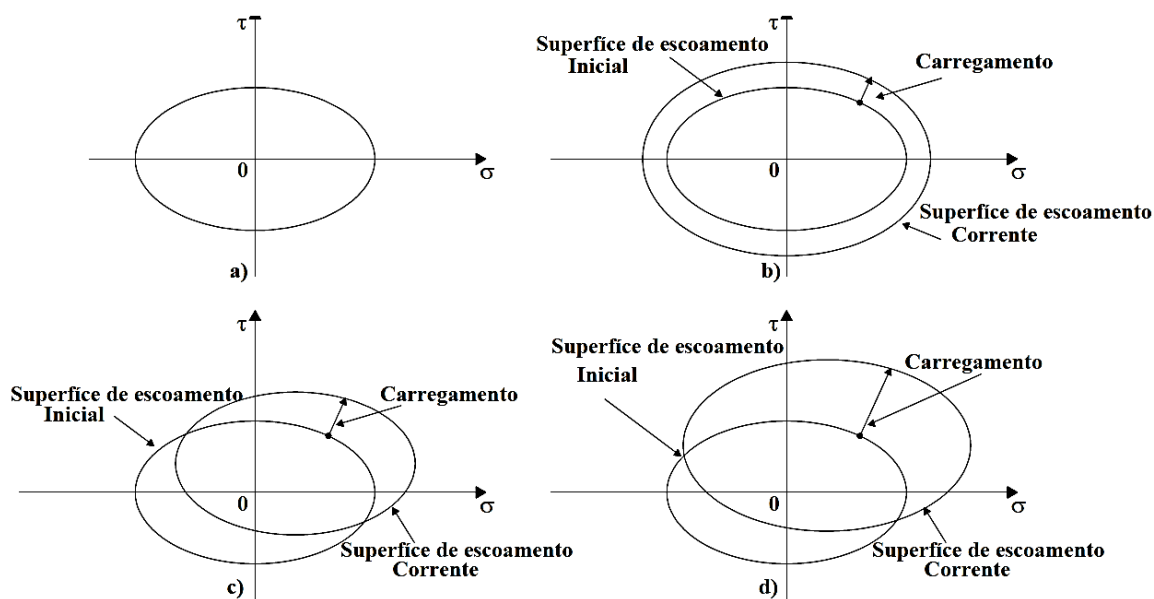
Um modelo de plasticidade pode não apresentar endurecimento. Nesse modelo, denominado plasticidade perfeita, assume-se que o critério de escoamento permanece constante durante toda a análise de carregamento, mesmo quando se

atinge o limite de escoamento do material. Por outro lado, quando se admite a possibilidade de variação desse limite, o problema passa a ser de plasticidade com encruamento. Isso depende do nível de carregamento e das cargas aplicadas e se há ou não ciclos de cargas.

O uso de carregamentos monotônicos, geralmente, resulta em modelos de endurecimento isotrópicos em que a superfície de escoamento aumenta proporcionalmente. Todavia, alguns materiais podem apresentar endurecimento “não regular”, i.e., em que a superfície de escoamento corrente não mantém a proporcionalidade em relação a original, apresentando um endurecimento cinemático.

Ademais, em alguns casos, ocorre uma mistura dos dois processos, resultando em um endurecimento misto, isto é, o limite de escoamento pode aumentar, no caso de endurecimento, ou até diminuir, no caso de amolecimento do material. A Figura 14 ilustra os tipos de endurecimentos.

Figura 14 – (a) Plasticidade perfeita, (b) Endurecimento isotrópico, (c) Endurecimento Cinemático e (d) Endurecimento misto



Fonte: Pockszevnicki (2004)

2.7 Mecânica do dano

2.7.1 Contextualização

A fim de entender o histórico de deformações e de tensões de um material até o seu limite de falha, é necessário identificar uma variável que represente o dano acumulado. Todavia, a caracterização desse processo é uma tarefa complexa que depende da escala de análise (CHEN; HAN, 2007).

O fenômeno do dano pode ser descrito como a presença de descontinuidades na superfície, como microfissuras, ou também por descontinuidades internas, como vazios (cavidades) gerados por quebras de ligações, por exemplo.

O dano vai desde a quebra inicial de ligações moleculares até o surgimento macroscópico de uma trinca sendo acompanhado por outros mecanismos de deformação. O dano pode ser dividido em três escalas distintas, a micro, meso e macroescala.

Tratando-se da microescala, fenômenos como o acúmulo de tensões em torno de defeitos ou interfaces, a ruptura de ligações e o aumento plástico de microcavidades internas são comumente precursores do dano nessa escala.

Já na mesoescala, ocorre o crescimento e a coalescência de microfissuras ou microvazios, que juntos podem iniciar a formação de uma trinca macroscópica. Esses eventos desempenham um papel importante na progressão do dano, à medida que a deformação continua a acontecer.

Finalmente, em uma escala macro, ocorre o crescimento efetivo de uma trinca visível a olho nu. Esse nível de dano é comumente estudado na mecânica da fratura e envolve a análise de fissuras, trincas e rachaduras que se propagam sob a influência das tensões aplicadas.

Cada um desses níveis descreve diferentes estágios da evolução do dano, oferecendo uma compreensão mais abrangente do fenômeno. É importante considerar esses diferentes aspectos para uma análise completa e precisa dos processos de danificação em materiais, porém a análise na mesoescala permite a representação do dano em uma unidade representativa de volume (RVE) que será abordada mais adiante.

Cada tipo de material apresenta mecanismos específicos de dano que afetam sua integridade estrutural. Nos metais, o dano é causado pela nucleação de

microfissuras devido ao acúmulo de discordâncias, já nos polímeros, o dano ocorre pelo rompimento das ligações entre as cadeias moleculares.

Por outro lado, em materiais compósitos como os polímeros reforçados com fibras, o dano se manifesta pelo desprendimento entre as fibras e a matriz polimérica. O uso de um modelo de dano calibrado e adequado para aquele material é essencial para avaliar numericamente o comportamento e a resistência do corpo ao tipo de carregamento que lhe é aplicado e a influência deste na geração do dano.

2.7.2 Representação da mecânica do dano

Como dito anteriormente, em uma escala meso ou intermediária, é possível aproximar o número de ligações quebradas ou microcavidades que surgem em um modelo que abrange a área das interseções dessas falhas com um plano específico.

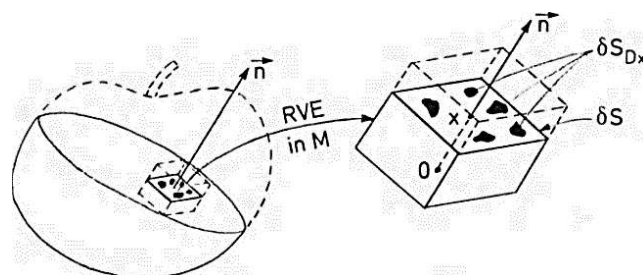
Para facilitar a manipulação, trabalha-se com uma grandeza adimensional normalizando essa área pelo tamanho de um elemento representativo de volume (ERV) ou *Representative Volume Element* (RVE). Essa dimensão é crucial para definir uma variável contínua na perspectiva da mecânica do contínuo.

O RVE possui dimensão suficiente para que seja considerada a homogeneidade na distribuição dos defeitos nele contidos, ao passo que o RVE é suficientemente pequeno para evitar gradientes acentuados de grandezas de interesse, como a deformação.

Dessa forma, é possível considerar a continuidade das funções que regem esses fenômenos que ocorrem no RVE, além de representar os valores médios das suas propriedades com a associação a um ponto material arbitrário. A

Figura 15 ilustra o elemento representativo de volume em um espaço arbitrário.

Figura 15 – Elemento representativo de volume



Fonte: Lemaitre (1996)

Dado um RVE, com um ponto arbitrário M , orientado por um plano definido por sua normal \vec{n} e coordenada \vec{x} ao longo da direção de \vec{n} , a área de interseção do plano com o RVE é denotada por δS . A área δS_{Dx} é formada pela soma das áreas de microfissuras pertencentes à δS .

A quantidade de dano que o material sofreu, representada pela função $D(M, \vec{n}, \vec{x})$ e atribuído ao ponto M na direção \vec{n} na coordenada \vec{x} , pode ser definido como a divisão do somatório das áreas de microvazios (δS_{Dx}) pela área total (δS), i.e.

$$D(M, \vec{n}, \vec{x}) = \frac{\delta S_{Dx}}{\delta S} \quad (6)$$

Essa definição rege que o valor escalar do dano é dependente direto do ponto arbitrário (M) e de sua normal (\vec{n}), limitado por $0 \leq D(M, \vec{n}) \leq 1$. Quando $D = 0$ o RVE não sofreu danos e quando $D = 1$ o RVE sofreu o dano máximo, levando à quebra completa do material.

2.7.3 Conceito de tensão efetiva

Dado um RVE uniaxial (Figura 16) tracionado com força \vec{F} no sentido da normal \vec{n} de intensidade F a tensão convencional é expressa por

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (7)$$

Ao supor que não haja forças nas áreas de microfissuras S_D e que a área líquida que a força atua após o aparecimento das microfissuras é $(S - S_D)$, a tensão efetiva ($\tilde{\sigma}$) é

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{S - S_D} \quad (8)$$

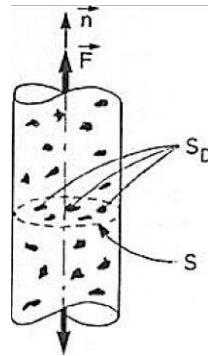
Assim, pode-se introduzir a varável do dano (D) na tensão efetiva resultando em

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{S \left(1 - \frac{S_D}{S}\right)} \quad (9)$$

Por fim, incluindo a Eq. (7), tem-se que a tensão efetiva é

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (10)$$

Figura 16 – RVE uniaxial



Fonte: Lemaitre (1996)

2.7.4 Princípio da deformação equivalente

Uma outra abordagem para o fenômeno do dano foi postulada por Lemaitre em 1971 com o objetivo de evitar análises micromecânicas individuais para cada tipo de dano. Segundo Lemaitre é possível estabelecer uma equação constitutiva de deformação para um material danificado utilizando a mesma abordagem utilizada para um material virgem, com a única diferença de substituir a tensão convencional pela tensão efetiva.

Assim, o princípio implica que a equação constitutiva para a deformação de um elemento de micro volume não sofre modificações em virtude da presença de uma microfissura em sua vizinhança. Lemaitre (1996) propôs que o dano pode ser representado também pela variação do módulo de elasticidade do material.

Para um estado onde o dano é nulo ($D = 0$) tem-se que a deformação elástica (ε^e) é dada por:

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} \quad (11)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material íntegro. Para um estado onde o dano existe, i.e., $0 < D < 1$, a tensão atuante é a tensão efetiva ($\tilde{\sigma}$), então pode-se acoplar a deformação elástica com a variável de dano, fazendo

$$\varepsilon^e = \frac{\tilde{\sigma}}{E} \quad (12)$$

e, substituindo a Eq. (10), resulta

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E(1-D)} \quad (13)$$

Introduzindo a equação do módulo de elasticidade no dano dada por

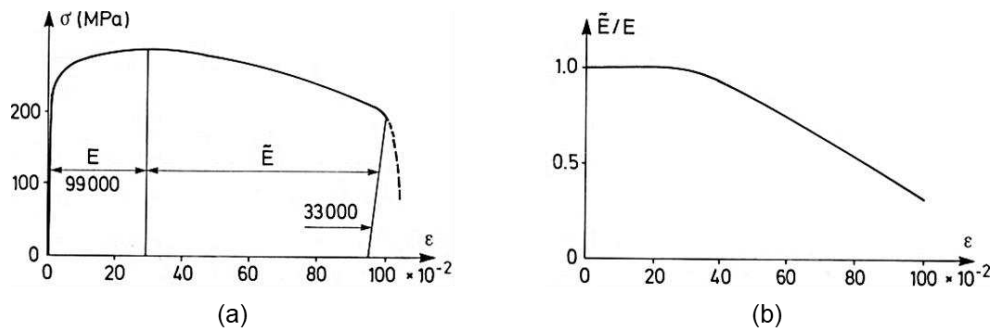
$$\tilde{E} = E(1 - D) \quad (14)$$

resulta em

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{\tilde{E}} \quad (15)$$

onde a deformação elástica é dependente da variação do módulo de elasticidade na evolução do dano. De modo a ilustrar essa variação do módulo com a evolução do dano, a Figura 17 ilustra as faixas do módulo inicial e com a variável do dano no gráfico tensão deformação e a relação entre os dois relacionada com a deformação total.

Figura 17 – Gráfico tensão-deformação com variação do módulo de elasticidade com o dano (a) e relação do módulo no dano com o módulo inicial (b)



Fonte: Lemaitre (1996)

Ademais, quando ocorre dano, de acordo com o princípio da deformação equivalente postulado acima, a função do escoamento (f) é dada por

$$f = f(\sigma, \mathcal{R}, X, D) = \left| \frac{\sigma}{1 - D} - X \right| - \mathcal{R} - \sigma \leq 0 \quad (16)$$

e a equação constitutiva tensão-deformação é:

$$\sigma = \tilde{E} \varepsilon^e \quad (17)$$

em que \mathcal{R} é a variável interna do endurecimento (*hardening*) isotrópico, X é uma variável interna do endurecimento cinemático, σ é o escoamento do material, D a variável do dano.

2.7.5 Critério de ruptura

A ruptura do RVE é iniciada por uma trinca que ocupa toda sua superfície, isto é, quando o dano $D = 1$. Em muitos casos, essa ruptura é causada por um

processo de instabilidade que induz, de forma repentina, a cisão dos átomos na área de resistência restante (LEMAITRE, 1996).

Essa cisão é caracterizada por um valor crítico de dano, D_c , o qual depende do material e das condições de carregamento. A cisão final dos átomos é caracterizada por um valor crítico de tensão efetiva, representada por uma força que atua numa área remanescente que tende a zero. Utilizando a Eq. (10), sabendo que para a ruptura completa $D = D_c$, tem-se que quando D tender a 1 pode-se definir a tensão máxima (σ_∞) como

$$\sigma_\infty = \frac{\sigma}{1 - D_c} \quad (18)$$

Por fim, como a tensão última do material (σ_u) é mais simples de ser encontrada, pode-se estimar o dano crítico com a relação

$$D_c \simeq 1 - \frac{\sigma_R}{\sigma_u} \quad (19)$$

onde σ_R representa a tensão nominal de fratura do material.

2.7.6 Dano crítico

Antes que uma microfissura seja iniciada, resultando em um dano, é necessário que haja microtensões acompanhadas de incompatibilidades de microdeformações (LEMAITRE, 1996). Exemplificando num caso de tração pura, isso corresponde a um valor crítico de deformação plástica (ε^p) que é inferior à deformação plástica onde o dano começa a ocorrer (ε_{pD}). A relação entre ambas pode ser representada por

$$\varepsilon^p < \varepsilon_{pD} \rightarrow D = 0 \quad (20)$$

2.8 Modelo de dano de Lemaitre

Ante à necessidade de mensurar o dano nos materiais dúcteis, Lemaitre (1996) cita que o princípio das deformações equivalentes busca fugir da análise micromecânica para avaliar o dano na meso escala. Lemaitre (1996) propõe uma abordagem sobre a variação do módulo de elasticidade do material. No caso, pode-se pensar que à medida que o dano aumenta, ocorre a diminuição do módulo de elasticidade e conseqüentemente o corpo torna-se mais suscetível à falha completa.

Para o dano $D = 0$ e módulo de elasticidade E a deformação elástica ε^e é dada por

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} \quad (21)$$

Ao considerar a diminuição do módulo de elasticidade à medida que o dano aumenta, a deformação elástica para o estado do dano atual (ε^e) é representada por

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E(1-D)} \quad (22)$$

Lemaitre (1996) define ainda o potencial de energia de dano para pequenos deslocamentos e deformações na meso escala como

$$\psi = \psi^{ed}(\varepsilon^e, D) + \psi^p(R) \quad (23)$$

em que $\psi^{ed}(\varepsilon^e, D)$ é a função que representa o dano elástico que é dependente do tensor de deformação elástica (ε^e) e da variável escalar do dano (D), e $\psi^p(R)$ que é dependente do escalar interno relacionado ao dano isotrópico (R).

Lemaitre (1996) cita que a formulação do potencial do dano elástico é

$$\psi^{ed}(\varepsilon^e, D) = \frac{1}{2}(1-D)\mathbb{D}^e : \varepsilon^e : \varepsilon^e \quad (24)$$

onde \mathbb{D}^e representa o tensor constitutivo elástico. Dessa formulação é necessário definir taxa de densidade de energia de deformação elástica liberada, que desempenha papel fundamental no fenômeno do dano. A força termodinâmica conjugada com a variável de dano interna (Y) é dada por:

$$Y = \frac{w_e}{1-D} \quad (25)$$

em que w_e é a densidade de energia de deformação elástica que é dada por:

$$w_e = \frac{1}{2} \left[\frac{(1-\nu)\sigma^D : \sigma^D}{E(1-D)} + \frac{3(1-2\nu)\sigma^{H^2}}{E(1-D)} \right] \quad (26)$$

onde σ^D é a parcela desviadora e σ^H a parcela hidrostática da energia de deformação plástica. Por fim, substituindo-se (26) em (25) e incluindo a relação de von Mises escreve-se o Y como

$$Y = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{eq}^2}{E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma^H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \quad (27)$$

onde $\frac{\sigma^H}{\sigma_{eq}}$ é o fator de triaxialidade do corpo. Definindo R_v como

$$R_v = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma^H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \quad (28)$$

e relacionando a tensão de dano equivalente ($\tilde{\sigma}_{eq}$) com a de von Mises em

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{1 - D} \quad (29)$$

tem-se

$$Y = \frac{1}{2} \frac{\tilde{\sigma}_{eq}^2}{E} R_v \quad (30)$$

Ante às formulações propostas, Lemaitre (1996) frisa que a tensão de dano equivalente, representada por $\tilde{\sigma}_{eq}$, é diferente da tensão equivalente de von Mises (σ_{eq}) devido ao fator de triaxialidade, uma vez que a plasticidade do material é principalmente causada por cisalhamento e distorções que independem da parcela hidrostática.

Além disso, Lemaitre (1996) cita que o fator de triaxialidade (σ^H / σ_{eq}) é um parâmetro crucial na análise de falha de materiais, especialmente na fratura. É importante destacar que, à medida que a ductilidade do material diminui, o fator de triaxialidade aumenta, i.e., conforme o material se torna menos capaz de se deformar plasticamente, a condição de triaxialidade se torna mais significativa no processo de falha.

Os polímeros utilizados, em seus estados iniciais, apresentam características de escoamento similares aos metais é possível a utilização do modelo de dano dúctil com a evolução de dano nesses compósitos dentro do programa de elementos finitos.

A utilização desse modelo foi abordada por Pulungan *et al.* (2017) que avaliaram a interação entre a fibra de vidro e um termoplástico de polipropileno utilizando o modelo de dano dúctil de Lemaitre baseado no critério de falha de von Mises para avaliar o comportamento do material termoplástico com a inclusão da evolução do dano.

Pulungan *et al.* (2017) compararam resultados experimentais de laboratório de ensaios de tração com os modelos de elementos finitos que simularam o dano através de cargas transversais.

O estudo concluiu que o modelo de dano dúctil conseguiu ter uma aproximação muito boa quando comparada com os resultados experimentais em termos das curvas de tensão-deformação, incluindo as porções lineares e não-lineares e até o ponto de falha, isto é, quando o dano é máximo. Assim, a

implementação do dano nos elementos termoplásticos é possível através de uma ferramenta nativa do programa de elementos finitos e será mostrada posteriormente.

3 METODOLOGIA

As etapas metodológicas dividem-se em experimentações de laboratório por meios de ensaios em corpos de prova moldados a fim de verificar suas características e comportamentos e de análises numéricas utilizando o programa de elementos finitos de modo a verificar os efeitos dos esforços aplicado e do dano nas formas plásticas.

A determinação das mudanças nas propriedades do material das formas plásticas ao longo da exposição aos raios UV quanto a sua rigidez, resistência ao impacto, à flexão, à tração e à quebra são necessárias para verificar a correlação entre cada fator com o envelhecimento.

Neste capítulo serão apresentadas as etapas metodológicas dos ensaios de laboratório de tração, flexão e impacto IZOD, assim como os procedimentos e considerações utilizadas para realizar as calibrações e ensaios numéricos posteriores.

3.1 Ensaios de laboratório

Para a determinação das propriedades mecânicas das formas plásticas é necessário ter a composição do compósito utilizado. Devido ao custo elevado do polipropileno virgem, além de se ter uma produção sustentável, utiliza-se também material reciclado na composição do compósito.

Além do polipropileno virgem e reciclado, outro compósito utilizando o policarbonato também pode ser usado na fabricação das formas plásticas. Assim, suas propriedades mecânicas, assim como as dos outros materiais também foram avaliadas.

Normalmente, a mistura é dada por 70% em massa de material virgem e 30% de material reciclado, mas dependendo dos custos dos fornecedores esses percentuais podem mudar.

A resistência mecânica do material reciclado é geralmente inferior à de um material 100% puro e, por isso, pode-se ter o aumento das probabilidades de danos que geram fissuras típicas nas bordas e a posterior quebra.

Como dito anteriormente, os materiais plásticos são sensíveis à ação da luz ultravioleta, apesar de ter uma boa resistência à fadiga. Daí, entender o comportamento mecânico do compósito é essencial para desenvolver melhorias.

Diante dessa vulnerabilidade, é comum a adoção em todas as misturas de um pequeno percentual de aditivo de proteção UV. Além disso, em prol da melhoria da deformabilidade das formas plásticas, também é adotado um percentual de adição elastomérica.

De modo simplificado, os ensaios de flexão, tração e impacto IZOD conforme as normas D790 (ASTM, 2017), D638 (ASTM, 2014) e D256 (ASTM, 2010), respectivamente, serão realizados para 3 tipos de misturas. A escolha dessas composições foi motivada pela Impacto®, uma vez que eram materiais que compunham as formas plásticas estudadas neste trabalho. A Tabela 1 ilustra a composição das misturas plásticas.

Tabela 1 – Composição das misturas para as formas plásticas estudadas

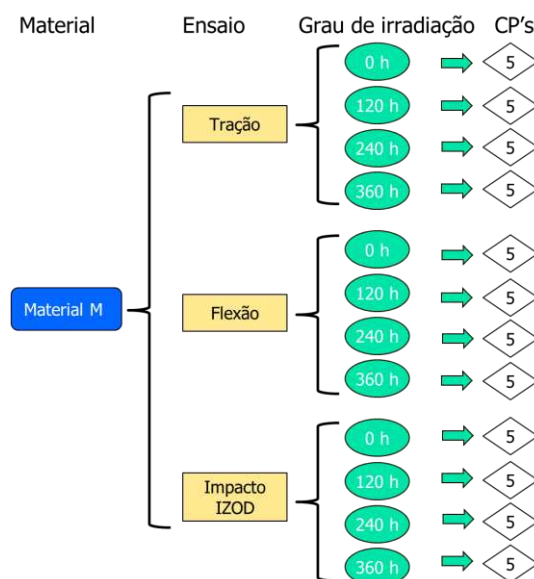
Material	Composição
Compósito 1 (E76)	96% PP Virgem + 4% Elastômero
Compósito 2 (E77)	84% Policarbonato + 12% Elastômero + 4% Anti-UV
Compósito 3 (E78)	66% PP Virgem + 26% PP Reciclado + 4% Elastômero + 4% Anti-UV

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Em cada ensaio as amostras serão envelhecidas artificialmente, sendo submetidas à exposição de radiação em câmara de ultravioleta com os tempos de 120, 240 e 360 horas, incluindo uma amostra não submetida à radiação (0h). Em cada ensaio, para cada nível de irradiação, serão utilizados 5 corpos de prova conforme recomendações normativas.

Assim, para cada composição serão realizados 3 ensaios, em cada ensaio serão considerados 4 graus de exposição, e para cada grau de exposição serão utilizados 5 corpos de prova, totalizando 60 corpos de prova por mistura. Então, para as três composições, serão utilizados ao todo 180 corpos de prova. A Figura 18 sintetiza o esquema de envelhecimento e ensaios de cada mistura analisada.

Figura 18 – Esquema de ensaio para cada material



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

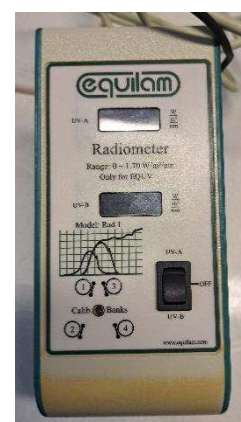
Todos os corpos de prova foram fabricados igualmente, no mesmo local, com a mesma temperatura de injeção e com o mesmo maquinário, de modo a minimizar erros indesejados que prejudiquem a análise das propriedades mecânicas.

Os corpos de prova foram envelhecidos numa máquina de intemperismo acelerado que inclui spray de água e controle automático de radiação ultravioleta da marca Equilam e modelo EQUV. A Figura 19 mostra a máquina de ensaio (a) e o controlador automático de radiação UV (b).

Figura 19 – Esquema de ensaio para cada material



(a) Máquina de envelhecimento



(b) Controlador

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os corpos de prova serão armazenados simultaneamente sob as mesmas condições de temperatura, umidade e exposição aos raios artificiais da lâmpada ultravioleta e à medida que forem atingindo os tempos de ensaio, serão retirados da câmara para serem ensaiados adequadamente, seguindo os preceitos normativos.

Todos os ensaios de materiais injetados serão realizados em parceria com a Impacto® e o SENAI. Os ensaios foram acompanhados e supervisionados pela equipe do projeto.

3.1.1 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão em três pontos ASTM D790 é um método padrão para determinar as propriedades de flexão de materiais plásticos. Este ensaio é frequentemente utilizado para avaliar a resistência à flexão, o módulo de elasticidade na flexão e a deformação de um material.

O processo de ensaio consiste na preparação das amostras do material a ser testado. Para os materiais termoplásticos, escopo do estudo deste trabalho, a ASTM D790 recomenda que sejam moldados 5 corpos de prova retangulares para cada tipo de material testado.

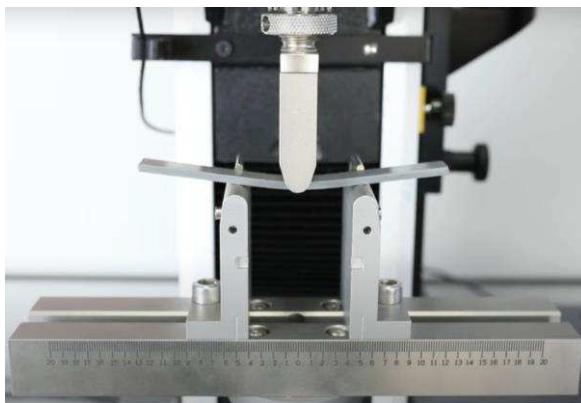
Para os materiais termoplásticos, a ASTM D790 cita que as dimensões recomendadas são 12,7 mm de largura, 3,2 mm de espessura e 127 mm de comprimento. O ensaio deve ocorrer respeitando a proporção vão-espessura de 16:1 com tolerância ± 1 mm, ou seja, para uma espessura recomendada de 3,2 mm o vão entre os eixos do ensaio deve ser de 51,2 mm.

A norma disponibiliza dois procedimentos de teste dos materiais. O procedimento A é utilizado para materiais em que ocorre a ruptura em pequenas deflexões (ASTM, 2017). Por outro lado, o procedimento B é utilizado em materiais que não quebram facilmente em pequenas deflexões ou que escoam na superfície externa do corpo de prova (ASTM, 2017).

A diferença principal entre os dois procedimentos é a taxa de deformação na aplicação da carga de teste. Enquanto a taxa de deformação no procedimento A é de 0,01 mm/mm/min no procedimento B a taxa é dez vezes maior com 0,10 mm/mm/min (ASTM, 2017). Além disso, os resultados do módulo de elasticidade tangente obtido pelo procedimento A têm menores desvios padrões quando

comparado com os resultados do resultado B (ASTM, 2017). A Figura 20 mostra a representação do ensaio nos corpos de prova retangulares termoplásticos.

Figura 20 – Ensaio de flexão em três pontos exemplo



Fonte: Instron (2019)

Durante o ensaio, a carga é aumentada gradualmente até que a amostra falhe ou que um limite pré-determinado de deformação seja alcançado. As deflexões são medidas por uma estação de medição computadorizada. Com as cargas aplicadas, a norma ASTM D790 utiliza da teoria linear para obter a partir das deformações medidas no ensaio a tensão normal de flexão nas fibras externas (σ_f) por meio de

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (31)$$

em que P é a carga máxima registrada, L corresponde ao vão entre os apoios, b é a largura e d a espessura da seção transversal do corpo de prova. A ASTM D790 cita que equação é aplicável apenas a materiais em que a tensão é linearmente proporcional à deformação e que as deformações são pequenas.

Assim, a equação é válida para obter dados de comparação e especificação em uma deformação máxima de até 5% além do estado elástico na superfície externa do corpo de prova testado.

Pela teoria linear a deflexão D no cento do corpo de prova é dada por

$$D = \frac{PL^3}{48EI} \quad (32)$$

Além das tensões, obtém-se as deformações e o módulo de elasticidade do material. Pode-se calcular as deformações nas fibras mais externas à flexão do corpo de prova por meio de

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (33)$$

onde ϵ_f corresponde a deformação. Por fim, o módulo de elasticidade tangente na flexão E_B é calculado por

$$E_B = \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} = \frac{PL^3}{4Dbd^3} \quad (34)$$

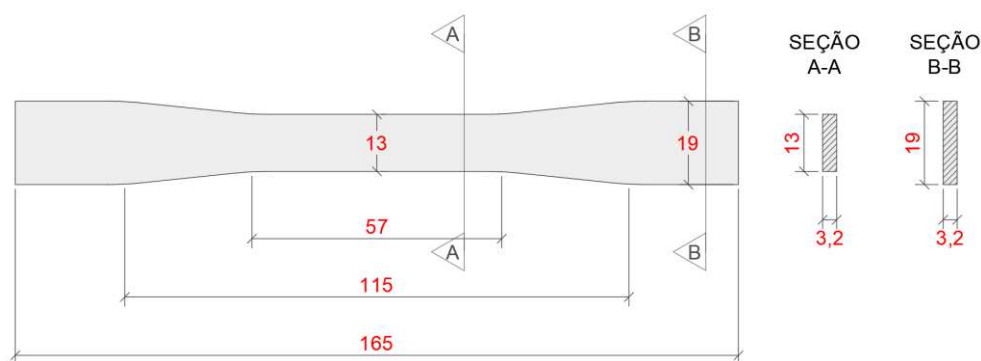
A ASTM D790 frisa que o método de cálculo não é adequado para deformações superiores a 5%. Assim, para materiais que não apresentam escoamento nem ruptura dentro desse limite de deformação, é recomendado considerar outras propriedades mecânicas relevantes, como o ensaio de tração regido pela ASTM D638.

3.1.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um procedimento padronizado pelo ASTM D638 para determinar as propriedades mecânicas de materiais poliméricos, incluindo resistência à tração, alongamento na ruptura, módulo de elasticidade e deformação na ruptura. O ensaio é realizado em uma máquina universal de ensaios, que é capaz de aplicar uma carga axial crescente a uma amostra de teste até que ela se rompa.

A ASTM D638, frisa que cada amostra tem forma retangular com uma redução da largura na região central garantir que a ruptura ocorra neste trecho, conforme mostrada na Figura 21.

Figura 21 – Corpo de prova ensaio de tração



Fonte: Adaptado de ASTM D638

O corpo de prova é submetido à carga, numa distância entre as garras de 115 mm, à uma taxa constante de tração na máquina de ensaio universal EMIC DL-2000 que tem suporte a cargas de até 20 kN conforme ilustra a Figura 22.

Figura 22 – Ensaio de tração na máquina universal EMIC DL-2000



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Durante o ensaio, os dados de carga e alongamento são registrados continuamente através de uma célula de carga e um deflectômetro, respectivamente. Os dados obtidos são, de início, as cargas e deslocamentos ao longo do ensaio. A partir daí é possível a obtenção das curvas de tensão-deformação de engenharia através da transformação dos dados.

O ensaio não obtém dados verdadeiros de tensão-deformação, uma vez que utiliza a área líquida inicial (A_l) do corpo de prova para encontrar a tensão instantânea (σ_i) através da divisão da força instantânea (F_i) pela área inicial dado por:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_l} \quad (35)$$

A deformação de engenharia obtida do corpo de prova é encontrada através da divisão do alongamento instantâneo (Δl_i) pelo comprimento inicial do corpo de prova (L_0) aplicando-se:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_i}{L_0} \quad (36)$$

Os dados encontrados são analisados para determinar as propriedades mecânicas do material, incluindo a resistência à tração, alongamento na ruptura, módulo de elasticidade e deformação na ruptura.

Por fim, o cálculo do módulo de elasticidade é realizado pela inclinação da reta de tendência na fase elástica da curva de tensão *versus* deformação obtida para cada corpo de prova após os ensaios.

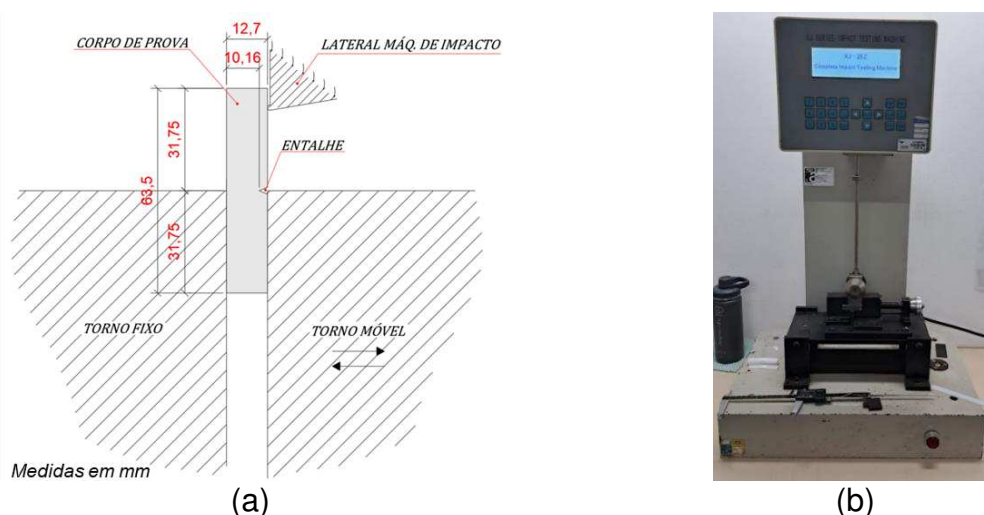
3.1.3 Ensaio de impacto IZOD

O ensaio de impacto tipo IZOD é utilizado para medir a resistência ao impacto de materiais plásticos. A ASTM D256 cita que o método de ensaio mais utilizado para aferir essa resistência ao impacto utiliza um corpo de prova prismático com seção retangular com um pequeno entalhe.

O corpo de prova permanece engastado verticalmente como um modelo de viga e recebe um impacto pendular único através de uma máquina de testes. O corpo de prova possui 63,5 mm de comprimento, 12,7 mm de largura e entalhe de 2,54 mm feito na metade do comprimento do corpo permanecendo a outra metade engastado na base.

A espessura do corpo de prova deve ser entre 3 mm e 12,7 mm com o entalhe feito no menor lado, sendo que a espessura de 3 mm é comumente mais utilizada em compósitos plásticos. A Figura 23 ilustra o detalhe do corpo de prova (a) e a máquina utilizada (b).

Figura 23 – Detalhe corpo de prova e máquina de ensaio impacto IZOD



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O ensaio é realizado com a queda livre do braço de alavanca que acerta o topo do corpo de prova com a energia de queda do martelo de impacto que pode não romper, romper parcialmente ou provocar a quebra total do corpo de prova. A energia de colisão é registrada pela máquina.

A força necessária para romper a amostra é registrada pela máquina e é usada para calcular a resistência ao impacto do material, expressa em Joules por metro (J/m). O processo de ensaio da ASTM D256 é repetido em várias amostras a fim de produzir uma média de valores de resistência e seus desvios padrões garantindo a precisão e a confiabilidade dos resultados.

3.2 Simulações Numéricas

O estudo numérico foi realizado usando um programa de elementos finitos (MEF). A Impacto® forneceu o modelo tridimensional estrutural das formas plásticas para serem analisadas.

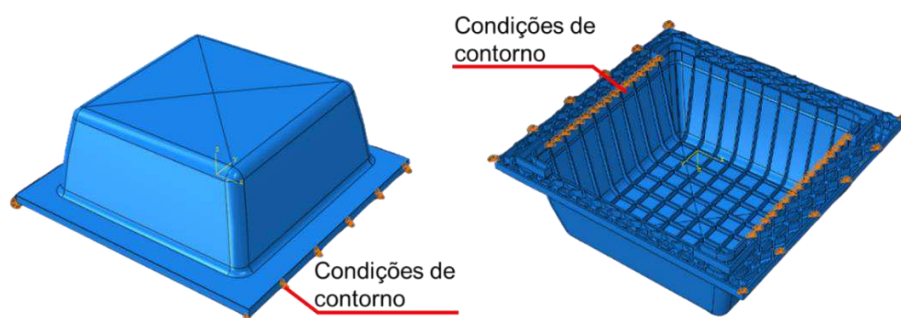
Para a análise numérica, os resultados dos ensaios foram utilizados para a realização da calibração do modelo, incluindo módulo de elasticidade, curvas plásticas e gráficos de tensão-deformação. A calibração do modelo foi realizada através da representação dos ensaios de tração de modo que as curvas de tensão-deformação e os parâmetros de dano representassem o modelo do ensaio de laboratório.

3.2.1 Forma plástica sob cargas usuais de trabalho

Inicialmente, buscou-se entender o comportamento da forma plástica sob os esforços da fase construtiva, isto é, sob os carregamentos oriundos da laje, trânsito de pessoas e maquinários.

Desse modo, aplicou-se uma carga uniformemente distribuída sob o topo da caixa plástica e definiram-se as condições de contorno restringindo-se os deslocamentos em apenas dois dos quatro lados, justamente os locais onde estão as transversinas de apoio como mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Condições de contorno da forma sob trabalho normal



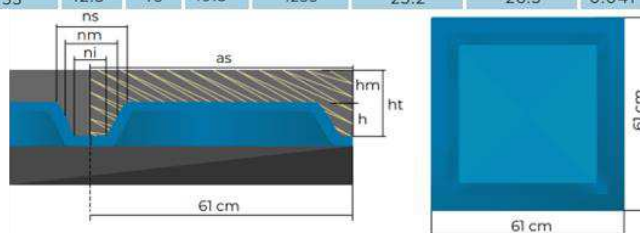
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Com essa análise buscou-se encontrar os esforços que ocorrem devido ao peso da estrutura sobre as formas durante um processo de concretagem e avaliar para diferentes idades de envelhecimento. Sabe-se que o carregamento varia com a altura da capa de concreto sobre as formas e pela altura da forma.

A forma utilizada nas análises tem altura de 20 centímetros, desse modo, a capa de concreto relativa será baseada nessa altura. A Figura 25 mostra o encarte da Impacto® com a relação das alturas e suas especificações para a altura mencionada.

Figura 25 – Encarte do sistema PavPlus

ALTURA DO MOLDE h(cm)	ESPESSURA DA LÂMINA hm(cm)	ALTURA TOTAL ht(cm)	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO as(cm ²)	CENTRO DE GRAVIDADE (cm) face inferior	EQUIVALÊNCIA EM INÉRCIA (cm)	VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO (Kg/m ²)	EQUIVALÊNCIA EM CONSUMO DE CONCRETO (cm)
			ni(cm) inferior	nm(cm) médio	ns(cm) superior				(m ³ /und)	(m ³ /m ²)		
20	7	27	12.5	16	19.5	747	18.0	20.2	0.041	0.109	402.3	16.1
20	10	30	12.5	16	19.5	930	20.1	22.6	0.041	0.109	477.3	19.1
20	15	35	12.5	16	19.5	1235	23.2	26.5	0.041	0.109	602.3	24.1

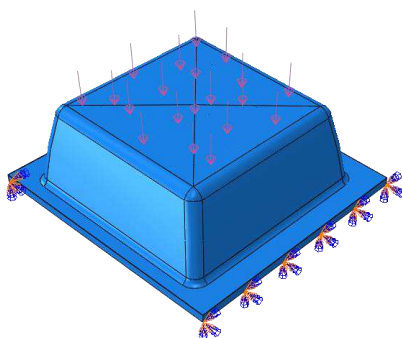


Fonte: Adaptado de Impacto Protensão (2022)

A partir da figura ilustrada acima, optou-se por um carregamento mais extremo que simulasse situações mais carregadas. Assim adotou-se uma espessura da lâmina de concreto acima das formas como sendo 15 centímetros para as simulações numéricas.

O peso da laje foi aplicado na região superior como uma pressão equivalente. Além dessa carga, considerou-se em conjunto uma estimativa de carga acidental de 1,50 kN/m² relacionada à movimentação de pessoas e maquinários durante a construção. A Figura 26 mostra como foi considerado o carregamento para as simulações numéricas.

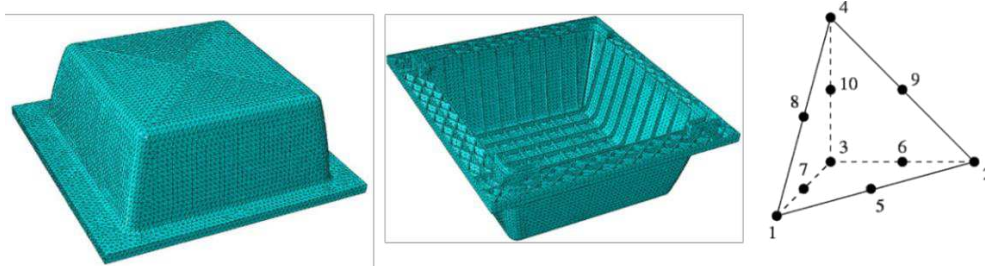
Figura 26 – Cargas usuais de trabalho aplicadas na forma



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A simulação foi realizada utilizando uma malha discretizada em MEF com elementos tetraédricos de dez nós (C3D10) com 165.993 elementos para obter-se resultados mais precisos. A Figura 27 ilustra a malha utilizada e o elemento que a compõe.

Figura 27 – Malha discretizada utilizada na análise e elemento C3D10



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A simulação numérica foi realizada utilizando um modelo não linear tridimensional sob uma análise linear com incorporação de dano calibrado para cada tipo de material de composição das formas. O processo de calibração do dano está apresentado mais adiante.

3.2.2 Forma plástica em processo de pré-arrancamento

Estima-se por observações em campo, que o deslocamento do ponto de aplicação da carga até se atingir a carga de arrancamento é da ordem de grandeza da espessura da borda da forma. Esse processo mecânico em conjunto com a degradação das propriedades mecânicas pode ser responsável pela geração de fissuras típicas.

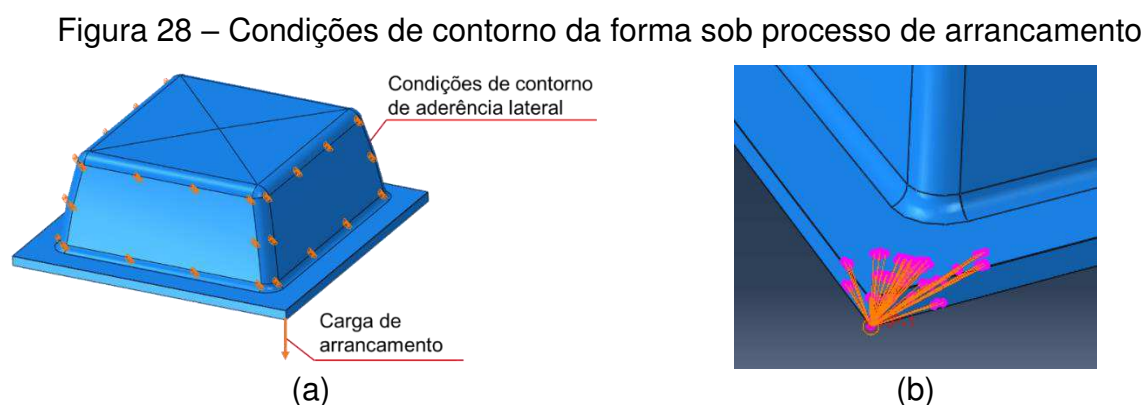
Buscou-se analisar os esforços e deslocamentos que ocorrem na forma plástica quando ocorre a aplicação da carga de arrancamento. Para isso, aplicaram-se condições de contorno que simulassem a aderência do concreto com as laterais da forma restringindo os deslocamentos nos eixos x , y , e z .

Tal fato justifica que a ocorrência dos efeitos de arrancamento mais prejudiciais na forma ocorrem logo antes de ser excedida a tensão de adesão entre a forma e o concreto.

Desse modo, avaliar em um modelo numérico as tensões geradas para um deslocamento na ordem de grandeza da espessura da borda da forma é um fator a se investigar. Buscou-se analisar as tensões ocasionadas pelo arrancamento.

Além disso, para que o deslocamento não ficasse concentrado na ponta da forma utilizou-se da ferramenta de acoplamento (*coupling*) para que alguns nós fossem deslocados em conjunto, o que simula de forma mais realista a aplicação da ferramenta de extração da forma

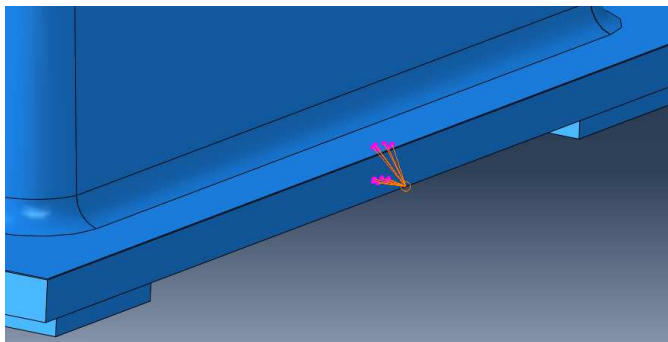
Durante a extração da forma, pode-se observar nas Figuras 2 e 3, que a ferramenta de arrancamento é posicionada em um canto da forma onde é aplicado uma carga quase concentrada neste ponto. A Figura 28 mostra as condições de contorno (a) e a aplicação do deslocamento na borda da forma (b).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Além do arrancamento de canto, também é possível, na hora da desforma, utilizar-se do artifício de posicionar a ferramenta de extração no meio das bordas da forma plástica, desse modo, foi também simulado o arrancamento pelo meio da forma como ilustra a Figura 29.

Figura 29 – Acoplamento da carga para arrancamento pelo meio



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.2.3 Implementação de ensaio de tração

Buscando validar o modelo numérico pelos ensaios de laboratório, implementou-se no em um programa de elementos finitos um modelo que simulasse o ensaio de tração dos corpos de prova plásticos. Para isso, criou-se o corpo de prova de tração conforme as dimensões mostradas na Figura 21.

A simulação numérica seguiu os mesmos moldes normativos apresentados na ASTM D638. O modelo numérico foi implementado considerando os resultados dos ensaios experimentais e sua calibração será explicitada adiante.

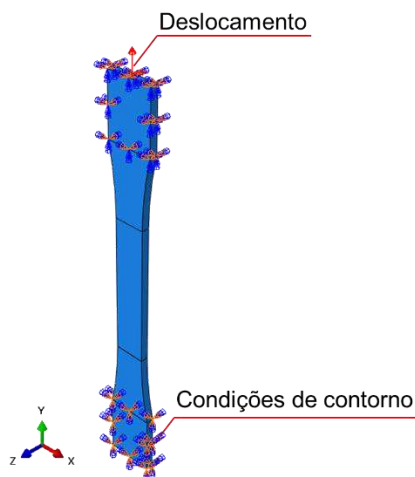
A deformação plástica foi introduzida pela extração dos dados da região plástica das curvas de tensão-deformação obtidas dos resultados experimentais dos corpos de prova de tração.

Após a modelagem criou-se as condições de contorno travando os deslocamentos nos eixos x e z , permitindo somente o deslocamento no eixo de tração (y).

Essas condições de contorno travaram, assim como acontece no ensaio real de tração, simulando as garras que estão dispostas de uma distância de 115 mm, isto é, o deslocamento movimenta somente essa região assim como nos ensaios de laboratório.

O deslocamento leva o corpo de prova até a ruptura completa de modo a contemplar toda a região elasto-plástica e de dano. A Figura 30 mostra o corpo de prova de tração, suas condições de contorno e deslocamento prescrito.

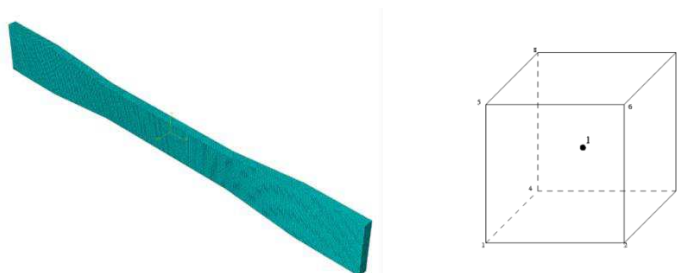
Figura 30 – Modelo do corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A modelagem utilizou uma malha de elementos finitos com 75240 elementos do tipo C3D8R, que é um elemento do tipo *brick* com 8 nós e integração reduzida como mostra a Figura 31.

Figura 31 – Malha discretizada do modelo de tração e elemento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.2.4 Análise de dano

Os polímeros podem ter comportamentos diferentes sob tensões dependendo de suas características físico-químicas. Assim, alguns polímeros podem

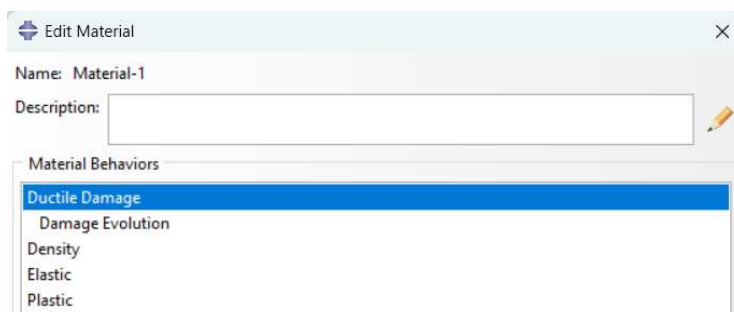
ser mais frágeis apresentando curto patamar de escoamento e outros podem ser mais dúcteis.

Ademais, viu-se que o efeito do envelhecimento aumenta o módulo de elasticidade e diminui as tensões de ruptura do polímero. Entende-se que, dependendo do envelhecimento do polímero, modelos de dano diferentes podem ser aplicados efetivamente.

Conforme comentado anteriormente, a abordagem feita por Pulungan *et al.* (2017) permite a utilização do modelo de dano dúctil nativa do programa para a análise de dano dos polímeros.

Para isso, deve-se aplicar as propriedades do material dentro do programa para que a análise seja coerente com o modelo de dano aplicado. Deve-se definir o estado elástico, incluindo o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, além do estado plástico. Acrescentam-se ao modelo os parâmetros de dano que envolve a deformação de fratura, a tensão triaxial, a taxa de deformação e a evolução do dano no modelo. A Figura 32 mostra os parâmetros do material para a análise de dano.

Figura 32 – Parâmetros utilizados na análise do dano dúctil



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Todavia, esse modelo de dano dúctil deve ser validado corretamente quando os materiais passam pelo processo de envelhecimento. A diminuição da tenacidade faz com que a matriz polimérica se comporte como um material mais frágil, o que pode trazer resultados não adequados para polímeros envelhecidos.

Inicialmente, será aplicado um modelo de calibração por meio de ensaios reais de tração de corpos de prova não-envelhecidos realizados em laboratório, de modo a ajustar o modelo 3D de elementos finitos a ter o mesmo comportamento. Dada a validação inicial, estende-se a análise para corpos de prova envelhecidos, verificando até que idade de envelhecimento o modelo de dano dúctil é adequado.

Daí, pode-se ampliar a análise de dano para o processo de pré-arrancamento da forma avaliando o comportamento de dano nas aplicações da ferramenta de extração no canto da forma.

3.2.5 Calibração do modelo numérico

A modelagem do ensaio de tração uniaxial via elementos finitos foi realizada para calibrar o modelo de acordo com os ensaios laboratoriais obtidos. São necessários alguns parâmetros para que o ensaio de tração uniaxial seja simulado. Dentre esses parâmetros o modelo de dano *Ductile Damage* (Figura 32) requer três dados principais os quais são:

- Deformação na fratura (*Fracture Strain*)
- Tensão de triaxialidade (*Stress Triaxiality*)
- Taxa de deformação (*Strain Rate*)

A correta definição desses parâmetros é crucial para uma simulação adequada. A deformação de fratura é equivalente à deformação quando há a iminência de início do dano. Devido à nomenclatura é comum pensar que essa deformação corresponde a deformação total do ensaio (ε^T), todavia, esse parâmetro corresponde a parcela da deformação onde ocorre o efetivo início do dano, isto é, a deformação plástica máxima (ε_0^p).

Desse modo, a parcela dessa deformação depende diretamente do material e do envelhecimento dele, sendo adaptada para cada tempo de envelhecimento e para cada um dos ensaios. Além disso, o manual define a triaxialidade como

$$\eta = -\frac{p}{q} \quad (37)$$

em que p é a pressão hidrostática e q é a tensão equivalente de von Mises. Para definir o valor da triaxialidade para o ensaio de tração, dado o eixo y , como o da única tensão existente, pode-se escrever o tensor de tensão como

$$\sigma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

p é justamente a média do traço das tensões principais, então:

$$p = \frac{-\sigma_{22}}{3} \quad (39)$$

e q é definido pela própria tensão no eixo y , ou seja

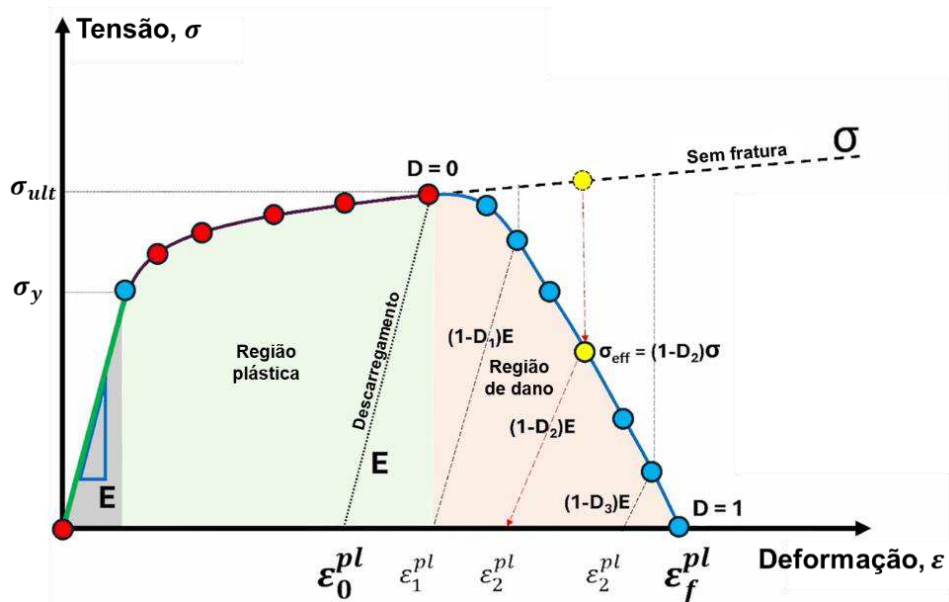
$$q = -\sigma_{22} \quad (40)$$

A triaxialidade para um ensaio de tração uniaxial resultando em

$$\eta = \frac{1}{3} \quad (41)$$

Para encontrar os parâmetros de deformação na fratura (*Fracture Strain*) é necessário extrair do gráfico tensão-deformação o ponto antes do início do dano cuja a reta com inclinação igual ao módulo de elasticidade atinge o eixo das abscissas, como mostra a Figura 33.

Figura 33 – Evolução de dano no gráfico tensão *versus* deformação



Fonte: Adaptado de Okereke (2024)

Nota-se que o dano D inicia-se justamente na máxima deformação plástica. Ao traçar uma linha de tendência no fim da região plástica, vê-se que a medida que o dano evolui, a inclinação original do módulo de elasticidade muda de acordo com a parcela de dano existente no momento da medição.

Isso corrobora para que o esperado seja uma diminuição do módulo de elasticidade ao longo do dano. O valor da deformação de fratura utilizada nas simulações numéricas é justamente o valor encontrado no dano inicial, isto é, ϵ_0^{pl} .

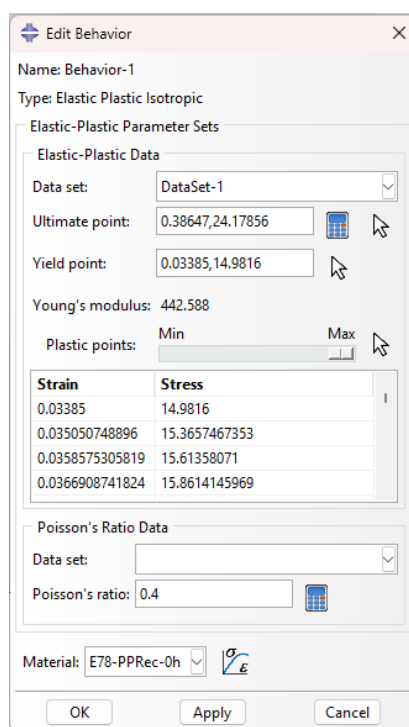
O dano é calculado através de um valor teórico de tensão, de como seria o comportamento do gráfico caso não existisse nenhum tipo de dano, e a curva plástica

continuasse a ser perfeita. A diferença entre o valor teórico e o valor real é o dano causado que varia de 0 até 1.

Para a elaboração dos modelos numéricos, calibraram-se as curvas de tensão-deformação para os três materiais não envelhecidos utilizando uma ferramenta de calibração nativa do programa.

Para isso, inserem-se os dados da curva importando os valores de tensão-deformação verdadeiros que foram transformados a partir dos resultados experimentais mostrados anteriormente. Com os valores postos pode-se usar a ferramenta para encontrar o ponto máximo, ponto de escoamento da curva, o módulo de elasticidade e extrair a curva de plasticidade. A Figura 34 mostra a interface da ferramenta para realizar a calibração dos dados.

Figura 34 – Interface da ferramenta de calibração



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Por fim, o modelo não depende de taxa de deformação (*Strain Rate*), já que é um ensaio de tração direta, ou seja, o valor atribuído nos parâmetros foi zero.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados de laboratório de tração, flexão e impacto IZOD, assim como as simulações numéricas para as calibrações dos modelos, além dos resultados das simulações numéricas para cargas usuais e para o arrancamento das formas plásticas.

4.1 Ensaio de laboratório

Os resultados dos ensaios dos corpos de prova realizados no laboratório do SENAI foram acompanhados de modo a entender a metodologia de ensaio utilizada e analisar se os procedimentos técnicos estavam de acordo com os termos normativos.

Os resultados de tração e flexão objetivaram analisar a variação da tensão de ruptura, módulo de elasticidade, tensão máxima e o comportamento dos gráficos tensão-deformação de cada um dos materiais estudados.

Cinco corpos de prova foram selecionados para representar cada tipo de material e suas respectivas idades de envelhecimento, assegurando uma amostragem representativa para a análise e seguindo os parâmetros normativos.

De modo a demonstrar o comportamento de cada material para cada tempo de envelhecimento traçou-se os gráficos de tensão-deformação dos corpos de prova que são mostrados e divididos adiante.

Os gráficos obtidos nos ensaios para cada corpo de prova apresentam as tensões e deformações de engenharia que devem ser transformadas para as tensões e deformações verdadeiras para que seja realizada a análise numérica.

Assim, a transformação das deformações de engenharia em deformações verdadeiras dos dados foi realizada por

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (42)$$

em que ε_t representa a deformação verdadeira dos corpos de prova e ε_e representa as deformações obtidas no ensaio (deformações de engenharia).

Ademais, é necessário, também, a transformação das tensões de engenharia em tensões verdadeiras através da relação

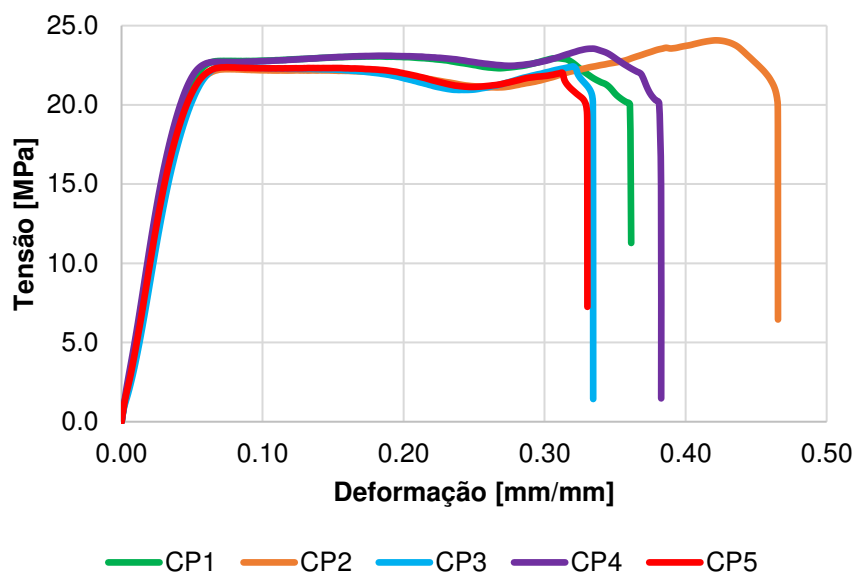
$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (43)$$

em que σ_t ilustra a tensão verdadeira e σ_e a tensão de engenharia obtida nos ensaios experimentais. Dadas as transformações supracitadas obtiveram-se os gráficos verdadeiros tensão-deformação para todos os materiais ilustrados a diante.

As Figuras 35 a 38 ilustram as curvas 0h a 360h para o polipropileno virgem. As Figuras 39 a 42 ilustram as curvas para o policarbonato e, por fim, as Figuras 43 a 46 mostram as curvas para a mistura reciclada do polipropileno.

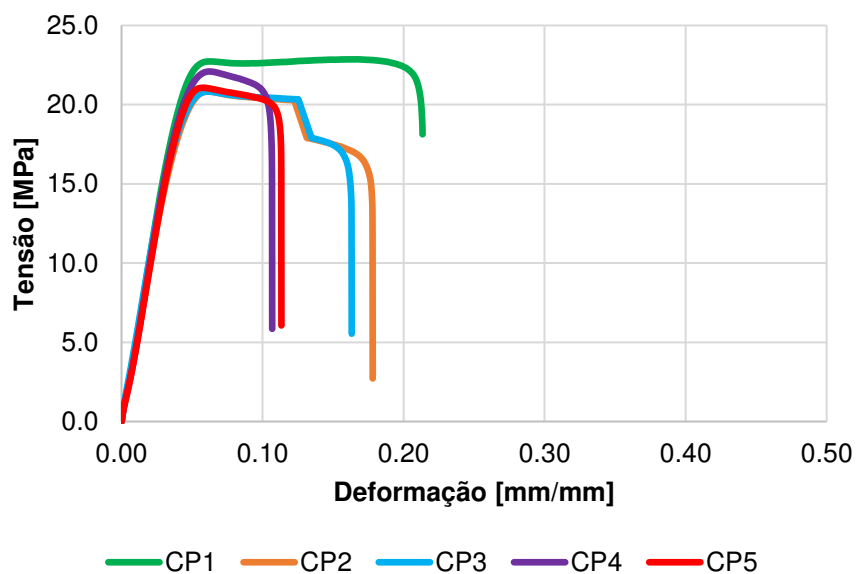
- **Polipropileno virgem**

Figura 35 – Gráfico Tensão-Deformação Polipropileno Virgem– 0h



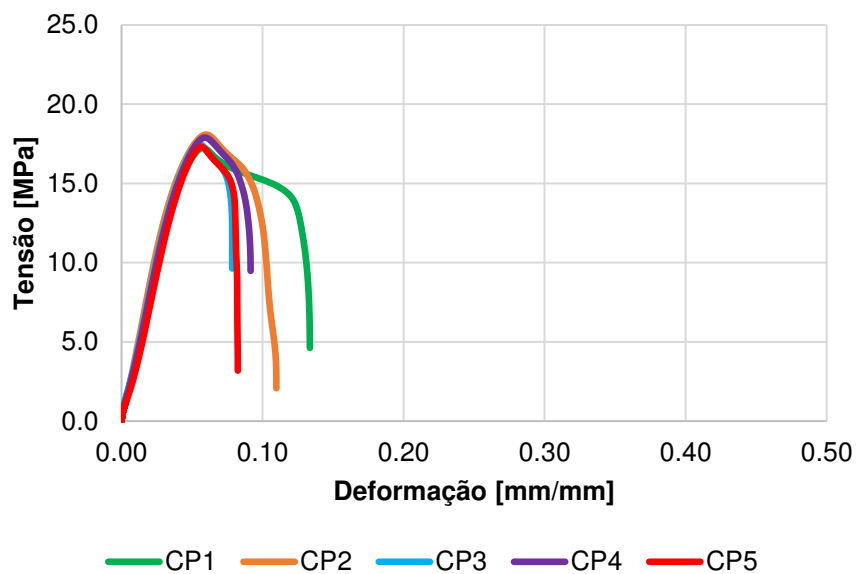
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 36 – Gráfico Tensão- Deformação Polipropileno Virgem – 120h



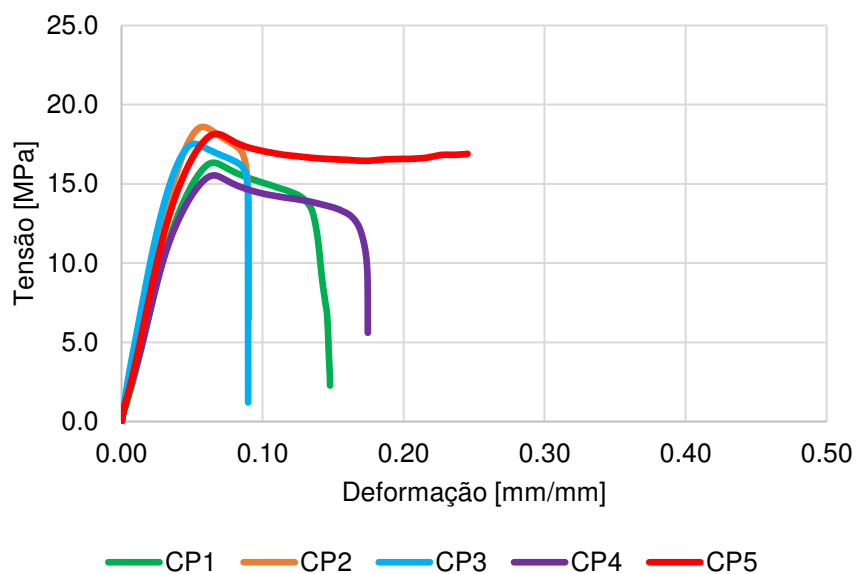
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 37 – Gráfico Tensão- Deformação Polipropileno Virgem – 240h



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

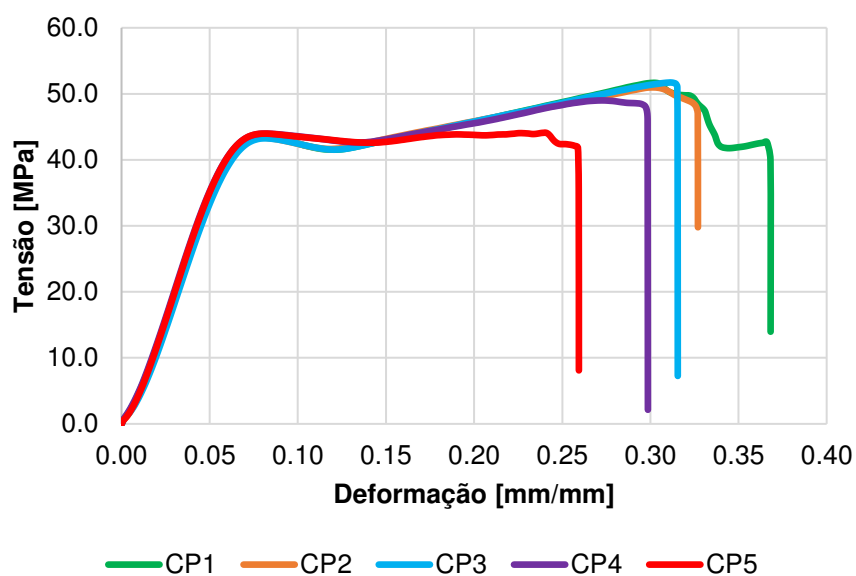
Figura 38 – Gráfico Tensão- Deformação Polipropileno Virgem – 360h



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

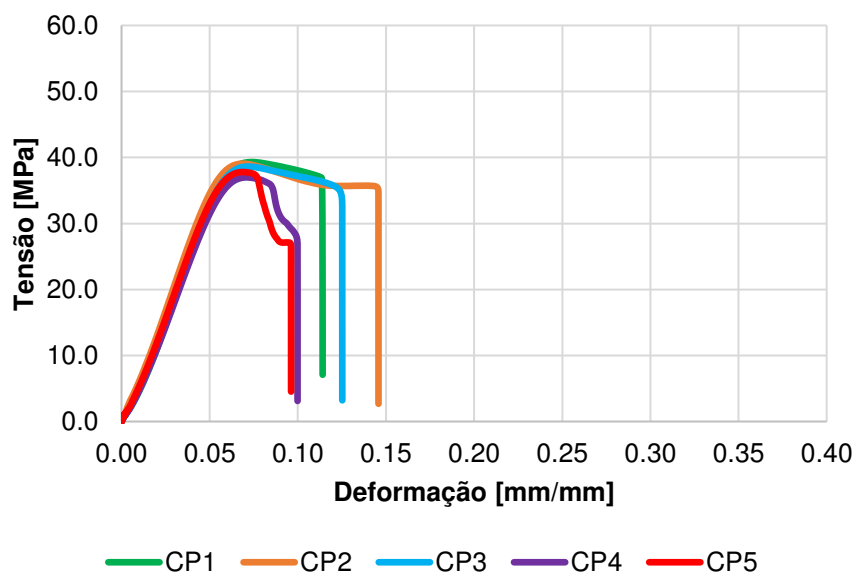
- **Policarbonato**

Figura 39 – Gráfico Tensão- Deformação Policarbonato – 0h



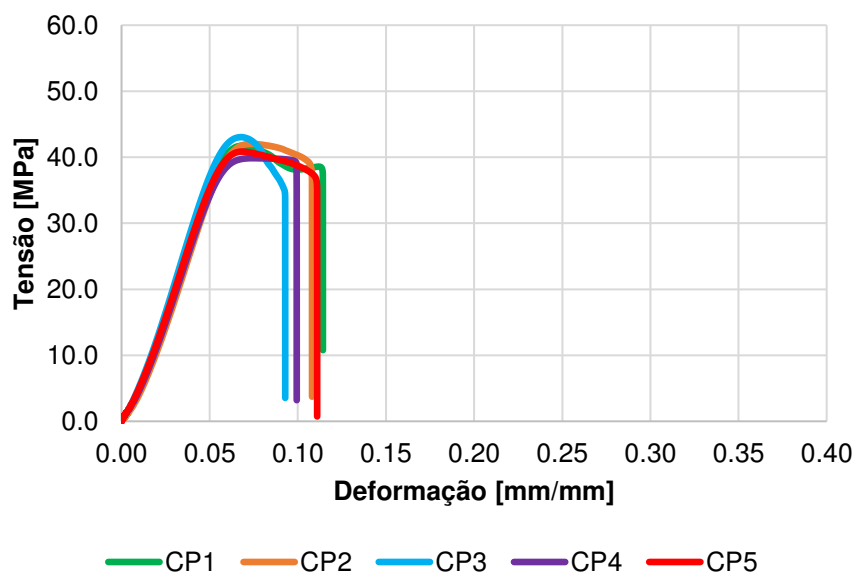
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 40 – Gráfico Tensão- Deformação Policarbonato – 120h



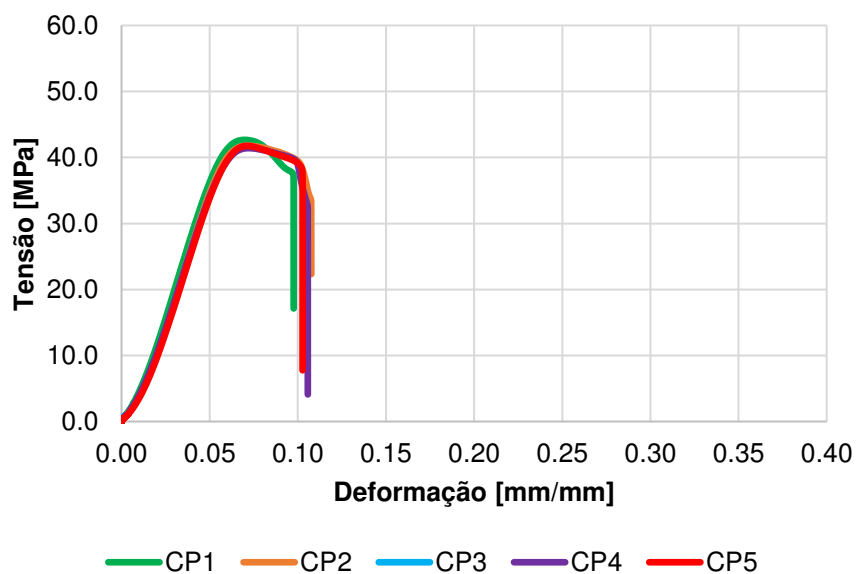
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 41 – Gráfico Tensão- Deformação Policarbonato – 240h



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

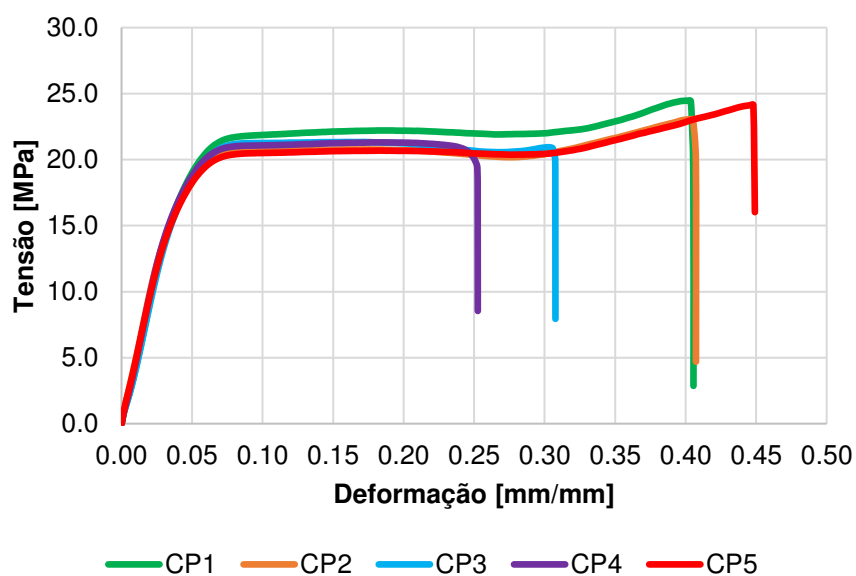
Figura 42 – Gráfico Tensão- Deformação Policarbonato – 360h



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

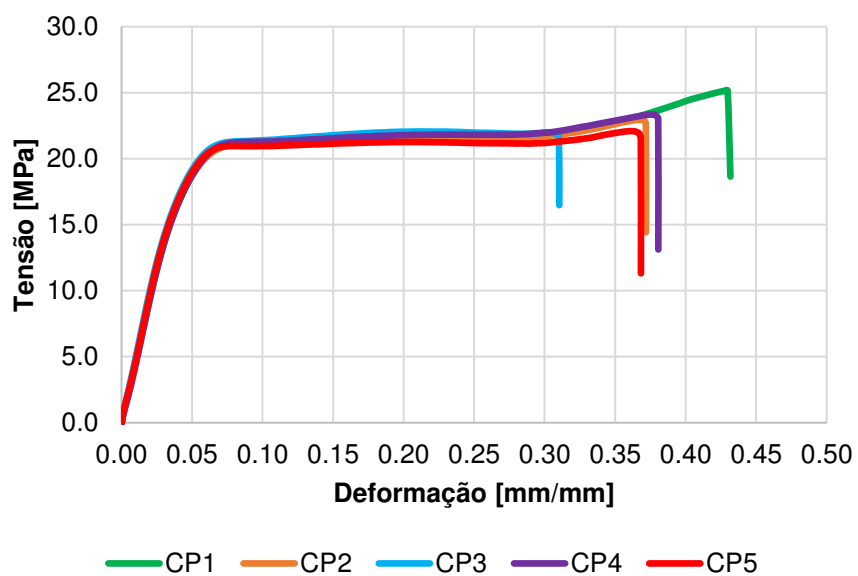
- **Polipropileno Reciclado**

Figura 43 – Gráfico Tensão- Deformação PP Reciclado – 0h



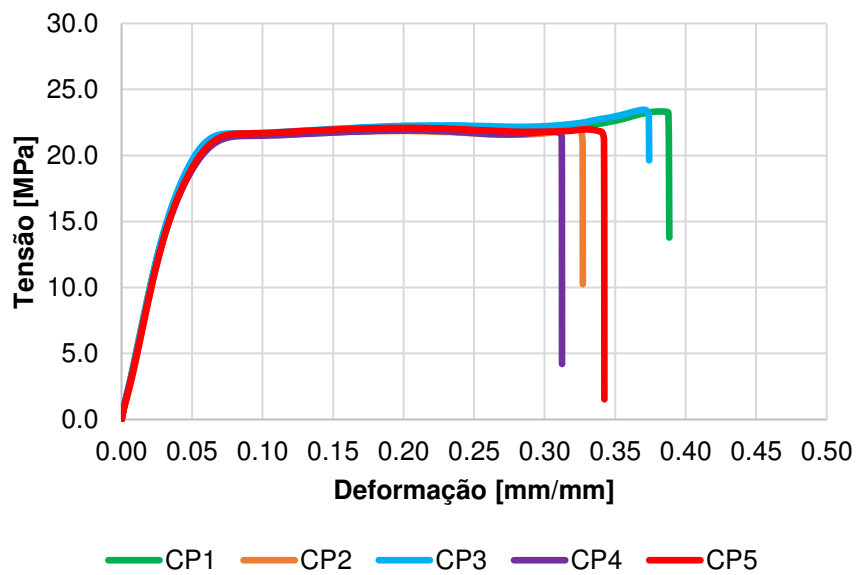
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 44 – Gráfico Tensão- Deformação PP Reciclado – 120h



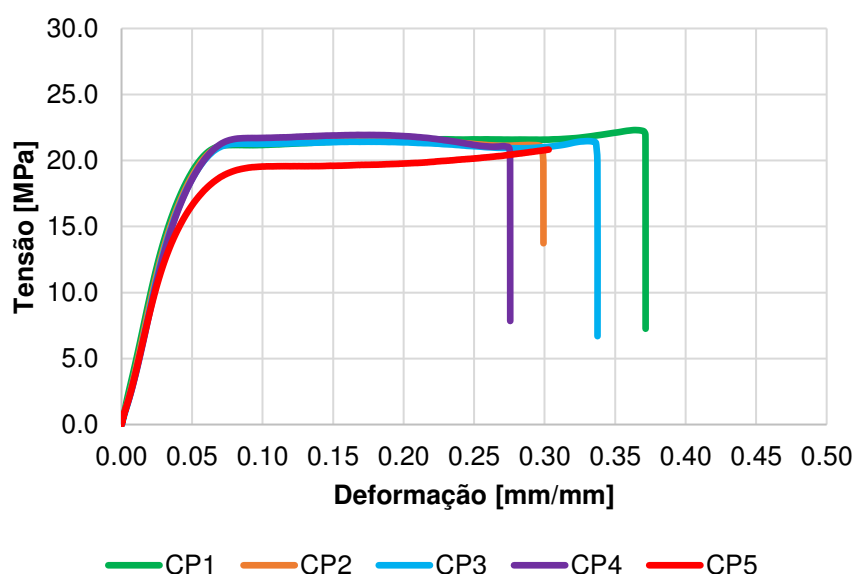
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 45 – Gráfico Tensão- Deformação PP Reciclado – 240h



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 46 – Gráfico Tensão- Deformação PP Reciclado – 360h



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Vê-se que há uma leve dispersão entre os resultados de 0 a 360 horas de exposição UV com a conseqüente redução das tensões de pico e, principalmente, da tenacidade para todas as idades em todos os materiais.

Além disso, nota-se que há uma pequena dispersão entre os valores próprios corpos de prova dentro de um mesmo período de envelhecimento, principalmente na região de encruamento. Apesar de todos os corpos de prova serem similares, a calibração da máquina universal de ensaios é manual e pode apresentar pequenas diferenças.

Pode-se ainda extrair que o efeito do envelhecimento tornou a dispersão dos resultados dentro de um período envelhecido mais notória, modificando suas tensões de pico, tenacidade e ponto de ruptura.

4.1.1 Resultados de tração

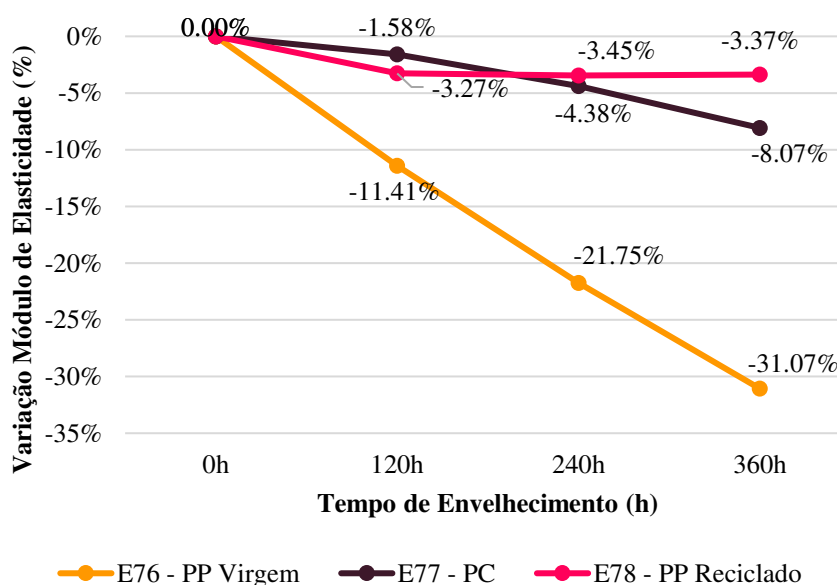
Os corpos de prova de tração foram ensaiados de acordo com os padrões estabelecidos pela norma ASTM D638, garantindo assim a conformidade e precisão dos resultados obtidos.

Frise-se que os resultados experimentais abordados a seguir de tração, flexão e de impacto são mostrados em percentual para que seja respeitado a privacidade dos valores originais patenteados pela Impacto®.

Desse modo, todos os resultados foram normalizados onde os valores de 0h sempre são a referência, isto é, todos os materiais partem de 0% e sofrem variações positivas ou negativas em percentual representando aumentos ou diminuições, respectivamente.

Com os resultados de tração foi possível obter o comportamento do módulo de elasticidade, da força máxima suportada, da tensão de ruptura, da tensão de tração na força máxima e os gráficos médios de tensão-deformação para cada uma das idades de envelhecimento para cada um dos materiais. A Figura 47 – mostra a variação do módulo de elasticidade (E_0) com o tempo de envelhecimento acelerado.

Figura 47 – Módulo de Elasticidade de ensaio de tração *versus* envelhecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Nota-se que o módulo de elasticidade pouco variou para o policarbonato (PC) e para o propileno reciclado (PP reciclado) apresentando pequenas diminuições em relação ao valor inicial para o PC e para o PP reciclado ao longo do período de envelhecimento.

Em relação ao PC essa redução teve mínima de 1,58% para 120h e máxima de 8,07% para 360h e, para o PP reciclado valor ficou entre -3,27% para 120h e -3,45% para 240h. As variações do polipropileno reciclado para os períodos

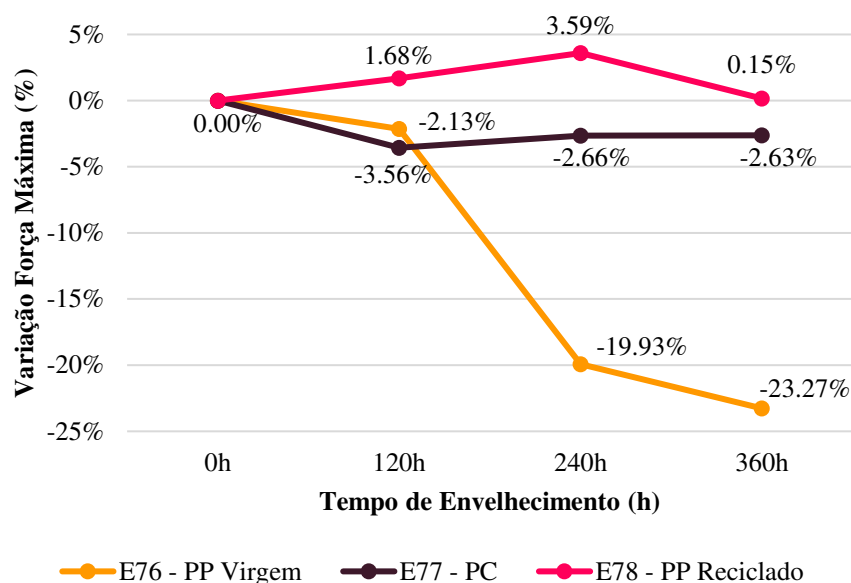
envelhecidos foram pouco significativas e podem ter ocorrido mesmo com os corpos de prova sem envelhecimento, uma vez que há variação entre os valores, assim o módulo se manteve, praticamente, constante no ensaio com o envelhecimento acelerado.

Além disso, essa significativa constância no módulo do PP reciclado, pode-se dar pelo pré-envelhecimento que o material já sofre antes de se tornar um material reciclado. Assim, o material já está envelhecido naturalmente pelo uso e sofre uma refusão para ser novamente utilizado.

Já no caso do PC, as variações foram maiores de que o PP reciclado, sugere-se que seu alto módulo de elasticidade inicial e densidade podem ter influenciado para a relativa maior variação percentual em relação ao PP reciclado. O PC teve reduções praticamente lineares no módulo de elasticidade apresentando variação de -1,58% para 120h, -4,38% para 240h e -8,07% para 360h em relação ao seu valor de 0h.

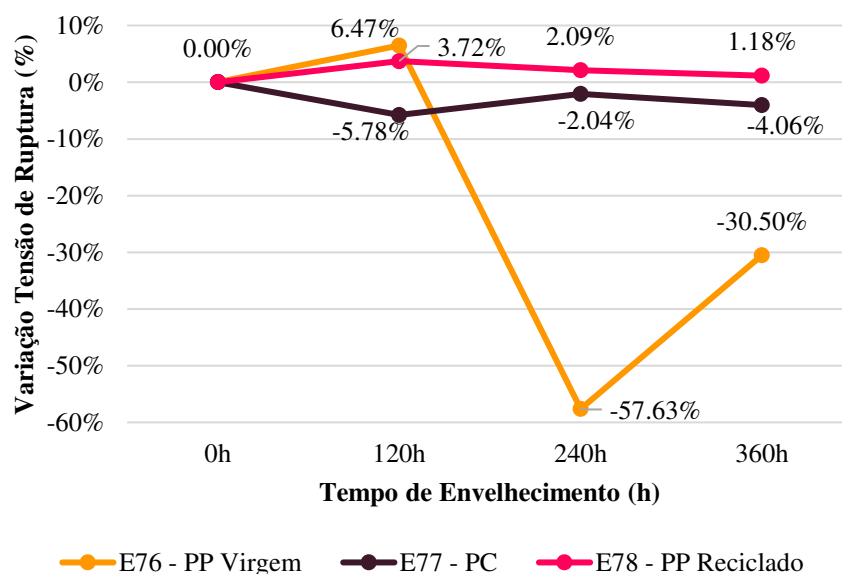
Por último, o polipropileno virgem (PP virgem) teve uma significativa redução do módulo de elasticidade para o período. Apesar de o PC também ser virgem como o PP, apenas esse último apresentou uma significativa redução em seu módulo de elasticidade apresentando uma variação de -11,41% para 120h, -21,75% para 240h e -31,07% para 360h. Isso pode ter ocorrido porque o compósito não havia sofrido nenhum tipo de envelhecimento prévio e tem muito mais sensibilidade ao efeito UV e de umidade e vapor do que o PC. Além disso, a não utilização de proteção UV pode ter contribuído para essa variação significativa do PP virgem.

Percebeu-se também que essa sensibilidade do PP virgem torna a mistura do PP com reciclado mais vantajosa no longo prazo uma vez que sofrerá menos com os efeitos de do tempo, além de, geralmente, apresentar valor comercial ligeiramente inferior. Por conseguinte, a Figura 48 representa a relação da variação da força máxima de tração para cada idade de envelhecimento.

Figura 48 – Força Máxima de tração *versus* envelhecimento

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Viu-se que o PC teve uma redução de pico de 3,56% para o tempo de 360h e o PP virgem uma variação significativa de -23,27% acompanhando a redução do módulo de elasticidade. Por último, o PP reciclado apresentou um aumento da força máxima resistida, apesar de a variação ser quase insignificante, com aumento de 3,59%. A Figura 49 – a seguir mostra a evolução da tensão de ruptura de tração dos materiais.

Figura 49 – Tensão na ruptura de tração *versus* envelhecimento

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

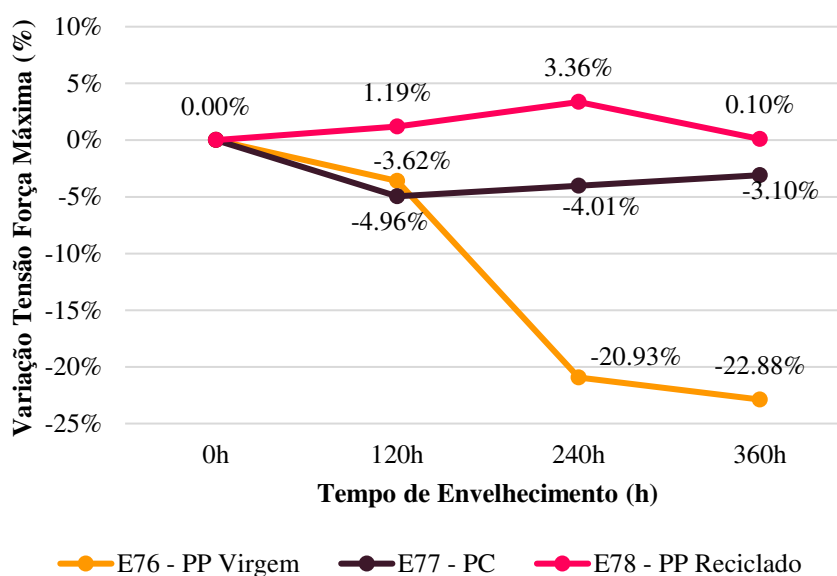
A tensão de ruptura do PC teve uma redução nas primeiras horas de envelhecimento e em seguida um aumento pouco significativo. Esse ligeiro aumento no último tempo de envelhecimento apresenta comportamento similar à variação do módulo de elasticidade com redução global em torno de 4,06% para 360 horas.

O PP reciclado não apresentou variação significativa ao passo de representar um aumento final. Numericamente, o ensaio com esse material apresentou um aumento de 1,18%.

Por fim o PP virgem teve, como o esperado, uma grande redução de sua tensão de ruptura devido à redução do módulo de elasticidade e de seu patamar de escoamento como abordado anteriormente. Essa redução teve grandeza de 57,63% para 240h e de 30,50% para 360h em relação ao valor inicial.

A redução global de tensão de ruptura mostra que a elasticidade do material diminuiu, reduzindo seu patamar de escoamento. Ademais, a Figura 50 – mostra a tensão existente na força máxima comparado com o envelhecimento.

Figura 50 – Tensão na força máxima de tração *versus* envelhecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Por fim, analisou-se também a tensão máxima para cada período do envelhecimento. O PP virgem apresentou redução similar à da força máxima com variações de -20,93% para 240h e -22,88% para 360h. O PC também apresentou reduções na tensão máxima resistida com variações pouco significativas

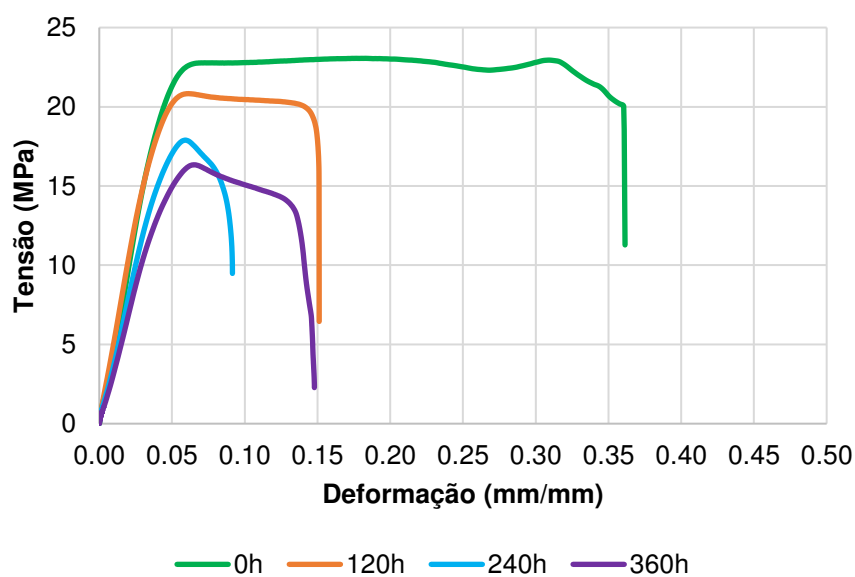
apresentando redução de 3,10% para 360h. Já o PP reciclado, por outro lado, teve aumento insignificante para todas as idades de envelhecimento.

4.1.1.1 Comportamento dos gráficos de tensão-deformação com o envelhecimento

Sabe-se que todos os corpos de prova possuem seus próprios gráficos de tensão-deformação, apesar de semelhantes, porém a apresentação de todos eles com a evolução do envelhecimento torna-se inviável a apresentação comparativa de cada CP para cada tipo de material. Desse modo, extraiu-se os gráficos médios para cada tempo de envelhecimento e para cada material para investigar os efeitos do envelhecimento em cada um deles.

É importante lembrar que cada tempo produz cinco gráficos – um para cada CP. Assim, avaliou-se a média dos resultados através dos valores da deformação e tensão, excluindo-se alguns *outliers*, isto é, CPs que apresentaram resultados muito diferente dos outros do mesmo tempo e pode-se conseguir um gráfico tensão-deformação para cada tempo de envelhecimento e para cada material. A Figura 51 – mostra o o gráfico tensão-deformação para o PP virgem.

Figura 51 – Tensão *versus* deformação na tração para o PP virgem no envelhecimento



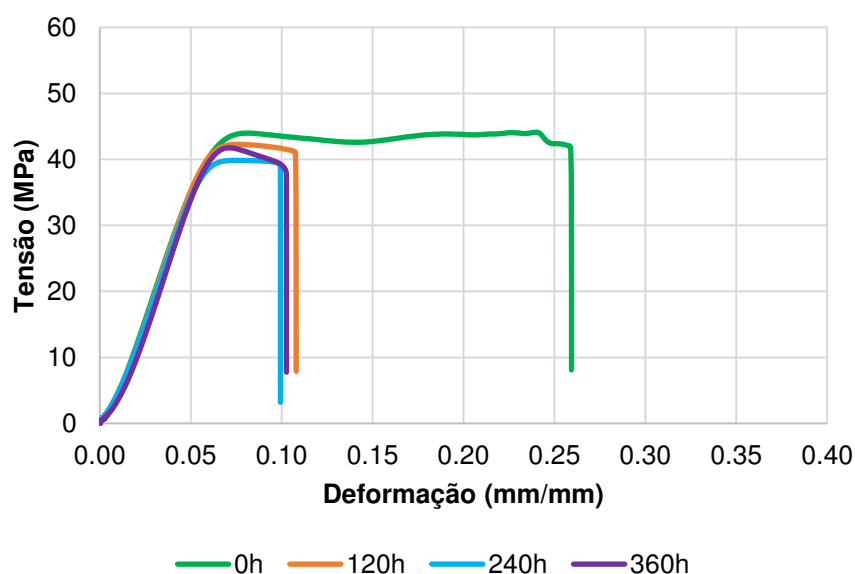
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Percebe-se que o envelhecimento influenciou em grandes mudanças de comportamento do gráfico tensão-deformação no período de envelhecimento do PP virgem. Nota-se que as tensões máximas reduziram gradativamente com o tempo de envelhecimento, atingindo seu menor valor com 360h conforme abordado anteriormente.

Além disso, as tensões de ruptura reduziram bastante até 360h o que era esperado uma vez que o material se tornou mais rígido reduzindo assim o *hardening*. As inclinações dos gráficos mudaram paulatinamente apresentando uma queda do módulo de elasticidade (E_0). Por fim, a tensão de ruptura mostrou uma redução em todas as idades.

Já para o Policarbonato (PC) a Figura 52 – ilustra o comparativo dos comportamentos da tensão-deformação.

Figura 52 – Tensão *versus* deformação na tração para o PC no envelhecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

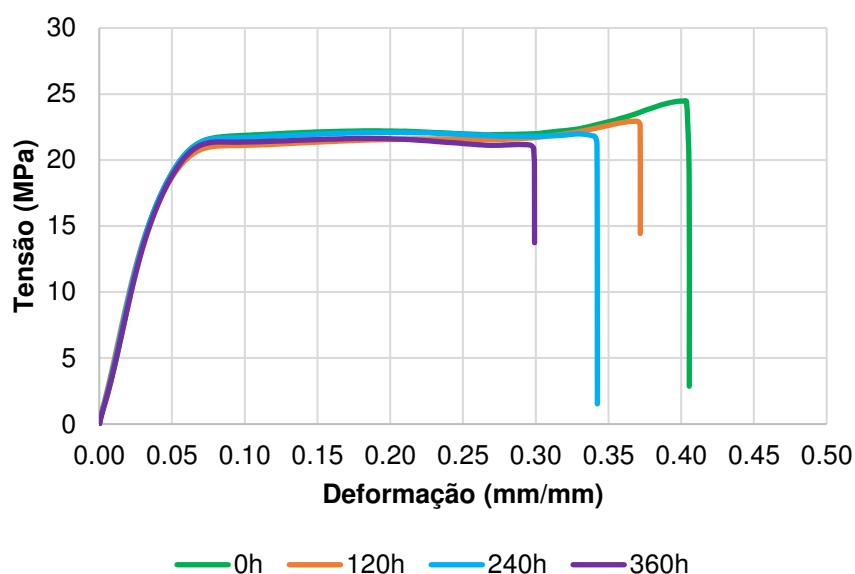
Os gráficos tensão-deformação para o PC apresentaram comportamento muito similar para todas as idades de envelhecimento excetuando-se para o caso sem envelhecimento (0h).

O que mais foi notado foi a redução das áreas sob os gráficos entre 0h e os outros tempos de envelhecimento. O gráfico apresentou uma redução da tensão máxima. A redução das tensões ruptura partiu de 37% para 0h para 8% na ruptura em

360h representando uma redução de mais de 3,5 vezes para o estado não envelhecido.

Esse comportamento era esperado, uma vez que o PC já é um compósito bem rígido e o aumento da rigidez reduz o escoamento, atingindo mais brevemente a tensão de ruptura. Por fim, a Figura 53 – mostra o comportamento do gráfico tensão-deformação para a mistura com polipropileno reciclado.

Figura 53 – Tensão *versus* deformação para o PP reciclado no envelhecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

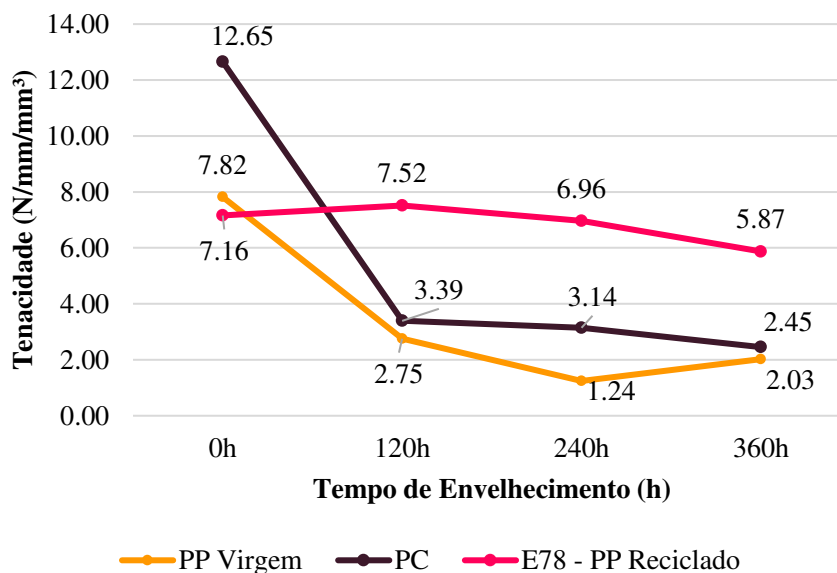
Para o compósito contendo PP reciclado, percebeu-se que ao longo do envelhecimento o comportamento das tensões de ruptura, praticamente, reduziu gradualmente, assim como as tensões máximas. O comportamento dos gráficos ao longo do envelhecimento mostra uma diminuição aparente da tenacidade do material.

4.1.2 Tenacidade

Sabe-se que a tenacidade de um material é a capacidade deste absorver energia e se deformar antes de efetivamente fraturar. Das curvas tensão-deformação apresentadas das Figuras 35 a 46, pode-se estimar através do método numérico dos trapézios a tenacidade de cada corpo de prova e calcular a média dos resultados. Desse modo, avaliou-se a tenacidade dos materiais quanto aos efeitos do

envelhecimento com os resultados médios dos corpos de prova mostrados na Figura 54 – .

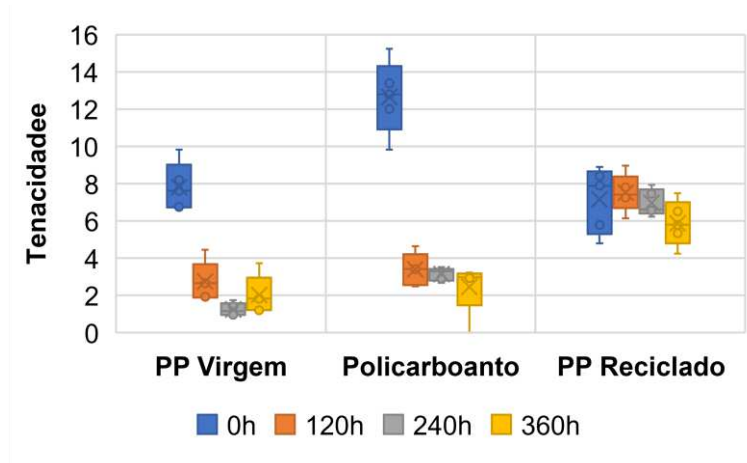
Figura 54 – Tenacidade *versus* envelhecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Além dos resultados médios é interessante mostrar a variação entre os corpos de prova estudados através de um gráfico *box plot* (Figura 55) de modo a verificar se os corpos de prova possuíam resultados similares entre si para o mesmo tempo de envelhecimento.

Figura 55 – *Box plot* dos resultados da tenacidade *versus* envelhecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados mostram que não houve valores muito acima ou abaixo das variações entre os corpos de prova – chamado de *outliers* – e, por isso, os resultados possuem validade estatística.

Os resultados mostram que os efeitos do envelhecimento são muito danosos para todos os materiais quanto à tenacidade. O polipropileno virgem apresentou reduções de 64,81% para 120h, 84,11% para 240h e 74,06% para 360h. O policarbonato também apresentou drásticas reduções de 73,20% para 120h, 75,16% para 240h e 80,61% para 360h.

Ademais o compósito com polipropileno reciclado teve comportamento diferente dos outros materiais apresentando um singelo aumento de 5,02% para as primeiras 120h de envelhecimento seguido de reduções de 2,72% para 240h e de 17,95% para 360h.

Cita-se que para um estado não envelhecido o policarbonato tem mais capacidade de absorver energia do que os outros dois materiais, assim como os valores médios de tenacidade do polipropileno virgem e reciclado possuem praticamente as mesmas tenacidades para 0h. Todavia, o polipropileno reciclado sofreu menos do que os outros dois materiais quanto à perda de sua tenacidade, podendo ser um material, nesse quesito, mais interessante para o uso nas formas plásticas.

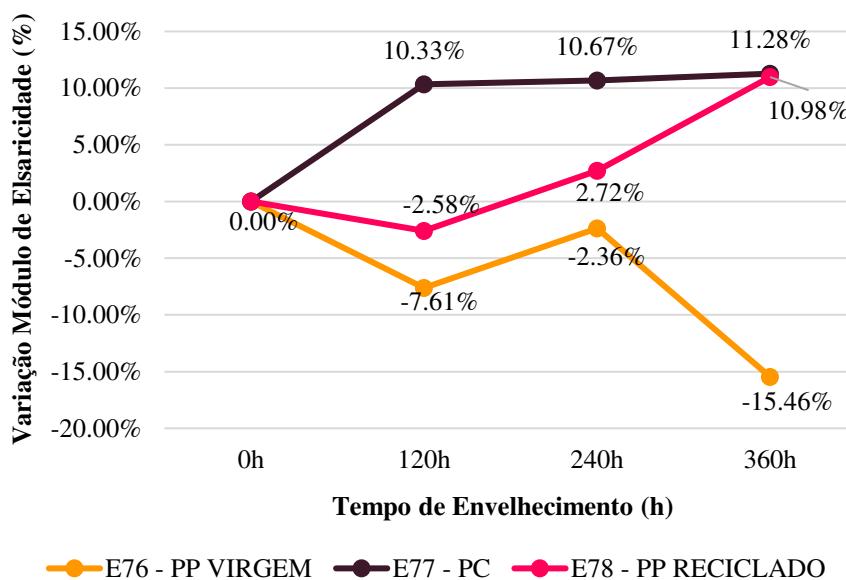
4.1.3 Resultados de flexão

Assim como os resultados de tração, todos os resultados foram normalizados onde os valores de 0h sempre são a referência, isto é, todos os materiais partem de 0% e sofrem variações positivas ou negativas em percentual representando aumentos ou diminuições, respectivamente.

Com os resultados de flexão foi possível obter o comportamento do módulo de elasticidade na flexão, da força de flexão máxima suportada e da tensão máxima de flexão.

Frisa-se que como os corpos de prova de flexão não vão até a ruptura os gráficos de tensão deformação para cada uma das idades de envelhecimento e para cada um dos materiais são parciais. A Figura 56 – mostra a variação do módulo de elasticidade (E) com o tempo de envelhecimento acelerado.

Figura 56 – Módulo de Elasticidade na flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

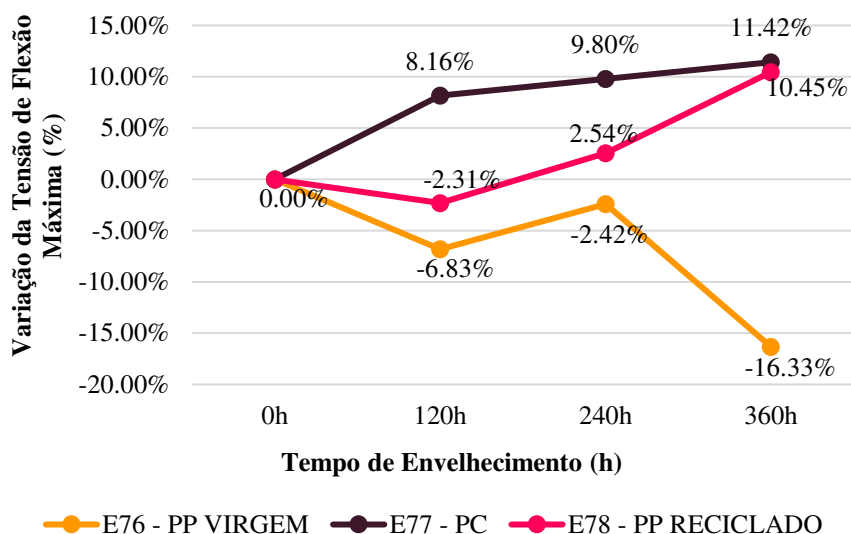
Quanto ao Policarbonato (PC) viu-se que o módulo de elasticidade teve variações para as primeiras idades com aumento de 10,33% para 120h e pouco variou para as outras idades apresentando aumento de 10,67% para 240h e 11,28% para 360h. Assim, notou-se que o PC sofreu o aumento de sua rigidez logo nas primeiras horas de exposição à irradiação.

Já o PP Virgem apresentou decréscimo de módulo de elasticidade logo nas primeiras 120h de irradiação com percentual de -7,61%. O PP virgem continuou apresentando quedas em seu módulo até chegar numa variação de -15,46% às 360h de exposição.

Por último, o PP Reciclado teve uma leve queda de -2,58% para 120h e um aumento de 2,72% para 240h. Essa variação para esses dois estados iniciais, podem ser consideradas praticamente similares. Todavia, para 360h, o aumento foi significativo apresentando acréscimo de 10,98%.

Além da variação do módulo de elasticidade aferiu-se, também, as tensões máximas na flexão mostradas na Figura 57 – .

Figura 57 – Tensão máxima de flexão

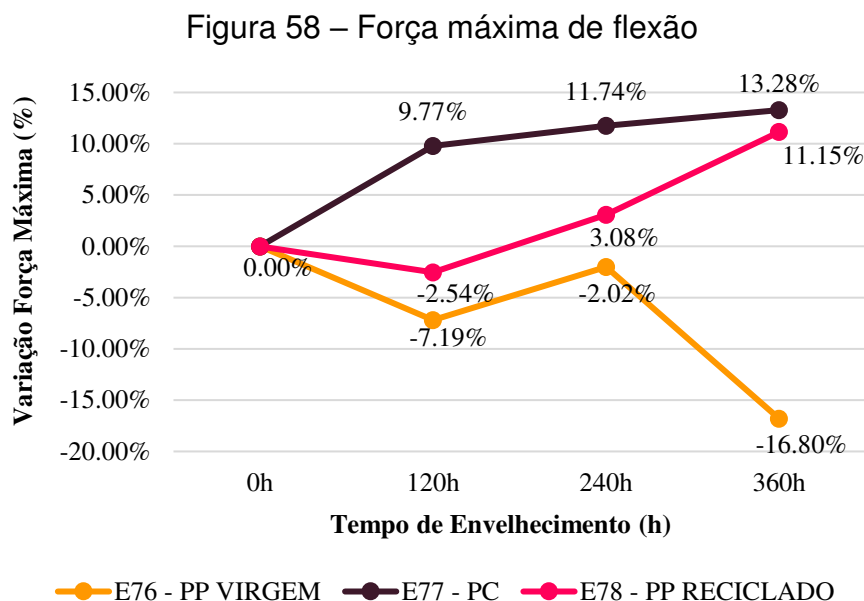


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As tensões máximas resistidas na flexão tiveram comportamento similar ao dos módulos de elasticidade de flexão. Notou-se que o PC apresentou aumento de 11,42% em sua máxima tensão de flexão resistida, assim como o PP reciclado com 10,45% de aumento, ambos para 360h de exposição UV em relação ao tempo de 0h. Por outro lado, o PP Virgem teve redução de 16,33% para elas 360h de irradiação o que teve comportamento similar com as outras propriedades do polipropileno virgem.

Essas variações são justificadas pela mesma variação do módulo de elasticidade abordado anteriormente, em que, corpos de prova mais rígidos tendem a atingir maiores tensões de flexão, assim como o oposto é verdadeiro.

Por fim avaliou-se a força máxima resistida na flexão para os compósitos e os resultados estão apresentados na Figura 58 –

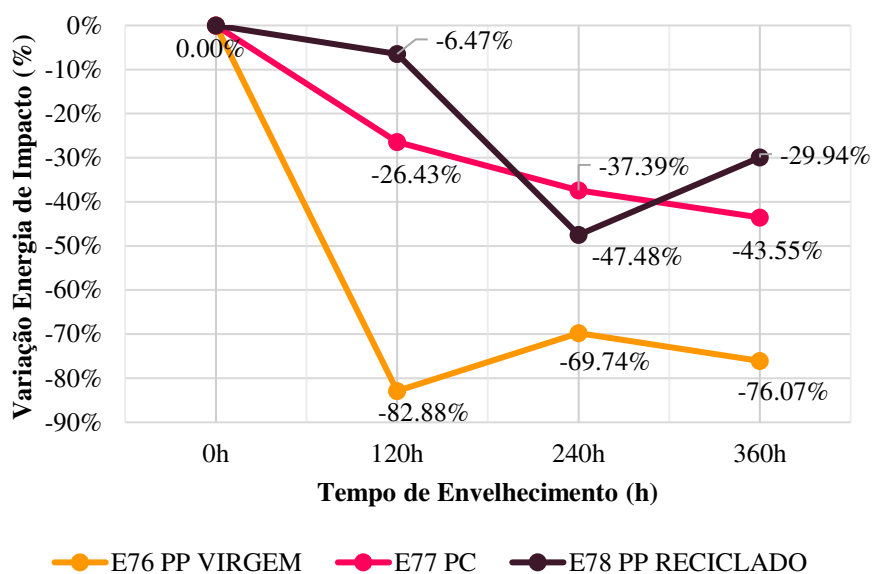


Novamente, as cargas máximas de flexão acompanharam o comportamento dos gráficos de módulo de elasticidade e tensão máxima. O Policarbonato suportou um crescente aumento da carga máxima com 13,28% em 360h. Já o PP reciclado apresentou pequenas variações para as primeiras idades e um acréscimo 11,15% para 360h. Por último, o polipropileno virgem teve grande redução na carga máxima suportada, principalmente para as 360h com variação de -16,80%.

4.1.4 Resultado de Impacto IZOD

Os resultados dos ensaios de impacto IZOD obtidos representaram uma diminuição significativa na energia de impacto em todas as idades de envelhecimento para todos os materiais como mostra o gráfico. Nota-se que esse parâmetro é muito sensível ao envelhecimento, o que pode corroborar para o aumento da perda de formas plásticas de modo precoce, principalmente quando se considera o impacto que a forma pode sofrer devido a quedas durante à extração. A Figura 59 ilustra os resultados das variações da resistência ao impacto IZOD para os materiais estudados.

Figura 59 – Resistência ao Impacto IZOD com efeito do envelhecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A partir dos resultados absolutos, notou-se que o polipropileno virgem apresentou uma resistência ao impacto superior a todos os outros materiais quando não envelhecido, porém a partir do primeiro tempo de envelhecimento essa resistência reduziu drasticamente representando uma redução de 82,88% para o período de 120h, 69,74% para 240h e 76,07% para 360h de exposição ao envelhecimento acelerado.

O policarbonato apresentou variação ligeiramente constante na redução da resistência com redução de 26,43% para 120h, 37,39% para 240h e 43,55% para 360h. Apesar da variação, o PC apresentou bons resultados quanto à resistência ao impacto ao longo do envelhecimento.

Por fim, o polipropileno reciclado apresentou diminuição gradual de sua resistência ao impacto e apresentou um resultado melhor do que os demais para o tempo de envelhecimento. Apesar de sua resistência inicial ser inferior à do PP virgem, sua resistência ao envelhecimento foi maior principalmente pelo material já ter sofrido esse processo enquanto ainda era virgem. Assim com o processo de fusão e reinjeção a altas temperaturas, sua resistência ao envelhecimento foi preservada, gerando uma variação menor quando comparada com os outros materiais.

Percebeu-se uma variação entre os corpos de prova quanto à resistência ao impacto. Esperava-se que a resistência ao impacto diminuísse gradualmente ao passar do tempo de envelhecimento.

Nesse caso, o policarbonato (PC) apresentou um comportamento de redução de resistência coerente com que foi esperado, enquanto o polipropileno virgem e o reciclado tiveram picos de resistência maior em estados mais envelhecidos de que menos envelhecidos.

Além disso, o PC também apresentou bons resultados quanto a resistência ao envelhecimento, com reduções discretas e contínuas. Por fim, o PP virgem é o que mais sofreu com a redução de resistência ao impacto, não estando completamente apto, nessa composição, na resistência ao longo do tempo.

Todos os corpos de prova sofreram uma grande redução da resistência inicial o que corrobora que a exposição aos raios UV, umidade, calor e vento são preponderantes para a diminuição significativa da durabilidade das formas plásticas.

4.2 Simulações numéricas

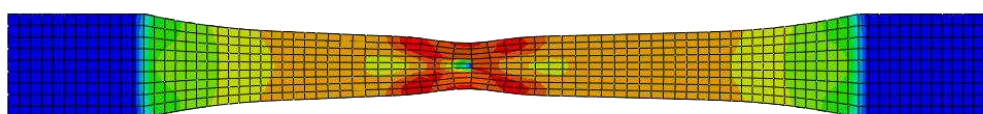
4.2.1 Ensaio de tração dos corpos de prova

O ensaio de tração direta é essencial para identificar as propriedades mecânicas de um material. Nele é possível extrair, principalmente, a curva de tensão *versus* deformação que mostra o comportamento do material ante a tração até a ruptura, com os estágios elásticos, plásticos, encruamento, dano, entre outros.

Como discutido anteriormente, a simulação numérica de tração direta foi feita aplicando-se deslocamentos que leva o corpo de prova até a ruptura completa. Para isso é necessário definir as variáveis elásticas, plásticas e de dano e sua evolução ao longo da simulação.

A simulação numérica buscou chegar o mais próximo possível dos ensaios obtidos em laboratório conforme mostrado na metodologia deste trabalho. A Figura 60 ilustra a simulação numérica de um corpo de prova até o início da falha.

Figura 60 – Corpo de prova simulado numericamente



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

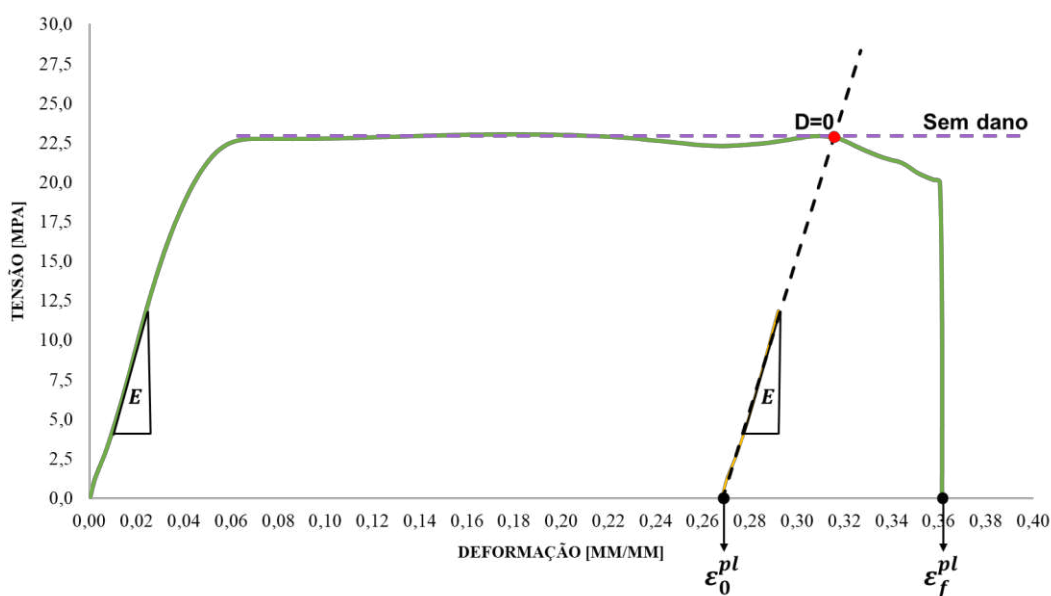
A calibração do modelo é essencial para que as análises da forma completa sejam feitas de modo adequado. O modelo de dano de Lemaitre, como mostrado na metodologia deste trabalho, necessita de alguns parâmetros para que seja corretamente incorporado ao modelo numérico.

Para encontrar as variáveis de calibração deve-se estudar por completo cada um dos gráficos tensão-deformação verdadeiros e calibrá-los de modo a que haja a representação verdadeira do modelo real.

Desse modo, realizou-se a calibração dos três materiais numa simulação numérica do ensaio de tração uniaxial. Para encontrar os valores exigidos deve-se fazer a análise da curva tensão-deformação de cada material.

Para exemplificar, utilizar-se-á a curva tensão-deformação do polipropileno virgem para 0 h de envelhecimento. Com a curva, é traçada uma linha de tendência com a inclinação idêntica ao módulo de elasticidade com interseção justamente onde o dano é iniciado, isto é, para o caso desse compósito e pelo comportamento de sua curva em que se tem uma plasticidade quase perfeita do material, o dano se inicia no decréscimo da curva como ilustra a Figura 61.

Figura 61 – Representação do dano na curva tensão-deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

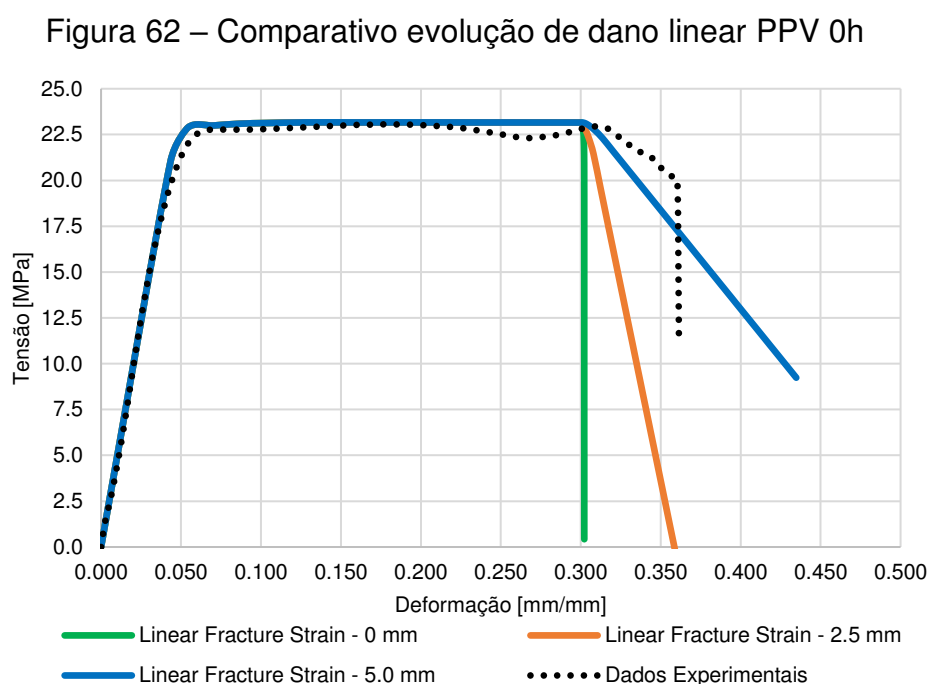
O programa de elementos finitos tem alguns fatores para caracterizar o comportamento do dano mostrados na metodologia deste trabalho. Sabe-se que o modelo de dano é dividido em duas partes. A primeira está relacionada com a iniciação

do dano e seu comportamento, o que requer as grandezas dadas na metodologia deste trabalho.

Por conseguinte, há uma segunda configuração do dano que está relacionada com o comportamento da evolução do dano (*Damage Evolution*) que pode ser balizada tanto pelo deslocamento quanto pela energia. Cada um deles exige certos parâmetros diferentes. O presente trabalho utilizou a opção de deslocamento, uma vez que é mais fácil extrair esse dado das curvas tensão-deformação.

Para traçar o comportamento do dano a partir do decréscimo da curva pode-se configurar a evolução do dano com a opção de deslocamento na fratura que pode ser definida por três modelos de *softening* sendo linear, exponencial e tabulado como ilustra a Figura 61.

No modelo linear, traça-se uma reta com deslocamento a partir do ponto de iniciação do dano, o que pode representar uma má aproximação do modelo dependendo do comportamento da curva experimental. A Figura 62 mostra o comportamento do dano linear na calibração da curva numérica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Vê-se que a representação com o deslocamento de 0.0 mm é equivalente à fratura instantânea em que o dano máximo ocorre logo após o início do dano e, por isso, assim que se inicia o dano a reta é totalmente vertical. Ademais, o gráfico mostra

que à medida que o deslocamento na fratura aumenta a inclinação da reta linear gerada torna-se mais inclinada.

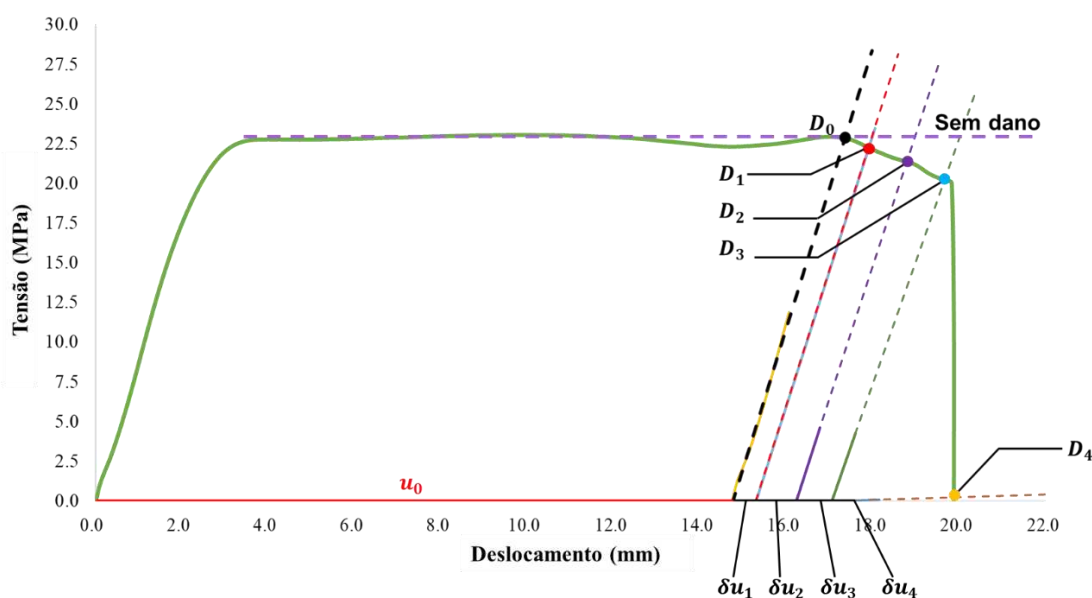
A partir desses resultados, percebeu-se que para essa curva o modelo linear não é adequado e por isso é necessário um modelo mais preciso para realizar a calibração dos resultados. Desse modo, partiu-se para a modelagem utilizando a evolução do tipo tabular que consiste, basicamente, em relacionar uma parcela de dano sofrido (D) de acordo com um deslocamento relacionado, incluindo a nova inclinação do módulo de elasticidade (Equação (14)).

Para encontrar esse deslocamento (u) é necessário encontrar a referência da deformação e, para isso, deve-se multiplicar a deformação (ε) pelo comprimento de núcleo (L_0) do corpo de prova estudado. Conforme mostrado na Figura 21 o comprimento efetivo central é de 57 mm e o deslocamento plástico é dado por

$$u = \varepsilon \cdot L_0 \quad (44)$$

A partir dessa equação é possível encontrar a curva tensão *versus* deslocamento para que se possa encontrar os parâmetros exigidos no programa e estabelecer uma relação entre a variável de dano e o deslocamento plástico no corpo de prova. Para isso, traçam-se as linhas de tendência com as inclinações referente ao dano sofrido naquele momento como ilustra a Figura 63.

Figura 63 – Pontos do dano tabular na curva tensão x deslocamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

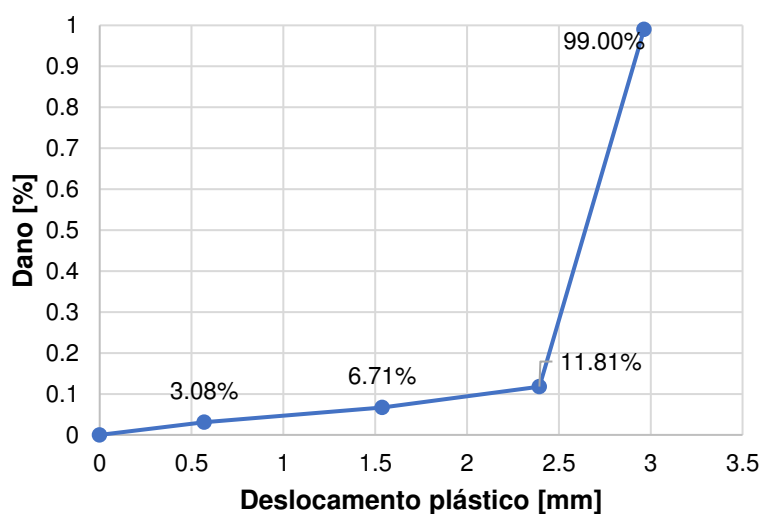
Frise-se que à medida que a curva decai o dano aumenta, isto é, $D_4 > D_3 > D_2 > D_1$. O valor do dano (D_n) que pode ser extraído do gráfico é dado pela razão entre a tensão no momento do dano medido e o ponto de máximo antes de ocorrer o início do dano, isto é

$$D_n = 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (45)$$

O programa precisa tanto do valor do dano quanto do deslocamento correspondente a ele. Esse deslocamento (u) é referente à parcela pós início do dano, ou seja, dado o valor da abscissa tocada pela reta de inclinação do módulo de elasticidade no início do dano, cada parcela de deslocamento é dada pela subtração do valor da abscissa em cada momento do dano pelo deslocamento inicial (u_0).

Desse modo, com os valores de dano e deslocamentos plásticos calculados é possível traçar uma curva que relaciona a evolução do dano pelo deslocamento como ilustra a Figura 64.

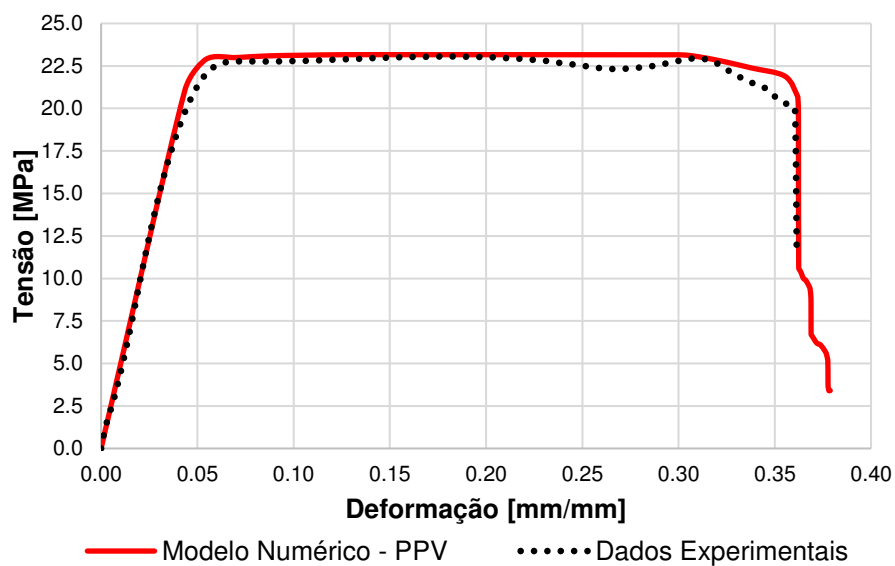
Figura 64 – Curva dano *versus* deslocamento plástico



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

É importante ressaltar que o dano final que deve ser colocado no programa é equivalente ao dano quase máximo, que no caso, utilizou-se 0,99. Isso ocorre para evitar erros de convergência já que o módulo de elasticidade efetivo (Equação (14)) poderia se tornar zero quando o dano é equivalente a 1. Após todas as aplicações obteve-se a curva calibrada do material ilustrada na Figura 65.

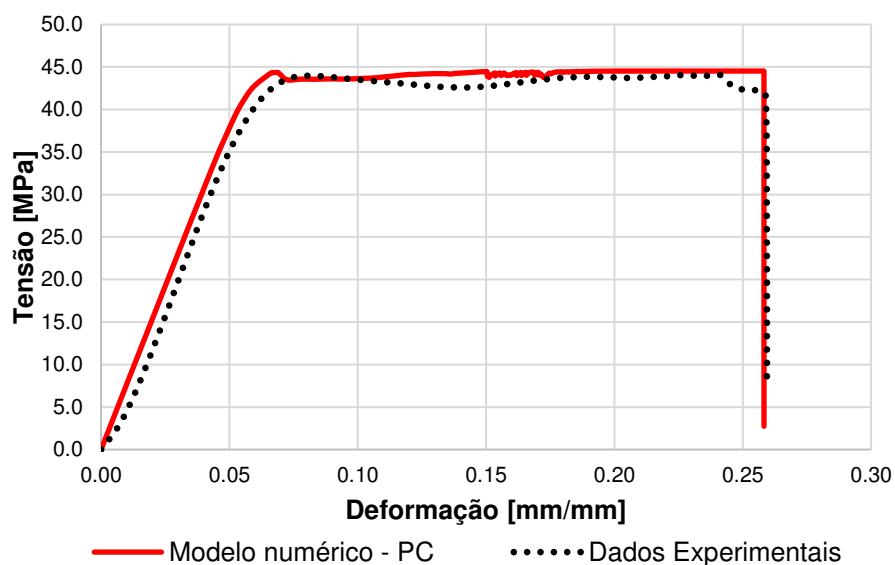
Figura 65 – Curva calibrada Polipropileno virgem (PPV)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

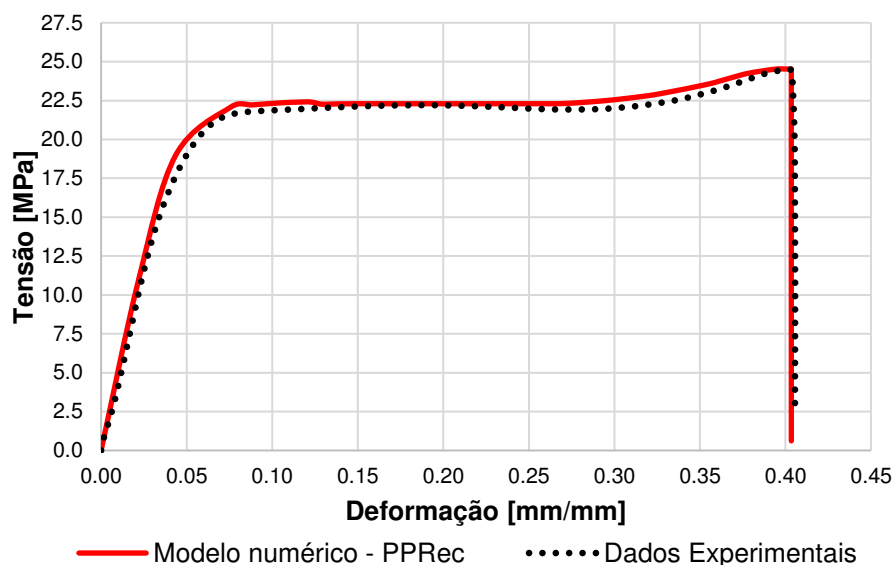
Apesar de a curva numérica não ter ficado extremamente ajustada com a curva experimental, considerou-se que os resultados obtidos foram satisfatórios para a utilização nos posteriores ensaios numéricos. Partindo dos mesmos princípios utilizados no PPV pôde-se realizar a calibração para o policarbonato e para o polipropileno reciclado e seus resultados estão mostrados nas Figuras 55 e 56

Figura 66 – Curva calibrada Policarbonato (PC)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 67 – Curva calibrada Polipropileno reciclado (PPRec)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados mostram que as calibrações das curvas numéricas, para os três materiais, foram muito próximas aos ensaios de laboratório, isto é, o modelo numérico está representando de modo muito fiel a realidade dos ensaios.

Viu-se que o modelo de Lemaitre de dano dúctil quando calibrado pode ser amplamente utilizado em materiais plásticos que apresentem esse comportamento. Materiais de dano frágil (*brittle materials*) devem ser avaliados com outros modelos já que apresentam baixo ou quase nulo escoamento.

Nota-se que a curva que mais se aproximou dos resultados foi a do polipropileno reciclado, justamente a mistura mais utilizada nas formas plásticas da Impacto® e que será usado como base para outras análises adiante.

4.2.2 Cargas usuais de operação

As cargas usuais de operação são aquelas em que as formas plásticas estão apoiadas nas transversinas e suportam o concreto armado ($\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$) fresco e, posteriormente, endurecido.

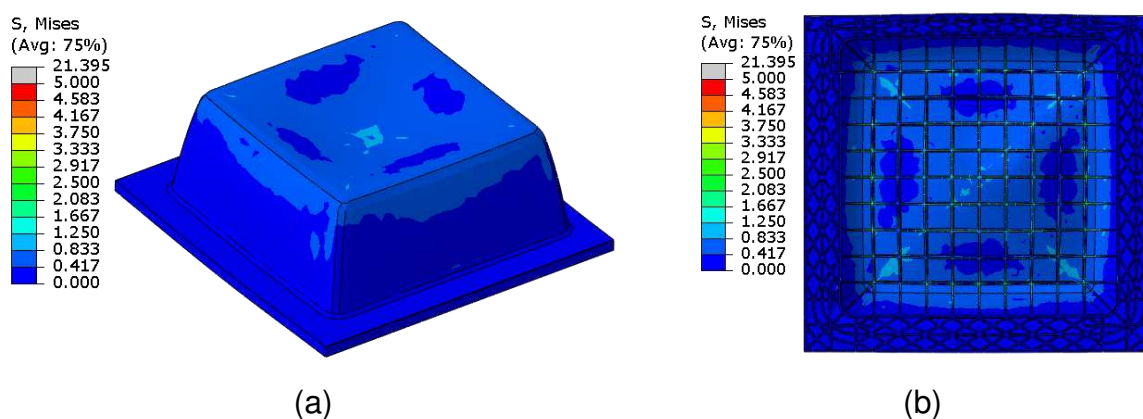
Essas cargas dependem principalmente do volume de concreto acima das formas e isso varia para cada tipo de projeto executado. Para avaliar se o efeito do envelhecimento pode apresentar danos para as cargas usuais utilizou-se um padrão

de carga para dois estados: o primeiro sendo um não envelhecido e o segundo o mais envelhecido, i.e. 0 e 360 horas, respectivamente.

Como o material mais utilizado nas formas da Impacto são a mistura contendo o polipropileno reciclado optou-se por fazer a avaliação do dano para as propriedades deste material.

Assim, aplicou-se uma pressão equivalente a $6,02 \text{ kN/m}^2$ conforme estimativa de peso em trabalho mostrado na Figura 25. Além da pressão do peso próprio, estimou-se e considerou-se uma carga acidental de $1,50 \text{ kN/m}^2$ referente à movimentação dos operários na montagem. A Figura 68 mostra os resultados das tensões de von Mises para as cargas usuais e sobrecarga do PP reciclado para um estado não envelhecido.

Figura 68 – Resultados de von Mises para cargas usuais 0h (PPRec)

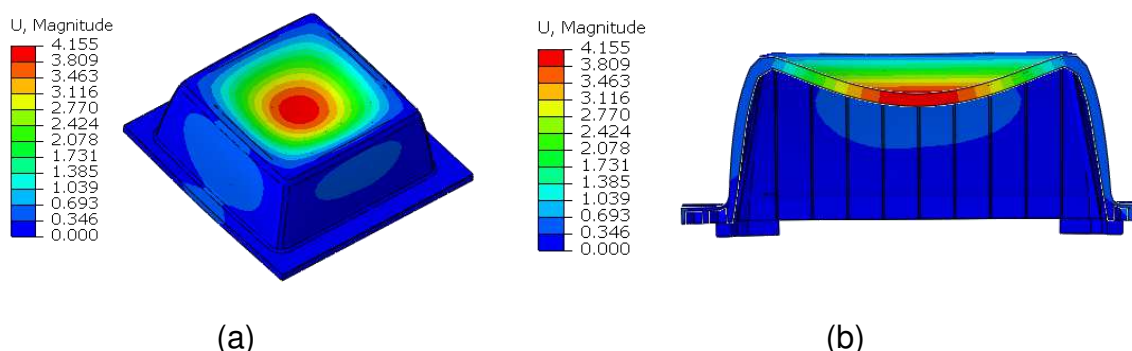


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As tensões na forma apresentaram valores entre 1,5 a 3,0 MPa. Essas tensões são baixas e compõem a parte elástica da curva tensão-deformação do polipropileno virgem e dos outros materiais aqui estudados como mostrado nas curvas anteriores.

Também foram avaliados os deslocamentos causados pelas cargas usuais de operação e seus resultados estão mostrados nas vistas de topo (a) e vista de corte (b) da Figura 69.

Figura 69 – Resultados de deslocamentos para cargas usuais 0h (PPRec)

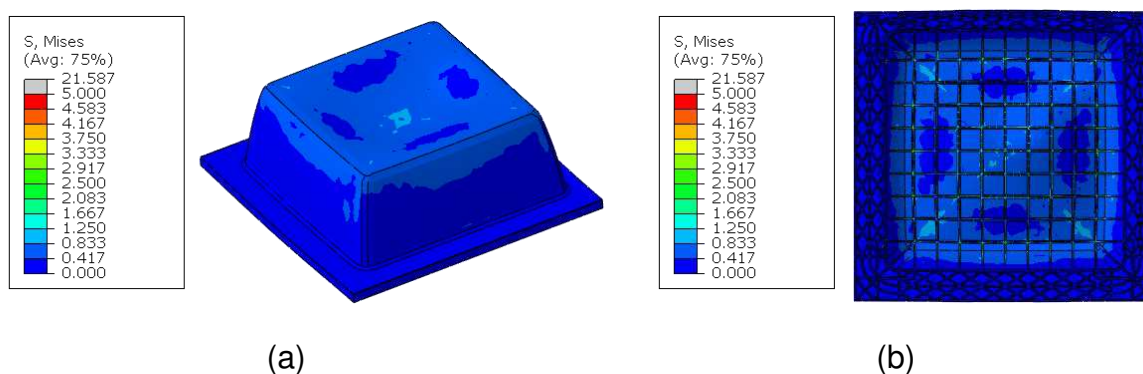


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As figuras mostram que os deslocamentos máximos causados pelas cargas giraram em torno de 4.15 mm no centro da forma. Frisa-se que as imagens estão em uma escala mais exagerada. Os deslocamentos resultantes são pequenos e mostra que há pouca deformação na forma quando utilizadas para seu propósito.

Avaliaram-se as tensões de von Mises com a utilização da curva tensão-deformação de 360 horas da mistura contendo polipropileno reciclado mostrados superior (a) e inferior (b) na Figura 70.

Figura 70 – Resultados de von Mises para cargas usuais 360h (PPRec)



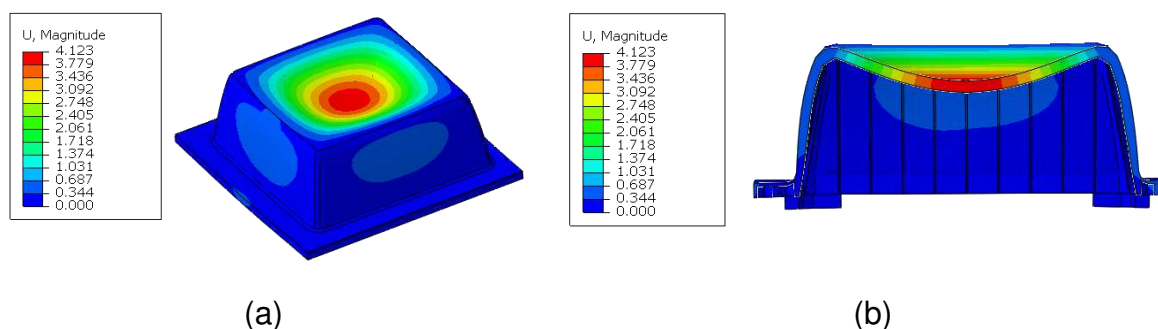
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

De modo análogo ao comportamento das tensões de 0h percebeu-se que os valores também foram entre 1,5 a 3,0 MPa compondo a parte elástica da curva. A tensão de pico também foi um pouco superior chegando à 21,587 MPa contra 21,395 MPa para o estado de 0 horas. Essa variação é praticamente insignificante e pode representar uma manutenção das propriedades mecânicas.

Essas tensões são baixas e compõem a parte elástica da curva tensão x deformação do polipropileno virgem e dos outros materiais ,aqui estudados como mostrado nas curvas anteriores.

Assim como em 0 horas, avaliou-se os deslocamentos resultantes das cargas usuais com seus resultados estão mostrados nas vistas de topo (a) e vista de corte (b) da Figura 71.

Figura 71 – Resultados de deslocamentos para cargas usuais 0h (PPRec)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Viu-se que as os deslocamentos no meio da forma apresentaram uma leve diminuição com 360h em relação ao estado não envelhecido. Todavia, esse decréscimo é pouco significativo podendo ser considerado praticamente o mesmo.

Sabe-se que as formas plásticas da Impacto têm seu uso muito difundido no mercado e tem grande aceitação no mercado. As simulações numéricas mostraram que as formas, como era esperado, são aptas a suportarem tranquilamente as cargas de trabalho usais sem grandes acúmulos de tensões.

Além disso, mesmo utilizando na modelagem numérica as propriedades já degradadas do estado envelhecido, o comportamento para as mesmas cargas foi praticamente o mesmo, mostrando que mesmo para formas mais envelhecidas, elas continuam sendo bastantes eficientes para o que foram propostas o que reforça a grande aceitação e difusão dos materiais no mercado.

4.2.3 Arrancamento

Como foi visto anteriormente, as formas não sofrem processo de dano quando utilizadas sobre suas cargas usuais de operação. Todavia, o processo de arrancamento das formas plásticas pode ser um dos principais causadores das

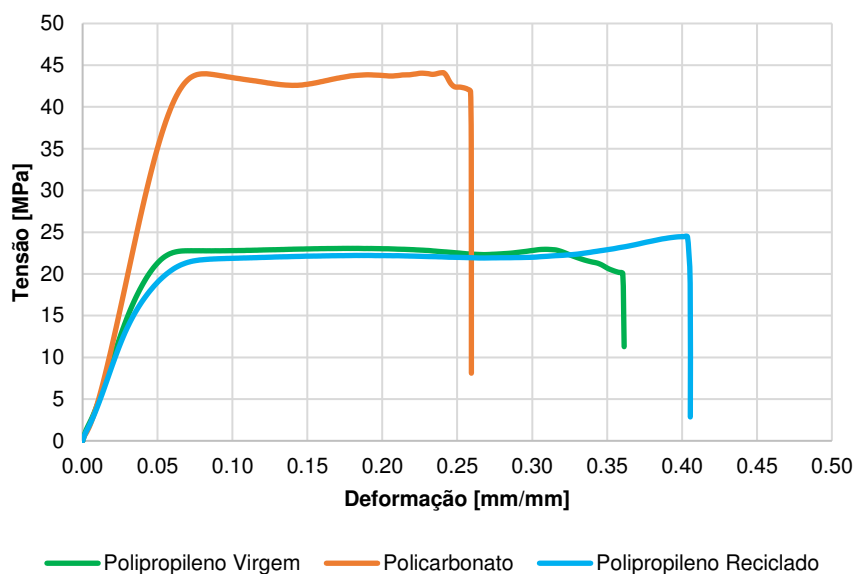
fissurações precoces encontradas nos materiais ao longo do tempo em conjunto com os fatores ambientais de envelhecimento.

Isto posto, é possível simular numericamente como se comporta o fluxo de tensões na forma dado as condições de contorno laterais que a confinam em uma situação pré-arrancamento.

Para a avaliação numérica da forma foi utilizado o modelo constitutivo de um dos três materiais, o polipropileno virgem, para o estado não envelhecido (calibrado anteriormente) de modo a avaliar o comportamento dela ante o arrancamento.

De modo comparativo, escolheu-se ilustrar na Figura 72 as médias das curvas de tensão *versus* deformação para os estados não envelhecidos dos três materiais estudados de modo a mostrar a diferença dos comportamentos de cada curva.

Figura 72 – Curva tensão-deformação dos três materiais não envelhecidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

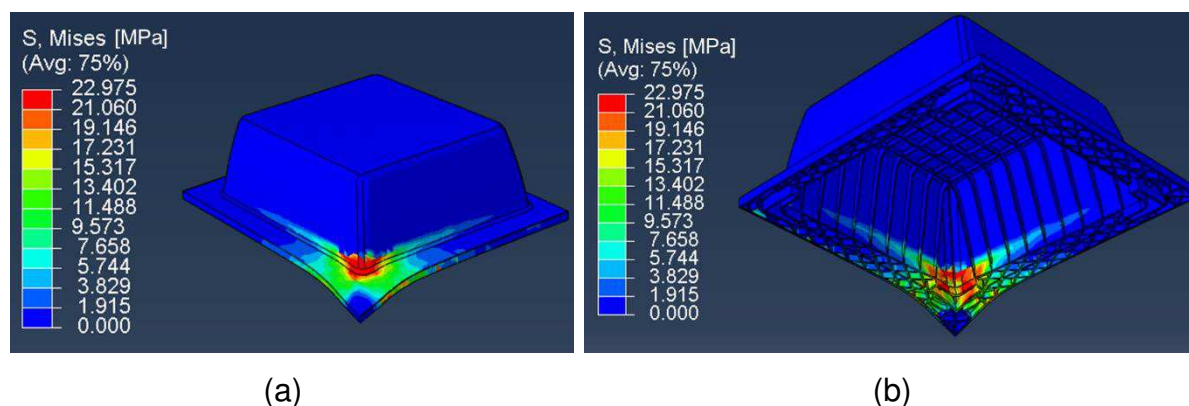
Como visto antes, percebe-se pelas curvas que os módulos de elasticidade dos três materiais são distintos em que o PC apresenta maior módulo, seguido do PP virgem e por último o PP reciclado. Lembra-se que as propriedades das curvas foram calibradas para que a análise seja fiel ao comportamento de laboratório.

Vê-se também que o comportamento do polipropileno virgem e da mistura reciclada são muito parecidos e há diferença significativa apenas quando comparados com o policarbonato.

Desse modo, aplicando-se um carregamento no canto da forma e restringindo-se os deslocamentos das laterais da forma é possível encontrar o comportamento das tensões.

Assim, utilizando o polipropileno virgem para as simulações numéricas de arrancamento encontrou-se o fluxo de tensões nas formas plásticas. Mostra-se na Figura 73.as concentrações de tensões de von Mises em MPa que ocorrem devido ao deslocamento no canto para prover o arrancamento frontalmente (a) e de costas (b)

Figura 73 – Tensões de von Mises em MPa para arrancamento de canto da forma

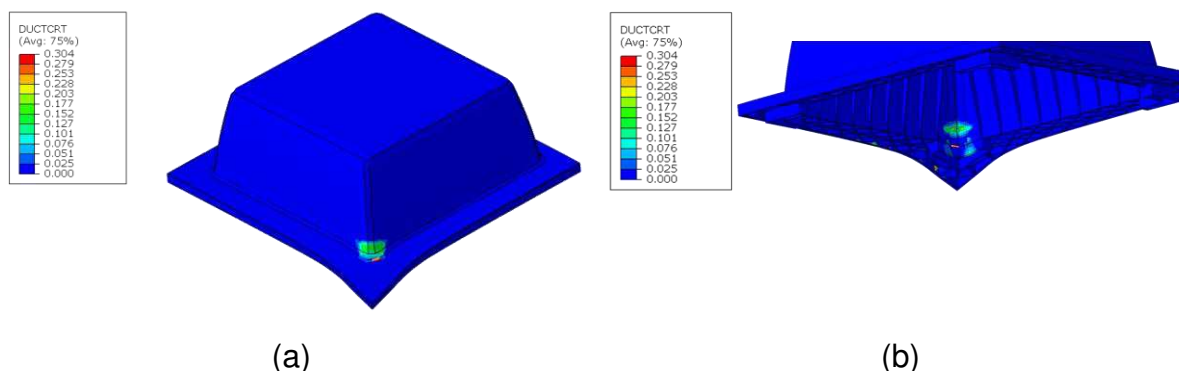


Percebeu-se que a aplicação de uma carga de arrancamento sob uma área de contato com tamanho similar à de uma ferramenta de extração manual provocou tensões altas nas regiões onde ocorrem as fissurações e rupturas precoces.

As tensões atingiram valores próximos ao limite de tensões do gráfico tensão-deformação do PP virgem com regiões com valores de até 22,975 MPa o que mostra que essas regiões já estão sob regime plástico.

Ademais, essas tensões máximas ocorreram nas regiões onde ocorrem as fissuras e pode-se avaliar se há iniciação de dano nessa região. Desse modo, avaliou-se o percentual do dano no canto da forma como ilustra a Figura 74.

Figura 74 – Propagação do dano no arrancamento de canto da forma



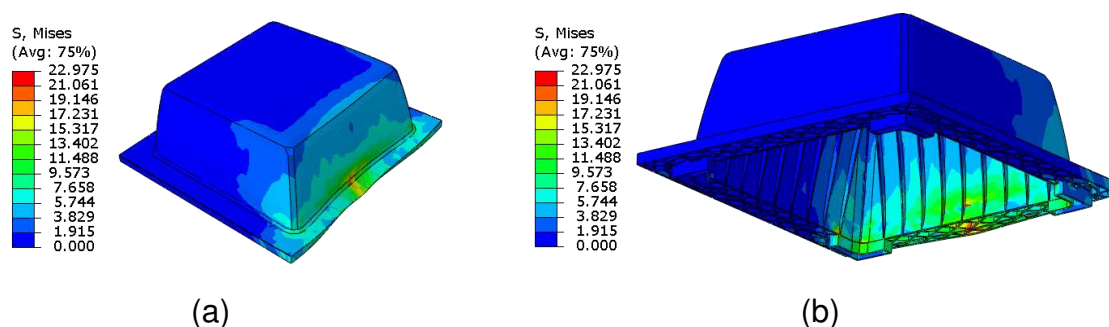
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 74 mostra que o percentual médio de iniciação de dano causado nos cantos das formas ficou em torno de 10% a 30%. Os resultados mostraram que a aplicação de um deslocamento com grandeza da espessura da forma causa danos.

Sabe-se que as fissuras não ocorrem no primeiros arrancamentos, mas sim em um processo de vários arrancamentos. Desse modo, o acúmulo do dano ao longo do período de uso das formas é sugestivo para o aparecimento das fissuras e da consequente quebra.

Além do arrancamento de canto, também se simulou o arrancamento pelo meio da forma, já que é uma possibilidade quando o operador retira as transversinas, pode-se acoplar a ferramenta de extração próximo ao meio da aba da forma plástica como ilustra a Figura 75.

Figura 75 – Tensões de von Mises em MPa para arrancamento no meio da forma

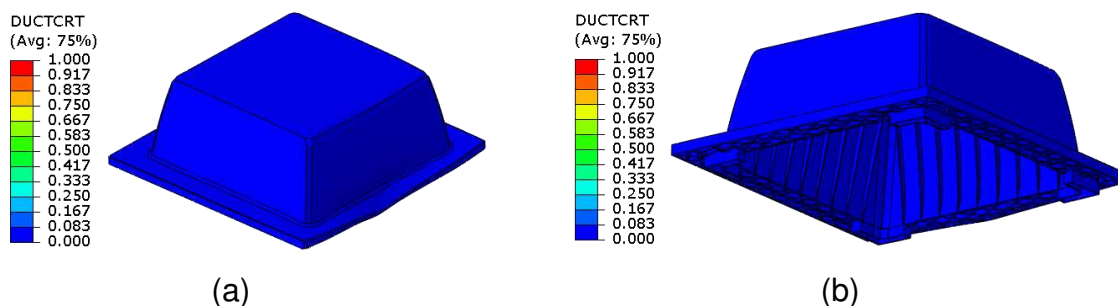


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados ilustram que o acoplamento realizado no centro da aba da forma no meio do vão representou melhores distribuições do fluxo de tensões existentes. Assim, o acúmulo de tensões foi menor o que sugere menores danos. Para

ilustrar o dano simulou-se a propagação do dano quando a carga de arrancamento está nesta posição ilustrada na Figura 76

Figura 76 – Propagação do dano no arrancamento de canto no meio da forma



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Vê-se que não houve propagação de dano quando a carga foi aplicada no meio da forma como aconteceu quando o carregamento foi no canto da borda da forma. Isso sugere que a como o meio da forma é menos rígido que o canto da forma, a aplicação de um deslocamento relativo à espessura de sua borda necessita de menos esforços para que ocorra a mesmo deslocamento do canto.

A utilização da ferramenta de extração no meio da forma, quando possível, pode ser utilizada, mas não há garantias de que a força de arrancamento causada por esse deslocamento seja suficiente para realizar o arrancamento efetivo e a prevenir danos precoces.

5 CONCLUSÕES

As formas plásticas, apesar serem completamente difundidas no mercado, apresentaram algumas fissuras em campo e suposições sobre que o efeito do envelhecimento das formas ante a exposição aos efeitos UV em conjunto com o processo de arrancamento aumentariam a incidência dessas fissurações foram levantadas.

Desse modo, ensaios de laboratório que avaliaram o comportamento e as propriedades mecânicas dos materiais mais utilizados nas formas plásticas e potenciais substitutos como o policarbonato ante o efeito do envelhecimento acelerado em câmaras UV foram realizados.

Além dos ensaios de laboratório, simulações numéricas dos corpos de prova de tração em prol da calibração dos materiais utilizados na análise por elementos finitos das formas plásticas para avaliação da existência de dano foi executada.

Além disso, simulações numéricas de uso da forma sobre suas cargas usuais foram realizadas para avaliar se há acúmulo de tensões que causam algum tipo de dano a elas. Realizou-se, também simulações numéricas de arrancamento para avaliar o acúmulo de tensões e o dano existente nas formas plásticas quando este ocorre no canto e no meio da forma.

Frisa-se que não foi realizado o comparativo de custo dos materiais, uma vez que o fornecimento dos materiais reciclados e virgens variam de acordo com cada fornecedor. Ademais, cada fornecedor pode possuir uma variação entre os próprios materiais, principalmente quando se trata de materiais reciclados, já que o índice de pureza da mistura reciclada pode variar para entre diferentes fornecedores afetando as propriedades mecânicas dos compósitos finais.

Os resultados de laboratório mostraram que o efeito do envelhecimento é potencial de que seja um fator preponderante para o surgimento de rupturas precoces nas formas plásticas. Esse envelhecimento acelerado realizado nos materiais mostrou que houve redução dos módulos de elasticidade, energia de fratura e força máxima resistida.

Ademais, o uso de aditivo Anti-UV nas amostras de policarbonato e polipropileno reciclado, tem se mostrado eficiente no combate as radiações, uma vez pode ter preservado as propriedades mecânicas dos compósitos estudados.

Além disso, os resultados aproximados da tenacidade encontrados pelo método aproximado dos trapézios mostraram-se sensíveis à presença da radiação ultravioleta, mesmo nos materiais com aditivo Anti-UV, já que para as primeiras horas de irradiação houve grande diminuição dessa propriedade.

É importante frisar que se tem uma dificuldade em se relacionar as horas de irradiação com o tempo real de exposição, isto é, não se tem precisão em saber quanto tempo uma forma plástica irá suportar os efeitos ultravioleta do sol, uma vez que há variações ao longo do ano da posição do sol, temperatura, umidade do ar, tempo efetivo de exposição das formas, entre outras variáveis ambientais.

Além disso, a faixa de radiação emitida pela câmera UV compreende apenas uma das faixas da luz natural. A máquina Equilam e modelo EQUV utilizada no envelhecimento acelerado emitiu principalmente as faixas A e B da radiação, já que cada uma de suas lâmpadas fluorescentes compreende uma dessas faixas.

As simulações numéricas dos corpos de prova de tração foram essenciais para a calibração do modelo de cada material de modo a validar as simulações posteriores com a forma.

O modelo de Lemaitre utilizado, inicialmente proposto para metais pelo manual do programa, mostrou-se muito eficaz para a representação do dano nos materiais poliméricos, desde que as propriedades das curvas de tensão-deformação sejam corretamente extraídas e calibradas dentro do programa.

Todavia, para que o modelo de Lemaitre seja válido para plásticos, o comportamento da curva tensão-deformação do material deve ser similar à do aço, já que é a proposição do modelo.

Outros tipos de materiais como os hiperelásticos ou com outras propriedades específicas devem ser estudados para se adequar a modelos próprios, muitas vezes, com a necessidade de se criar e utilizar uma sub-rotina com parâmetros próprios do material (UMAT).

Já as simulações numéricas, para as cargas usuais mostram que as formas não sofrem dano quando estão sendo usadas de modo natural. Essa conclusão já era esperada, uma vez que as formas são muito utilizadas e difundidas no mercado e, caso, apresentassem dano essa aceitação não seria real.

Por outro lado, as simulações numéricas para o arrancamento nos cantos das formas mostraram que o fluxo de tensões de von Mises ocorrem justamente nos locais onde os danos precoces acontecem nas formas plásticas. Isso sugere que o

uso da ferramenta de extração nos cantos da forma são os principais causadores em conjunto com a degradação das propriedades mecânicas devido ao envelhecimento.

Foi mostrado que a utilização de um deslocamento prescrito na ordem de grandeza da espessura da borda da forma plástica, com cerca de 3 centímetros, provoca danos nos cantos da forma. Sabe-se que a efetivação de uma fissuração e até um rompimento da borda forma não ocorre instantaneamente, mas sim devido à um processo de vários arrancamentos e acúmulo de dano na região supracitada.

Desse modo, utilizar os cantos da forma muitas vezes ao longo do tempo pode gerar danos irreparáveis como mostrou a iniciação do dano na modelagem numérica de arrancamento.

Já quando o arrancamento se dá pelo meio da borda forma, a concentração de tensões é menor uma vez que a rigidez dessa região é menor do que os cantos e, para um mesmo deslocamento de 3 cm, é necessária uma menor carga que pode ser ou não suficiente para executar o arrancamento completo.

Por fim, frisa-se que a utilização de um deslocamento prescrito utilizando a ferramenta de acoplamento de nós dentro do programa apresentou resultados aproximados de um processo de extração. Para resultados mais precisos modelos de contato considerando a interface devem ser estudados e validados para que seja feita uma análise mais minuciosa.

Desse modo, como sugestão para trabalhos futuros pode-se:

- Avaliar o comportamento do arrancamento utilizando superfícies de contato com validação da força de arrancamento efetiva em campo.
- Estudar o envelhecimento natural das formas plásticas para uma região com as horas de exposição definidas e tentar correlacionar com o tempo de envelhecimento acelerado da máquina.
- Analisar microscopicamente as mudanças que o efeito do envelhecimento causa nos três materiais e a correlação desses fatores com as propriedades mecânicas de cada um deles.

REFERÊNCIAS

ASTM **C125-18: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**, 2018.

ASTM **D256: Izod Impact**. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials. 2010.

ASTM, D. **ASTM D-638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. **ASTM Int**, 2014.

ASTM, D. **ASTM D-790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced Plastics and Electrical Insulation Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003.

BHUSHAN, Bharat. **Springer handbook of nanotechnology**. Berlin: Springer. 4th edition. 2018.

BOUBAKRI, A. et al. Impact of aging conditions on mechanical properties of thermoplastic polyurethane. **Materials & Design**, v. 31, n. 9, p. 4194-4201, 2010.

BRANCO, Pércio de Moraes. **Dicionário de Mineralogia e Gemologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 608 p. il.

CALLISTER JR, Willian D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 7 Edição. São Paulo, 2008.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V..**CIÊNCIA DOS POLÍMEROS**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 4. ed. São Carlos: Artliber, 2020.

CHANDA, Manas. **Introduction to polymer science and chemistry**: a problem-solving approach. CRC Press, 2013.

CHEN, Wai-Fah; HAN, Da-Jian. **Plasticity for structural engineers**. J. Ross publishing, 2007.

EQUILAM. **Equipamentos para ensaio de impacto em polímeros não metálicos equipamentos para ensaio de impacto em polímeros não metálicos**. 2020. Disponível em: https://equilam.com.br/wp-content/uploads/2020/09/Cat%C3%A1logo_Materiais_N%C3%A3o_Metals_rev.04.pdf. Acesso em: 10 mar. 2023.

HEIKKILÄ, A. et al. UV exposure in artificial and natural weathering: A comparative study. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing LLC, 2017. p. 110004.

IMPACTO. **Sistema Pavplus**. 2022. Disponível em: <https://impactoprotensao.com.br/home/sistema-pavplus/>. Acesso em: 07 out. 2023.

INSTRON. **The Definitive Guide to ASTM D790 Flexure Testing of Plastics**. 2019. Disponível em: <https://www.instron.com/en/testing-solutions/astm-standards/the-definitive-guide-to-astm-d790>. Acesso em: 15 mar. 2023.

JAFELICE, Domingos Antônio. **Caracterização de compósitos de polipropileno reciclado e fibra de coco**. 2013. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2013. Disponível em: <http://dspace.mackenzie.br/handle/10899/24166>. Acesso em: 11 dez. 2022.

LEMAITRE, Jean. **A course on damage mechanics**. Springer Science & Business Media, 1996.

LIU, Yuyan et al. Effect of accelerated xenon lamp aging on the mechanical properties and structure of thermoplastic polyurethane for stratospheric airship envelope. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 29, n. 6, p. 1270-1276, 2014.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros** – 2, ed, ver e ampl. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 2004.

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

MEYERS, Robert A. et al. **Encyclopedia of physical science and technology**. Academic Press, 2001.

OKEREKE, Michael. **This is the most comprehensive video about ductile damage**. S.I. 2024. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gpSh2KLWnqk>. Acesso em: 15 jun. 2024.

OLIVEIRA, Michelle. **Polímeros: o que são, suas aplicações e as áreas de formações técnicas e acadêmicas**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015. Disponível em: <https://bityli.com/6hvoF>. Acesso em: 12 nov. 2022.

OTA, Waldyr Naoki. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional**. M. Sc. Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2004.

POCKSZEVNICKI, B. C., 2004. **Análise de materiais em regime elastoplástico usando modelo J_2 com dano e modelo de cap suave**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

PULUNGAN, Ditho; LUBINEAU, Gilles; YUDHANTO, Arief; YALDIZ, Recep; SCHIJVE, Warden. Identifying design parameters controlling damage behaviors of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites using micromechanics as a virtual testing tool. **International Journal of Solids and Structures**. -, p. 177-190.

15 jun. 2017. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768317301361>. Acesso em:
09 abr. 2023.

RODA, Daniel Tietz. **A injetora de plásticos**. 2011. Disponível em:
<https://www.tudosobreplasticos.com/processo/injecao.asp>. Acesso em: 09 mar.
2023.

ROSATO, Dominick V.; ROSATO, Marlene G. **Injection molding handbook**.
Springer Science & Business Media, 2012.

SABAT, Lovely; KUNDU, Chinmay Kumar. History of finite element method: a
review. **Recent Developments in Sustainable Infrastructure**, p. 395-404, 2021.

SOUSA, C. S. M. de. **Polímeros: principais tipos, características e
especificações comerciais, processos de transformação e aplicações**. São
Paulo: USP, 2019. Color. Disponível em: <https://bityli.com/laffuhnWn>. Acesso em: 10
nov. 2022.

TAVARES, Andréia Cristina. **Efeito do envelhecimento acelerado nas
propriedades mecânicas superficiais do polietileno**. 2003. 123 f. Dissertação
(Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Física, Setor de Ciências Exatas,
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

WIKIPÉDIA. **Critério de falha de von Mises**. 2009. Disponível em:
https://pt.wikipedia.org/wiki/Crit%C3%A9rio_de_falha_de_von_Mises. Acesso em: 31
maio 2023.

WYPYCH G. **Handbook of fillers: physical properties of fillers and filled materials**.
4th ed. Toronto: ChemTec Publishing; 2016, 1033p.