



Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial

IGOR FLORENTINO RODRIGUES

ANÁLISE DE UM VASO DE PRESSÃO PÓS-INCIDENTE

BELÉM – PA

2021

IGOR FLORENTINO RODRIGUES

ANÁLISE DE UM VASO DE PRESSÃO PÓS-INCIDENTE

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial como parte do requisito para obtenção do título de Mestre pela Universidade Federal do Pará, desenvolvida sob a orientação da Profa. Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias.

Linha de Pesquisa: Construção Naval

BELÉM – PA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R696a Rodrigues, Igor Florentino.
Análise de um vaso de pressão pós-incidente / Igor Florentino
Rodrigues. — 2021.
78 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Industrial, Belém, 2021.

1. Reservatório compósito de ar pressurizado. 2.
Compensador de Movimentos. 3. Polietileno de Alta
Densidade. 4. Compósito de fibra de vidro. I. Título.

CDD 621.7

IGOR FLORENTINO RODRIGUES

ANÁLISE DE UM VASO DE PRESSÃO PÓS-INCIDENTE

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial como parte do requisito para obtenção do título de Mestre pela Universidade Federal do Pará e submetida a banca examinadora constituída pelos professores:

Data de aprovação: ___ / ___ / ___

Conceito: _____

Prof. Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias.
Orientadora– UFPA

Prof. Dra. Gisélia Cardoso
Membro Externo– UFS

Prof. Dra. Marcele Fonseca Passos
Membro – UFPA

BELÉM – PA

2021

DEDICATÓRIA

A minha família, em especial a minha esposa que sempre participou dos momentos mais difíceis da minha carreira profissional.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus, por tudo que fiz até este momento de vida.

Primeiramente, cabe um grande agradecimento à minha esposa Daniel e Isael e as minhas filhas Victoria, Valentina e Verona, por sua compreensão e paz nos grandes momentos de ausência.

A minha orientadora, Prof. Carmen Gilda, que sempre ajudou com profundos questionamentos lógicos e estimulantes, além de compreender as diversas dificuldades surgidas ao longo deste trabalho de pesquisa.

Ao amigo Marcio Santos, que ajudou desde o início, seja no processamento de documentos para inscrição no curso como também suporte as aulas a distância, onde se propôs a dar suporte a todo um grupo que mora em vários locais desse imenso País.

Aos amigos Thomaz Rocha e José Costa que ajudaram durante a fase experimental em laboratório, sem ajuda deles não teria sido possível a realização dos ensaios com os corpos de prova de materiais compósitos.

RESUMO

Materiais compósitos possuem inúmeras aplicações nas mais variadas áreas da engenharia como offshore, indústria de petróleo e gás, indústrias navais, aeronáutica e automobilística. Utilizados devido as vantagens de alta rigidez e resistência específica, proteção a corrosão e flexibilidade estrutural. O trabalho está focado na análise dos materiais de um vaso de pressão de fibra de vidro com matriz epóxi (FV) e de polietileno de alta densidade (PEAD) uma década pós incidente. A abordagem foi baseada em duas etapas, primeiro no relato da investigação ocorrida a bordo de uma plataforma de perfuração do tipo semissubmersível que opera em regime offshore com capacidade de perfuração de 7500 metros de profundidade e lâmina d'água de 2500 metros, neste local ocorreu a explosão de uma linha de alta pressão que interligada a uns reservatórios de ar feito de material compósito pertencente ao sistema de alta pressão denominado compensador de movimentos CMC (*crowm mounted compensator*). Numa segunda etapa, foram analisadas as amostras retiradas destes vasos, onde foram realizados ensaios de impacto (Charpy) conforme norma ASTM D6110-10, ensaios de flexão conforme norma ASTM D790-17, ensaios de DSC (Calorimetria Exploratória Diferencial) conforme ASTM D3418-12, MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e TG (Termogravimetria) de forma a termos um estudo mais detalhado sobre os materiais que constituem os vasos, sendo eles o PEAD e o compósito de FV com matriz epóxi. Apresenta-se o resultado da investigação e finaliza-se o trabalho com os resultados dos ensaios dos materiais que se mostraram eficazes mesmo após 10 anos de fabricação e intercorrências durante a utilização dos vasos.

Palavras-Chaves: Reservatório compósito de ar pressurizado. Compensador de Movimentos. Polietileno de Alta Densidade. Compósito de fibra de vidro.

ABSTRACT

Composite materials have numerous applications in the most varied areas of engineering as offshore, oil and gas industry, marine industries, aeronautics, and automaker. Used because they bring high rigidity and specific resistance, due to the advantages of being resistant to corrosion and having structural flexibility. The work is focused on fiberglass composites with epoxy matrix (FG) and no high-density polyethylene (HDPE) a decade after the incident. The approach was based in two stage, first on an investigation that took place on board of a semi-submersible drilling rig that operates offshore with a drilling capacity of 7500 meters in depth and a water depth of 2500 meters. a high pressure line that is connected to CAPV (composite air pressure vessel) that is part of to the high pressure system of the CMC (Crown mounted compensator). In a second stage, was took samples from CAPV to be analyzed, where impact tests (Charpy) were performed according to ASTM D6110-10 standard, flexion tests according to ASTM D790-17 standard, differential scanning calorimetry (DSC) according to ASTM D3418-12 standard, scanning electron microscopy (SEM) and thermogravimetric to have a more detailed study on the composite materials that made up those vessels, which are PEHD and FG with matrix epoxy. Showed the results of the investigation and finish the work with material analyses assays even after 10 years of manufacture and complications during the use of the vessels.

Keywords: CAPV (composite air vessel pressure). CMC (crown mounted compensator). PEHD (Polyethylene High Density). Fyber Glass Composite.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1: Localização da sala de APV #3.....	16
Figura 2: Layout das linhas de alta pressão.....	16
Figura 3: Delaminação externa VP-26.....	17
Figura 4: Lado externo com sintomas de queima VP-28 e fissura interna VP-28.....	18
Figura 5: Detalhe da superfície externa do CAPV 29, onde se observa “empolamento” da pintura.....	19
Figura 6: Área externa com fuligem e fissura interna do CAPV-30.....	19
Figura 7: Fissuras internas VP-31.....	20
Figura 8: Detalhe da CAPV que ocorreu o incidente.....	21
Figura 9: Tubo do manifold de 6” evidência de queima no interno e de fusão onde houve incidência de calor vindo da CAPV.....	21
Figura 10: Trinca no revestimento interno.....	22
Figura 11: Curva de enchimento das CAPV’s.....	23
Figura 12: Comportamento da curva de aquecimento.....	24
Figura 13: Falhas na construção do vaso.....	29
Figura 14: Trincas na área de solda.....	30
Figura 15: Trinca na Cúpula Tangente ao Flange.....	31
Figura 16: Trinca No pescoço radial ao Flange.....	31
Figura 17: Projeto antes do incidente.....	32
Figura 18: Projeto pós incidente.....	33
Figura 19: Formação de vapores combustíveis e migração de mistura explosiva para o coletor.....	35
Figura 20: Curva S-N que é um gráfico de magnitude de tensão (S) por número de ciclos (N).	37
Figura 21: CAPVs fabricadas de FV e PEAD.....	39
Figura 22: Classificação geral dos materiais compósitos.....	40
Figura 23: Esquemas das formas mais comuns de reforços (Fonte: Daniel e Ishai, 1994).	40
Figura 24: CAPV onde foram removidas as amostras para os ensaios.....	41
Figura 25: Amostras de PEAD e FV utilizadas nos ensaios.....	42
Figura 26: Dimensões das amostras utilizadas para realização do Charpy.....	43
Figura 27: Amostras de FV e PEAD utilizadas no ensaio de impacto.....	44
Figura 28: Amostras de FV e PEAD após o ensaio de impacto.....	44
Figura 29: Relação de bigorna, corpo de prova e borda de ataque entre si para o método de teste Charpy.....	45
Figura 30: Equipamento utilizado para os testes de impacto.....	45
Figura 31: Dimensões das amostras utilizadas para realização do teste de flexão.....	47
Figura 32: Exemplos típicos de curvas de flexão (σ_f) x (ϵ_f).....	47
Figura 33: Amostras de FV e PEAD utilizadas no ensaio de flexão.....	48
Figura 34: Amostras de FV e PEAD após os ensaios de flexão.....	48
Figura 35: Equipamento utilizado para os ensaios de flexão.....	49
Figura 36: Acessório usado para definir o centro de carga e o espaçamento e alinhamento de suporte.....	49
Figura 37: Imagens das Amostras: (a) AFK211230 e (b) AFK211231.....	51
Figura 38: Resultados obtidos dos ensaios de impacto.....	54
Figura 39: Gráfico força x deformação para os testes de flexão do PEAD.....	56
Figura 40: Gráfico força x deformação para os testes de flexão da FV.....	57
Figura 41: Corpo de prova (FV) arrancadas da matriz.....	59

Figura 42: Corpo de prova (PEAD) fraturado	59
Figura 43: Curva DSC da amostra AFK211230 – 1o Aquecimento	60
Figura 44: Curva DSC da amostra AFK211230 – 2o Aquecimento	60
Figura 45: Curva DSC da amostra AFK211231 – 1o Aquecimento	61
Figura 46: Curva DSC da amostra AFK211231 – 2o Aquecimento	61
Figura 47: Micrografias da amostra AFK211230, com aumentos de: (a) 50X, (b) 100X, (c) 200X, (d) 100X, (e) 200X e (f) 500X.....	63
Figura 48: Micrografias da amostra AFK211231, com aumentos de: (a) 100X, (b) 200X, (c) 1000X, (d) 1000X, (e) 200X e (f) 1000X.....	65
Figura 49: Curvas TG e DTG referentes à amostra AFK211230.....	67
Figura 50: Curvas TG e DTG referentes à amostra AFK211231.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Esquema de enchimento	23
Tabela 2: Ar constante (K)	24
Tabela 3: Propriedades do ar a baixa pressão considerando gás ideal	25
Tabela 4: Dados do material compósito das CAPV's.	25
Tabela 5: Condições do ensaio de DSC.....	51
Tabela 6: Condições do ensaio de Teor de Cinzas.	52
Tabela 7: Condições do ensaio de Teor de Cinzas.	53
Tabela 8: Resultados de DSC.	62
Tabela 9: Resultados do ensaio de Teor de Cinzas.	62
Tabela 10: Resultados de EDS para a amostra AFK211230.	64
Tabela 11: Resultados de EDS para a amostra AFK211231.	66
Tabela 12: Resumo dos Resultados de Teor de cinzas.....	66
Tabela 13: Resumo dos resultados de TG	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PEAD – Polietileno de alta densidade

FV – Fibra de vidro

CAPV – Composite air pressure vessel

CMC – Crown mounted compensate

IM – Injection moulding

PSI – Pound square inch

VP – Vaso de pressão

ISO – International organization for standardization

PE – Polietileno

RM – Rotaring moulding

ASTM – American society for testing and materials

CFDM – Cumulative fatigue damage models

TCC - Thermal Contact Conductance

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

DSC – Differential Scanning Calorimetry

EDS – Energy Dispersive Spectroscopy

LISTA DE SÍMBOLOS

T_1 – Temperatura final absoluta

T_2 – Temperatura inicial absoluta

P_1 – Pressão final absoluta

P_2 – Pressão inicial absoluta

γ - Constante do gás

σ_f – Tensão

ε_f - Deformação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 METODOLOGIA DE PESQUISA	13
2.1 ESCOPO DA PESQUISA.....	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	14
3 EVENTO	16
3.1 INSPEÇÕES APÓS O INCIDENTE.....	17
3.2 INVESTIGAÇÃO	21
3.3 FALHA DE CONSTRUÇÃO DAS CAPV'S	26
3.4 MELHORIAS DE CONSTRUÇÃO DAS CAPV'S	31
3.5. ANÁLISE DO INCIDENTE.....	33
3.6 RECOMENDAÇÃO DE PRESSURIZACAO DOS SISTEMA DE APV'S.....	36
4 EXPERIMENTO	36
4.1 MATERIAIS.....	39
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	42
4.3 PROPRIEDADES TERMICAS DOS MATERIAIS	50
4.4 RESULTADOS.....	53
5 CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de materiais compósitos está em franca expansão em diversos setores industriais devido à crescente demanda pelo emprego de estruturas de alto desempenho e baixo peso.

Convencionalmente, materiais como aço, alumínio e madeira foram utilizados para a construção de embarcações, porém quando expostos ao ambiente marinho os problemas envolvendo esses materiais, poderiam ser superados pela substituição deles por materiais compósitos. Por exemplo, o peso sempre foi um fator primordial de atenção ao projetar estruturas marítimas utilizando aço. O peso estrutural mais leve dos navios de superfície e submarinos podem aumentar a capacidade de carga útil, enquanto o peso reduzido da parte superior das plataformas offshore podem reduzir a necessidade de peso para as estruturas de apoio. Os conveses fabricados de materiais compósitos podem gerar uma economia de peso de 25% em relação ao aço, traduzindo assim uma redução de 4,5% no consumo de combustível. Enquanto os materiais metálicos continuam a ser a escolha predominante em embarcações navais, os materiais compósitos estão cada vez mais proeminentes com os avanços em sua capacidade de fabricação, permitindo a aplicação tanto como materiais funcionais quanto estruturais.¹

Os materiais compostos de fibra de vidro (Compósito) & PEAD (monolítico) são amplamente utilizados em componentes estruturais leves resultado de seu comportamento versátil de reforços e matrizes poliméricas, além disso, esses materiais estão se tornando cada vez mais atraentes principalmente devido aos seus baixos módulos, economia de peso, menor custo de instalação, propriedades como alta resistência específica, boa resistência e excelente resistência à corrosão são os requisitos essenciais.

O polietileno de alta densidade (PEAD) é o plástico mais amplamente utilizado na produção de tubos para aplicações em tubulações de gás. As estatísticas mostram que mais de 90% dos sistemas de gasoduto instalados recentemente são feitos deste material, sendo a durabilidade uma das características mais importantes, levando a se tornar o tipo de polietileno mais utilizado na indústria de gasodutos urbanos.²

Um novo conceito de design modular para vasos de pressão foi desenvolvido que visa uma compensação das desvantagens. A configuração modular permite um acesso ao interior que pode ser usado para aumentar o campo de aplicação para vasos de pressão compostos. O design além disso fornece uma superfície funcional plana para simplificar a conexão com o ambiente estruturas e o uso de uma matriz termoplástica leva a um reciclabilidade do sistema de armazenamento.³

As propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibra dependem principalmente de carregamento de fibra, arquitetura de fibra e direção da carga aplicada. A arquitetura da fibra desempenha um papel importante na investigação das propriedades mecânicas de compósitos reforçados. Portanto, o estudo do efeito da fibra torna-se essencial para determinar as propriedades mecânicas dos compósitos e suas aplicabilidades.⁴

Neste trabalho, iremos focar nos compósitos de FV e no PEAD que são amplamente utilizados em muitos campos de engenharia (offshore, indústria de petróleo e gás, indústrias navais, aeronáutica etc.) e aplicações específicas personalizadas (carros, iates, etc.). Eles trazem alta rigidez e resistência específica, devido às vantagens de serem resistentes à corrosão e possuírem flexibilidade estrutural. O rápido crescimento dos materiais compósitos expande sua presença em quase todas as aplicações de engenharia, isso se deve à sua vantagem exclusiva de ser mais leve com maior resistência específica.

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

O trabalho aqui apresentado foi desenvolvido através de uma metodologia de pesquisa aplicada cujo objetivo é gerar conhecimentos para aplicações práticas quanto as análises realizadas com os materiais compósitos oriundo das CAPV'S que apresentaram falhas durante o incidente ocorrido a bordo de uma plataforma de perfuração.

Quanto a sua abordagem, podemos classificar o trabalho como de forma quantitativa, pois visa traduzir em números, opiniões e informações de forma que possamos analisar esses materiais compósitos utilizados na fabricação das CAPV'S assim como as falhas encontradas.

O trabalho quantitativo possuiu como diferencial a intenção de garantir a precisão dos trabalhos realizados, conduzindo a um resultado com poucas chances de distorções.

Este método caracteriza-se pelo emprego da quantificação, tanto nas modalidades de coleta de informações, quanto no tratamento dessas através de técnicas estatísticas, desde as mais simples até as mais complexas.

2.1 ESCOPO DA PESQUISA

A investigação conduzida neste estudo abordou os aspectos referentes á elaboração de uma avaliação de perigos efetivamente realizada em uma grande unidade de perfuração offshore. O caso ocorreu em uma plataforma de exploração de petróleo com cerca de 10 anos de operação, onde a instalação já tinha sido alvo de uma série de melhorias tanto relativas á necessidade operacional como também as políticas de segurança, saúde e meio ambiente.

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral do trabalho consistiu na avaliação das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais compósitos utilizados no vaso de pressão do incidente ocorrido.

2.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No planejamento deste estudo, o primeiro passo a ser dado é no sentido de identificar as variáveis específicas que possam ser importantes, para assim poder explicar as complexas características de um problema.⁵

Conforme supramencionado, ele possui como diferencial a intenção de garantir a precisão dos trabalhos realizados, conduzindo a um resultando com poucas chances de distorções.

A dissertação está organizada em 5 Capítulos, incluindo estes iniciais de introdução, objetivos, metodologia do trabalho e esta breve explicação sobre a organização da dissertação.

No **Capítulo 3** descreve o passo a passo de como tudo aconteceu, desde o erro operacional ao comunicar a CAPV que estava vazia ao sistema que estava pressurizado com 2000 PSI onde ocorreu o incidente. Também neste capítulo é onde ocorre uma abrangência

nas demais CAPV'S, será demonstrado fotos de outros tipos de falhas encontradas nas CAPV'S com alto potencial de incidentes.

No **item 3.2**, far-se-á uma breve discussão do cálculo das propriedades termodinâmicas de um vaso de pressão, apresentando seus resultados e como estes serão aplicados dentro do procedimento a ser descrito. Apresentar-se-ão aqui fundamentos relacionados ao cálculo termodinâmico e a forma de controlar a sequência de enchimento quando se usam reservatórios com ar pressurizado de material compósito PEAD. Neste capítulo, não haverá o detalhamento da implementação desta rotina visto que sua descrição foi feita em trabalhos prévios e podem ser consultados na bibliografia correspondente.

Nos **itens 3.3 e 3.4**, serão levantadas possíveis propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros e considerações que aqui não estão apresentadas, mas que podem ser inseridas de acordo com a necessidade de implementação, levando em conta alguns conceitos que serão apresentados neste capítulo.

No **item 3.5**, irá mostrar uma análise do incidente realizada nas CAPV'S e irá explicar como ocorreu o incidente, de acordo com os dados levantados durante a investigação e os resultados obtidos através dos cálculos termodinâmicos.

No **item 3.6** haverá uma breve descrição do método de pressurização / despressurização correta do sistema conforme informações do fabricante, será feita referência aos diferentes procedimentos operacionais para as preparações do sistema antes do enchimento.

No **Capítulo 4**, todos os conceitos apresentados nos capítulos anteriores serão aplicados de maneira prática no modelo de otimização construído, fazendo-se uma análise mais detalhada dos resultados encontrados, aplicação das restrições e função objetivo.

No **Capítulo 5** será feita uma conclusão final dos resultados do trabalho, dificuldades encontradas e as últimas considerações a respeito desta dissertação.

Por fim, no **Capítulo 6**, estão todas as referências consultadas para desenvolvimento deste estudo e que podem ser utilizadas como base para aprofundamento do conhecimento

explanado em cada capítulo, além de poder servir como ponto de partida para o desenvolvimento de trabalhos posteriores a este.

3 EVENTO

O incidente ocorreu no CAPV 32, quando o operador abriu a válvula de esfera do VP-32 (a garrafa estava vazia), houve uma pressão residual no sistema que foi equalizada em torno de 1000PSI. Depois disso, o operador se ausentou do local e de repente ocorreu uma explosão.

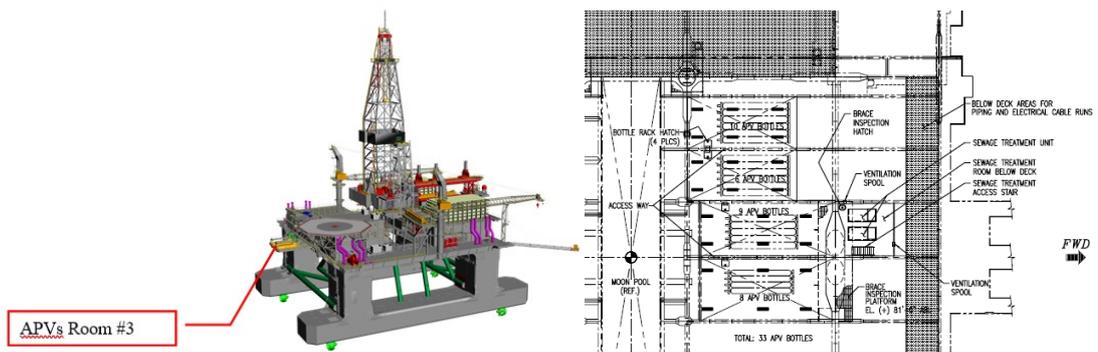


Figura 1: Localização da sala de APV #3

Os vasos de pressão destacados estão assim identificados, e mostra em destaque o vaso acidentado:

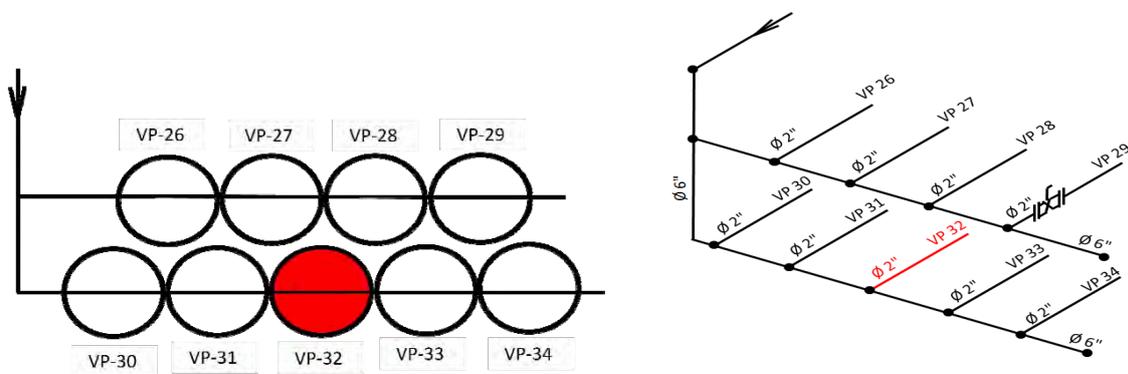


Figura 2: Layout das linhas de alta pressão

No momento do acontecido os VPs 26 a 30 estavam carregados com 2000PSI. O VP 31 não foi carregado, os VPs 33 e 34 estavam despressurizados, e em carregamento o VP 32.

De acordo com as Instruções de Operação para encher as APV's, as válvulas de esfera nunca devem ser abertas se houver um diferencial de pressão superior a 20 bar para três ou menos garrafas e 30 bar para quatro ou mais garrafas. O operador abriu a válvula e havia um diferencial de pressão de cerca de 70 bar que gerou calor devido a rápida elevação de pressão e junto com os hidrocarbonetos, causou a ignição.

3.1 INSPEÇÕES APÓS O INCIDENTE

Após o incidente com a CAPV 32, foi realizado uma inspeção nas demais CAPV's do sistema, ocorreram inspeções internas e externas, porém iremos mencionar apenas os vasos que apresentaram danos nos materiais compósitos que de fato interessam ao objetivo geral do trabalho:

CAVP-26

Existia uma seção da superfície externa coberta de fuligem que estava bem queimada, isso indica que a superfície foi submetida a uma alta temperatura. Houve uma delaminação na camada externa do aro do CAPV, o entendimento foi que uma banda se levantou da superfície e as fibras foram danificadas. Supõe-se que não esteja relacionado ao incidente.



Figura 3: Delaminação externa VP-26

CAVP-28

A superfície externa possui uma área na extremidade da saída que foi submetida a alta temperatura. A tinta nessa área está com bolhas, confirmando a informação de que um líquido ou vapor quente foi pulverizado no compartimento. Uma estreita faixa de bolhas se estende ao longo da superfície. A inspeção interna revelou uma trinca no revestimento próximo à abertura na extremidade do dreno.



Figura 4: Lado externo com sintomas de queima VP-28 e fissura interna VP-28

CAVP-29

Toda a superfície exposta da CAPV estava coberta por bolhas na tinta como resultado de incêndio / alta temperatura. Não houve descoloração permanente do epóxi por baixo, mas a tinta estava queimada em grande parte da superfície. A condição da superfície externa suporta a informação de que um líquido / vapor quente foi pulverizado pela sala.

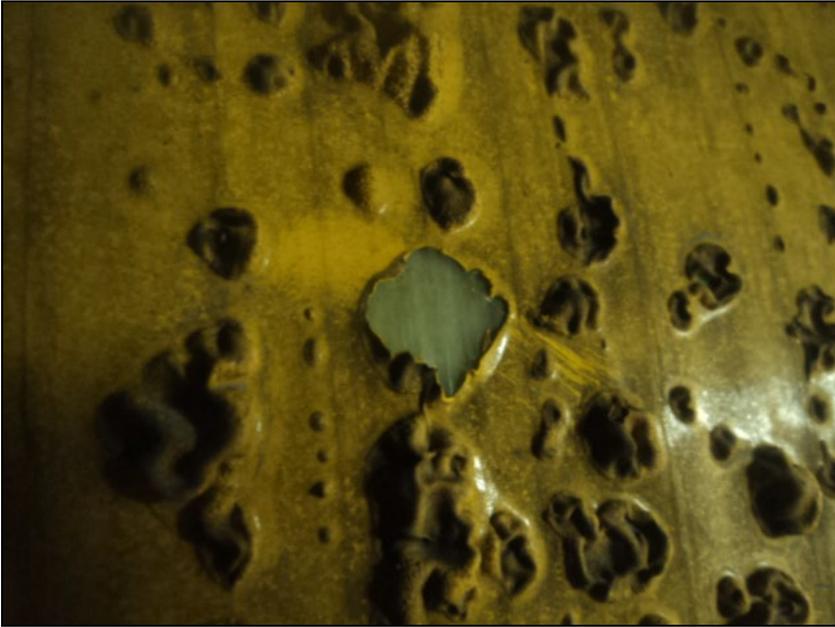


Figura 5: Detalhe da superfície externa do CAPV 29, onde se observa “empolamento” da pintura

CAVP-30

A garrafa possui uma área de fuligem / descoloração na tinta perto da extremidade da saída. A inspeção interna na extremidade do dreno revelou uma fissura no material do revestimento próximo à abertura da saliência final.



Figura 6: Área externa com fuligem e fissura interna do CAPV-30

CAVP-31

A parte externa do vaso é coberta pelos vasos ao redor, este vaso foi protegido do calor ao qual os vasos externos foram submetidos, visualmente nenhum dano foi encontrado. A inspeção interna revelou três fissuras no material do revestimento.



Figura 7: Fissuras internas VP-31

CAVP-32

O incidente ocorreu no CAPV 32, quando o operador abriu a válvula de esfera do VP-32 (a garrafa estava vazia), houve uma pressão residual no sistema que foi equalizada em torno de 1000 psi. Depois disso, o operador se ausentou do local e de repente ocorreu uma explosão.





Figura 8: Detalhe da CAPV que ocorreu o incidente



Figura 9: Tubo do manifold de 6" evidência de queima no interno e de fusão onde houve incidência de calor vindo da CAPV

3.2 INVESTIGAÇÃO

Na investigação inicial foi indicado que está temperatura baixa pode resultar em uma contração interna do revestimento de polietileno da CAPV. Este revestimento é mantido no seu posicionamento através de uma conexão mecânica entre o revestimento interno e o revestimento externo. Como consequência, o resultado da tensão pode causar trincas no revestimento interno de sustentação de pressão, resultando em vazamento.

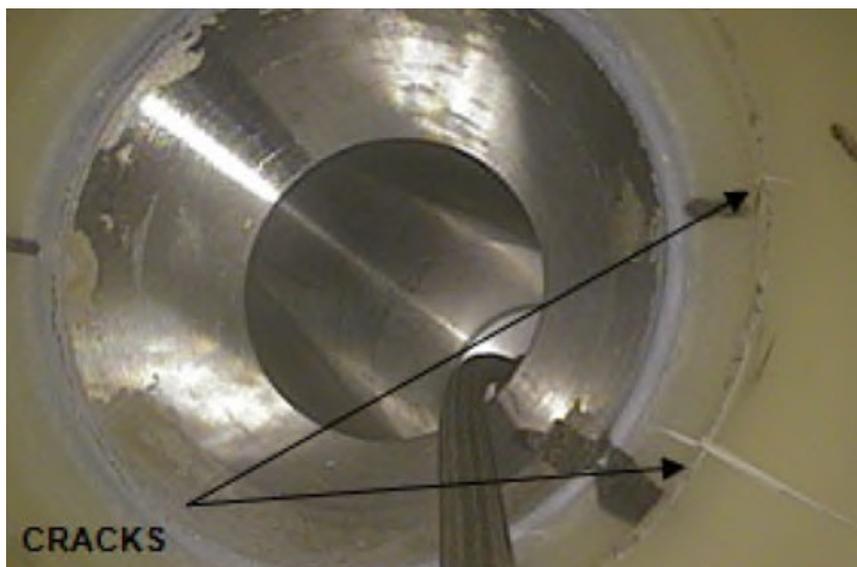


Figura 10: Trinca no revestimento interno

Em caso de trinca, a integridade do componente pode ser assegurada pela aplicação de procedimentos de integridade estrutural, como os descritos na Seção XI da norma ASME.⁶

Para manter a funcionalidade das CAPVs durante a operação, deve-se tomar cuidado para garantir que as operações de esvaziamento não resultem em temperaturas fora das limitações dos vasos de pressão, devido a relação $PV=nRT$ é necessário controlar a sequência de enchimento quando se usam reservatórios com ar pressurizado de material compósito PEAD. O aumento de temperatura devido á pressurização adiabática é:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}$$

T1 = Temperatura final absoluta

T2 = Temperatura inicial absoluta

P1 = Pressão final absoluta

P2 = Pressão inicial absoluta

γ = Constante do gás

O gradiente de temperatura vai ser elevado durante o início do enchimento 0 – 20 bar e vai ser menos crítico quando a pressão é mais elevada.

- Consideramos uma temperatura ambiente de 38°C (temperatura trópica)
- Consideramos uma temperatura máxima de 80°C
- O tempo de arrefecimento é escolhido com base em resultados experimentais.

Tabela 1: Esquema de enchimento

INTERVALO DE PRESSÃO (BAR)	TEMPO DE ARREFECIMENTO	TEMPO TOTAL
0 - 20	15 min	15
20 - 40	15 min	30
40 - 60	15 min	45
60 - 80	15 min	60
80 - 110	5 min	65
110 - 150	5 min	70

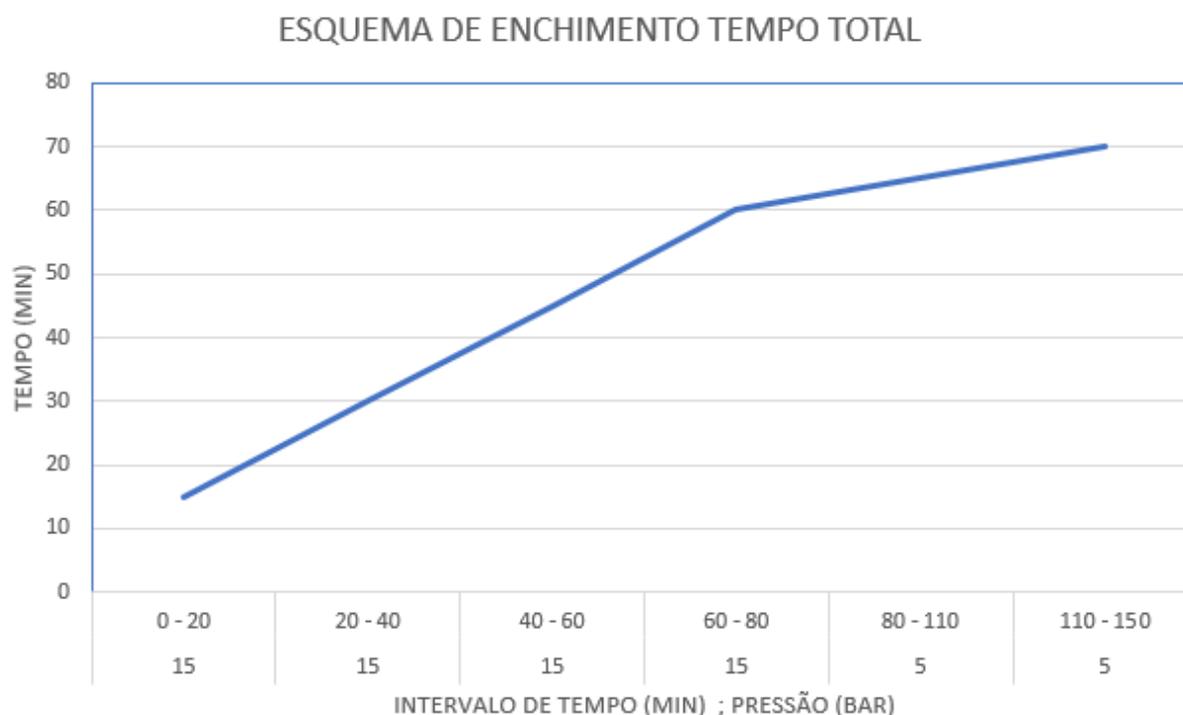


Figura 11: Curva de enchimento das CAPV's

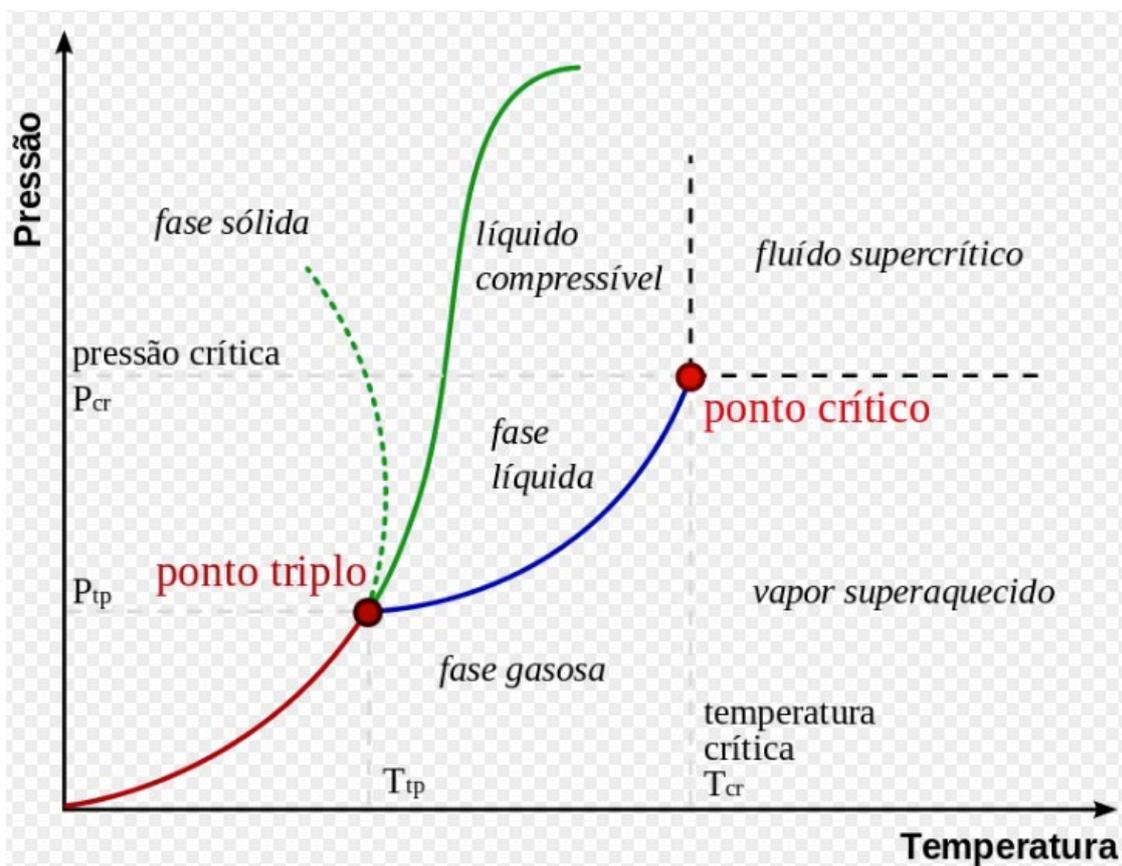


Figura 12: Comportamento da curva de aquecimento

Constante K da tabela abaixo, para o ar, de 1,3 a 1,4 (usado na simulação 1.36695) – $K = c_p / c_v$ (calos específico a pressão constante dividida por calor específico em volume constante) – na fórmula do fabricante, representada pela gama.

Tabela 2: Ar constante (K)

Temp. K	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	Temp. K
	Air			Nitrogen, N ₂			Oxygen, O ₂			
250	1.003	0.716	1.401	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398	250
300	1.005	0.718	1.400	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395	300
350	1.008	0.721	1.398	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389	350
400	1.013	0.726	1.395	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382	400
450	1.020	0.733	1.391	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373	450
500	1.029	0.742	1.387	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365	500
550	1.040	0.753	1.381	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358	550
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350	600
650	1.063	0.776	1.370	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343	650
700	1.075	0.788	1.364	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337	700
750	1.087	0.800	1.359	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332	750
800	1.099	0.812	1.354	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327	800
900	1.121	0.834	1.344	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319	900
1000	1.142	0.855	1.336	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313	1000

Tabela 3: Propriedades do ar a baixa pressão considerando gás ideal

T(K), h and u(kJ/kg), s° (kJ/kg · K)											
T	h	u	s°	when $\Delta s = 0^{\circ}$		T	h	u	s°	when $\Delta s = 0$	
				p _r	v _r					p _r	v _r
200	199.97	142.56	1.29559	0.3363	1707.	450	451.80	322.62	2.11161	5.775	223.6
210	209.97	149.69	1.34444	0.3987	1512.	460	462.02	329.97	2.13407	6.245	211.4
220	219.97	156.82	1.39105	0.4690	1346.	470	472.24	337.32	2.15604	6.742	200.1
230	230.02	164.00	1.43557	0.5477	1205.	480	482.49	344.70	2.17760	7.268	189.5
240	240.02	171.13	1.47824	0.6355	1084.	490	492.74	352.08	2.19876	7.824	179.7
250	250.05	178.28	1.51917	0.7329	979.	500	503.02	359.49	2.21952	8.411	170.6
260	260.09	185.45	1.55848	0.8405	887.8	510	513.32	366.92	2.23993	9.031	162.1
270	270.11	192.60	1.59634	0.9590	808.0	520	523.63	374.36	2.25997	9.684	154.1
280	280.13	199.75	1.63279	1.0889	738.0	530	533.98	381.84	2.27967	10.37	146.7
285	285.14	203.33	1.65055	1.1584	706.1	540	544.35	389.34	2.29906	11.10	139.7
290	290.16	206.91	1.66802	1.2311	676.1	550	554.74	396.86	2.31809	11.86	133.1
295	295.17	210.49	1.68515	1.3068	647.9	560	565.17	404.42	2.33685	12.66	127.0
300	300.19	214.07	1.70203	1.3860	621.2	570	575.59	411.97	2.35531	13.50	121.2
305	305.22	217.67	1.71865	1.4686	596.0	580	586.04	419.55	2.37348	14.38	115.7
310	310.24	221.25	1.73498	1.5546	572.3	590	596.52	427.15	2.39140	15.31	110.6
315	315.27	224.85	1.75106	1.6442	549.8	600	607.02	434.78	2.40902	16.28	105.8
320	320.29	228.42	1.76690	1.7375	528.6	610	617.53	442.42	2.42644	17.30	101.2
325	325.31	232.02	1.78249	1.8345	508.4	620	628.07	450.09	2.44356	18.36	96.92
330	330.34	235.61	1.79783	1.9352	489.4	630	638.63	457.78	2.46048	19.84	92.84
340	340.42	242.82	1.82790	2.149	454.1	640	649.22	465.50	2.47716	20.64	88.99
350	350.49	250.02	1.85708	2.379	422.2	650	659.84	473.25	2.49364	21.86	85.34
360	360.58	257.24	1.88543	2.626	393.4	660	670.47	481.01	2.50985	23.13	81.89
370	370.67	264.46	1.91313	2.892	367.2	670	681.14	488.81	2.52589	24.46	78.61
380	380.77	271.69	1.94001	3.176	343.4	680	691.82	496.62	2.54175	25.85	75.50
390	390.88	278.93	1.96633	3.481	321.5	690	702.52	504.45	2.55731	27.29	72.56

Os vasos do tipo CAPV são feitos de material compósito de FV com reforço de epóxi. A resina epóxi usada, de acordo com o fabricante, pode operar até uma temperatura em torno de 55 ° C.

Assim, estudos dos aspectos termodinâmicos da deformação do PEAD, revelou que a mudança na energia interna é devido às contribuições de vários processos: Transição lamelas-fibrilas (formação de um “peçoço”) e a formação de fibrilas.⁷

Tabela 4: Dados do material compósito das CAPV's.

CODIGO DO PROJETO	DNV-OS-C501
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	EPOXE E FIBRA DE VIDRO
	POLIETILENO
	AÇO INOX 316
TEMPERATURA DO PROJETO	TEMPERATURA DNV CLASSE B, +5 °C A +55 °C
INSTRUMENTO DE SEGURANÇA	VALVULA DE SEGURANÇA (230 BAR)
AMBIENTE	OFFSHORE
CARGAS AMBIENTAIS	ONDULAÇÃO E FORÇAS DO VENTO
CAPACIDADE	2000 L
PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO	207 BAR
PRESSÃO DE TESTE	310 BAR
DIMENSÕES (L x W x H)	7164mm x 710mm x 710mm
PESO MÉDIO	2080 Kg
ALONGAMENTO MÁXIMO	40mm

3.3 FALHA DE CONSTRUÇÃO DAS CAPV'S

Uma estrutura está sujeita a ocorrência de falhas decorrentes de tensões provenientes de impactos, defeitos na fabricação, propagação de pequenas trincas, além de outros carregamentos que podem levar um dado material a ser impedido de desempenhar sua função.⁸

A simplicidade dos procedimentos de fabricação de estruturas complicadas do ponto de vista geométrica também tornou os compósitos um candidato competitivo para o amplo espectro de aplicações que vão desde as indústrias de alta tecnologia aos segmentos de baixa tecnologia. Sujeitos a carregamentos cíclicos, os materiais compósitos têm uma vida útil consideravelmente maior durante suas aplicações em comparação com outros materiais convencionais.^{9,10,11}

Para encontrar as melhores soluções a fim de mitigar as falhas é importante classificá-las. Elas foram classificadas como: a falha como aleatória, sistemática e de causa comum. Sendo, aleatória aquela que não segue um padrão, mas que ocorre aleatoriamente no tempo, sistemática a que ocorre devido a erro humano ou por condição complexa imprevisível e

causa comum refere-se a falha de mais de um componente, dispositivo ou sistema devido a mesma causa.¹²

Foi desenvolvido um algoritmo para prever e detectar falhas no conjunto que faz a movimentação das ferrovias permitindo a troca de máquinas. Sensores foram distribuídos ao longo de *5km* para monitorar sete pontos que ocorrem a troca dos trilhos. O algoritmo foi construído comparando os sinais esperados estimados por meio do histórico de registros com os sinais medidos. O experimento mostrou que a proposta foi eficiente na prevenção e detecção de falhas.¹³

Cumulated Fatigue Damage Modeling (CFDM) que é originalmente desenvolvido por Shokrieh e Zakeri,^[14] é a versão simplificada da “Técnica de Degradação de Propriedade de Material Generalizada” desenvolvida por Shokrieh e Lessard.^{15,16}

Classificado de acordo com as técnicas de modelagem de dano progressivo, o CFDM é capaz de prever a vida de uma estrutura composta, estimando o status do dano em qualquer nível de tensão e número de ciclos desde o início do carregamento até a falha final. A capacidade do CFDM de prever o tempo de vida à fadiga de estruturas compostas em escala real foi investigada anteriormente.¹⁷

Dois conjuntos de regras de degradação de material são usados como regras de degradação gradual e repentina. O primeiro é levado em consideração enquanto nenhuma falha é percebida e o último é eficaz quando ocorre falha. Deve-se ressaltar que, na técnica de modelagem progressiva de danos empregada, cada camada trincada é simplesmente substituída por uma camada intacta com propriedades mecânicas reduzidas. Embora seja possível usar técnicas numéricas avançadas para prever o início e a propagação de trincas, nesta abordagem a influência da trinca induzida devido ao carregamento de fadiga é levada em consideração, reduzindo as propriedades mecânicas como uma abordagem alternativa. Categorizadas sob a mecânica do dano contínuo, algumas técnicas numéricas avançadas podem ser encontradas na literatura, concentrando-se na previsão do início e propagação de trincas.^{18,19}

Um teste de fadiga em escala real é necessário para o procedimento de certificação de quase todas as estruturas de suporte de carga, como asas de avião, lâminas de turbina ou tubos que aprovam o procedimento de projeto. Devido ao fato de que a configuração experimental

necessária para experimentos em escala real é um processo caro, a modelagem teórica da falha por fadiga nos estágios de projeto desempenha um papel importante no desenvolvimento de novos produtos.

É importante explorar mais conhecimentos sobre o projeto e o desempenho dos materiais compósitos de FV & PEAD para obter propriedades aprimoradas. A engenharia simultânea de material, design e fabricação precisam ser bem tratada para alcançar melhor qualidade.²⁰ Assim, um melhor conhecimento dos processos de fabricação e de sua tecnologia de ponta são de grande e primordial importância. Geralmente, CAPV (*composite air pressure vessel*) que basicamente é fabricado com PEAD + FV, foram produzidos usando métodos de produção distintos, denominado moldagem por injeção. Do ponto de vista da engenharia, os compósitos sofrem tensões de compressão (cargas de compressão ou flexão). No caso de CAPV, as cargas de flexão induzirão tensão em um lado e compressão no outro. Com base na observação de que as resistências à compressão são geralmente menores do que as de tensão,²¹ a falha por compressão deve ser considerada com cuidado. Portanto, uma estimativa adequada da resistência à compressão permitirá um projeto eficiente de estruturas.

Esta característica chave dos compósitos requer a compreensão de seu comportamento contra o fenômeno de fadiga para que esta perspectiva possa ser explorada tanto quanto possível.

Foi observado a falha que numa diminuição rápida de pressão nas CAPVs, resultará em temperaturas muito baixas. Na investigação inicial foi indicado que esta temperatura baixa pode resultar em uma contração interna do revestimento de polietileno. Este revestimento é mantido no seu posicionamento através de uma conexão mecânica entre o revestimento interno e o revestimento externo. Como consequência, o resultado da tensão pode causar trincas no revestimento interno de sustentação de pressão, resultando em vazamento.

A solução para esta falha é a despressurização controlada impedirá que ocorra o aumento de gás com temperaturas muito baixas dentro da CAPV, reduzindo a exposição térmica do revestimento. Os procedimentos reforçados devem ser aplicados durante a despressurização das CAPV's.

Os padrões de falha observados foram:

A – Trincas na área de solda

B – Trincas na cúpula tangentes ao flange

C – Trincas na área do pescoço radiais ao flange.

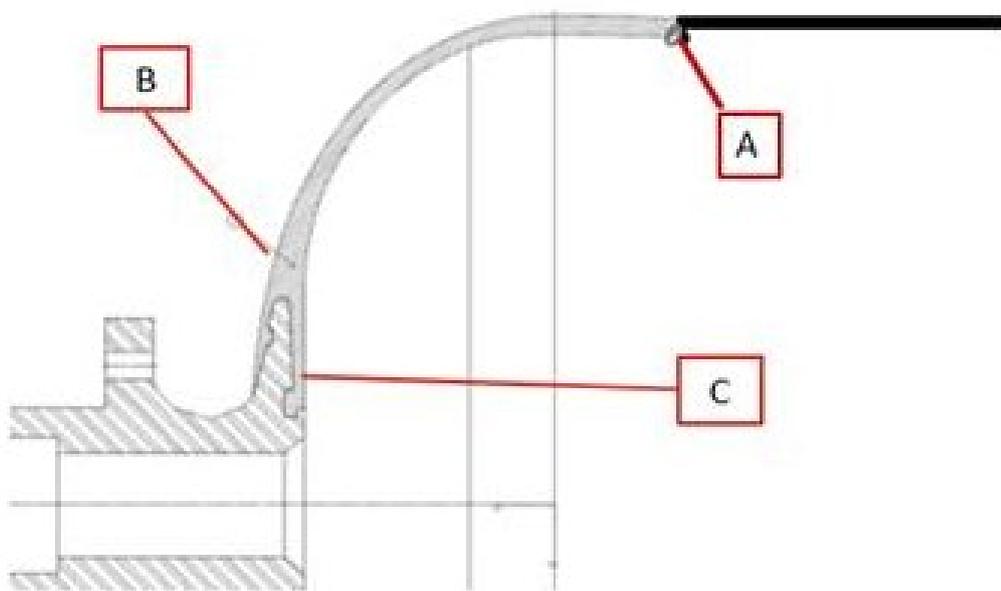


Figura 13: Falhas na construção do vaso

TRINCA NA ÁREA DE SOLDA

O revestimento da cúpula (RM) e da seção do tubo se diferenciam em materiais e espessuras. Isto induz um possível erro de desalinhamento. Este erro pode gerar um entalhe no material e eventualmente um vazamento em forma de trinca na área da soldagem. Outra forma de danificar a área da soldagem acontece através da sucção durante um esvaziamento rápido, causando um dano local que eventualmente levaria a uma trinca.



Figura 14: Trincas na área de solda

Trincas superficiais são normalmente caracterizadas como sendo de forma semi-elíptica, desta forma cálculos de crescimento de fissura são então realizados em ambos os pontos mais profundos e superficiais de uma determinada trinca, para estes cálculos, o fator de intensidade de estresse (*Stress Intensity Factor*) tem uma importância fundamental.²²

TRINCA NA CÚPULA TANGENTE AO FLANGE

Este tipo de dano é tipicamente visto como uma trinca tangencial para a entrada do flange. A trinca pode se estender desde poucos centímetros até 360° ao redor do mesmo. As trincas podem aparecer tanto dentro como fora da circunferência da entrada do flange. A causa deste dano está relacionada ao esvaziamento rápido das CAPVs, levando ao estado frágil do revestimento da cúpula (RM).



Figura 15: Trinca na Cúpula Tangente ao Flange

O comportamento do impacto dependente da temperatura de PEAD rotacionalmente moldado e a relação entre o desempenho de impacto e as estruturas são investigadas.²³

TRINCA NO PESCOÇO RADIAL AO FLANGE

Este dano aparece no revestimento do material da cúpula (RM). O local deste tipo de dano está na área do pescoço onde a saliência do flange se encontra com a cúpula. O dano aparece como trincas radiais iniciando próximo à base da saliência para a cúpula. Um vazamento iniciará uma vez que a trinca aprofundar o suficiente para entrar em contato com o flange. A causa deste dano está relacionada ao esvaziamento rápido da CAPV, levando o revestimento da cúpula se tornar frágil.



Figura 16: Trinca No pescoço radial ao Flange

3.4 MELHORIAS DE CONSTRUÇÃO DAS CAPV'S

As seguintes alterações foram implementadas nas CAPV's:

PROJETO ANTES DO INCIDENTE

- Revestimento da cúpula fabricada através de processo de moldagem rotacional- RM;
- Revestimento em PEAD extrusado (material preto) soldado na moldura da cúpula RM (material branco) em ambas as extremidades;

Cross section of CAPV Inner Liner – Outdated Design

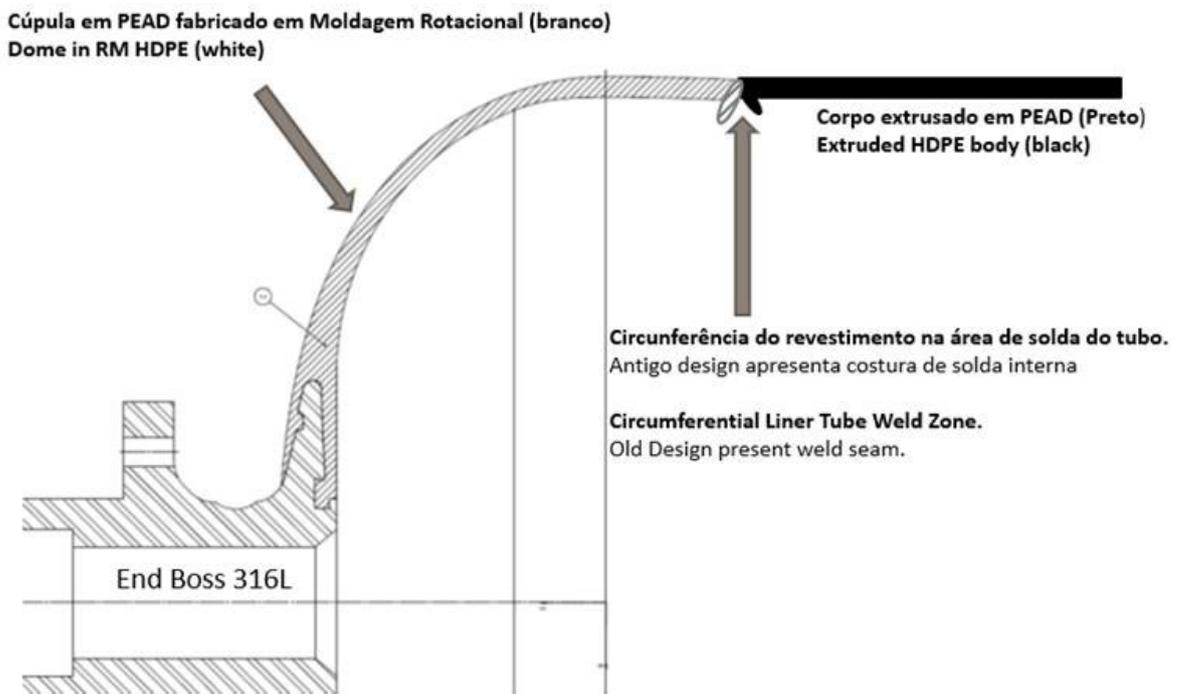


Figura 17: Projeto antes do incidente

PROJETO PÓS INCIDENTE

- Revestimento da cúpula fabricado através de processo de moldagem por injeção (IM);
- Ausência do cordão de solda no revestimento interno PEAD;
- Aperfeiçoamento na resistência a trinca e ductilidade nas baixas temperaturas;
- Aperfeiçoamento na performance em temperaturas baixas e altas.

Cross section of CAPV Inner Liner – Updated Design

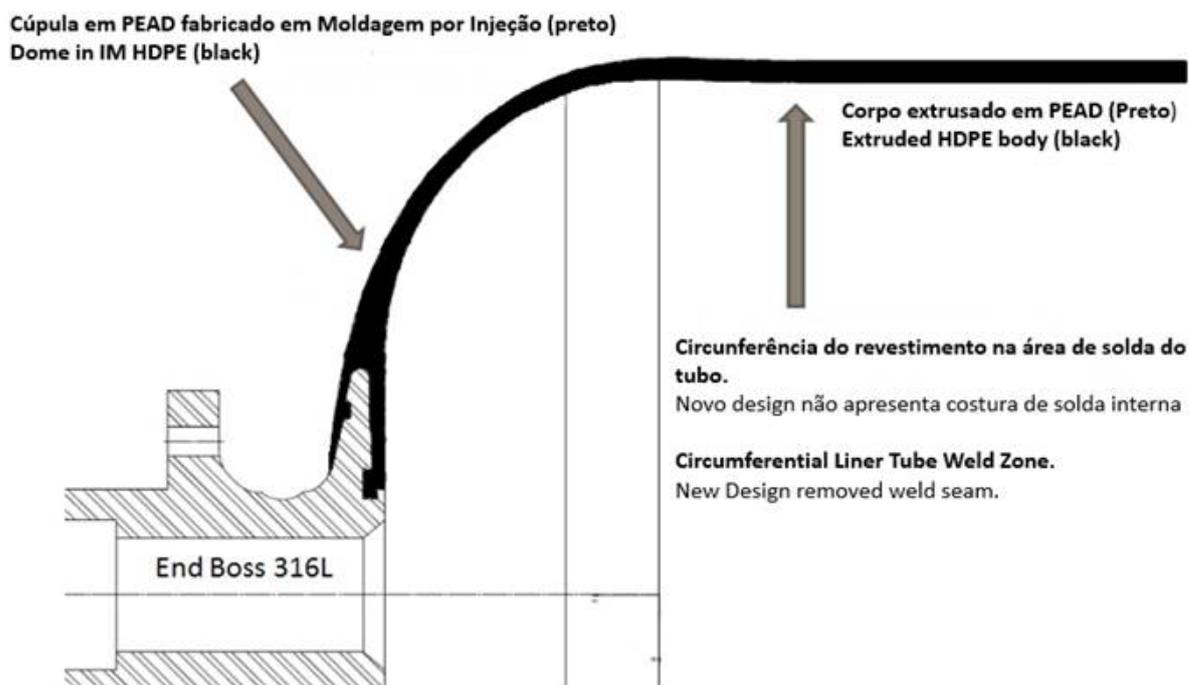


Figura 18: Projeto pós incidente

3.5. ANÁLISE DO INCIDENTE

Um estudo foi realizado a fim de desenvolver um modelo analítico capaz de prever a resistência térmica no contato entre dois materiais. A abordagem proposta foi baseada no fluxo de calor em regime transiente passando por dois corpos cilíndricos, onde a extremidade de um cilindro foi aquecida, enquanto a extremidade do outro foi resfriada. Em cada um dos corpos havia três pontos para medição de temperatura e os dados eram enviados diretamente para um programa de computador. A equação usada para obter a resistência térmica no contato depende das temperaturas na superfície de contato, as quais foram obtidas por meio do método dos mínimos quadrados. Os autores concluíram que o método obteve sucesso para estimar a dependência da resistência térmica com a pressão e com a rugosidade da superfície, além de afirmarem que a resistência térmica no contato diminui com a pressão e aumenta com a rugosidade.²⁴

Um experimento visando verificar o comportamento da TCC mediante a variação da temperatura, rugosidade e pressão na interface. Os resultados obtidos apontaram que o efeito da temperatura varia em superfícies com diferentes rugosidades, sendo que com o aumento da

temperatura a TCC aumenta com maior intensidade em superfície com alta rugosidade. Além disso, a TCC possui uma forte relação com a pressão e a temperatura da interface. Este trabalho também reafirma que a resistência térmica é maior em superfícies com maior rugosidade.^{25,26}

Tang e Zhang (2016) estudaram o comportamento da condutância térmica de contato entre dois metais sob alta temperatura (600° C) e com um range de pressão de 60 – 180MPa. O experimento foi realizado visando a análise em uma dimensão e considerando um problema em regime permanente. Observaram que a TCC apresentou crescimento linear com a pressão aplicada.²⁷

Tubulações de calor são dispositivos passivos comprovados que são usados atualmente para resolver um grande número de problemas de gerenciamento térmico. Essa tecnologia tem sido aplicada com sucesso em uma variedade de aplicações térmicas, como trocadores de calor, aplicações de satélite, resfriamento eletrônico e economizadores. O tubo de calor típico funciona segundo um princípio simples de fenômeno de mudança de fase, ou seja, condensação e evaporação de fluido de trabalho ocorrendo em um sistema fechado. O calor é transferido do evaporador para o condensador utilizando o calor latente do fluido de trabalho.

De acordo com a tabela 2, a temperatura que o ar atingiu dentro do CAPV # 32 era de aproximadamente 680,66 ° C, temperatura suficiente para produzir vapores combustíveis em resinas epóxi.

A atividade de permitir que o ar comprimido de 2000 psi (manométrico) expanda e comprima livremente o ar dos CAPVs de 0 a 1000 psi levou a um processo de aquecimento extremamente rápido, permitindo que a resina epóxi emitisse vapores combustíveis.

Na CAPV do incidente, onde o operador fechou a válvula após atingir a pressão de equilíbrio (cerca de 1000 psi), enquanto fechava a válvula de isolamento, ele também interrompeu o processo de aquecimento e os vapores se condensaram.

Certamente, a concentração de vapores não atingiu o limite abaixo da explosividade, como se tivesse ocorrido, haveria explosão na primeira operação dentro do primeiro CAPV envolvido.

Ao deixar a válvula de isolamento da CAPV # 32 aberta, houve tempo suficiente para formar vapores combustíveis a partir da resina epóxi, que é a matriz de FV em questão.

Com a formação de vapores combustíveis em alta temperatura (tendendo a $680,66^{\circ}\text{C}$), a pressão que estava em equilíbrio dentro do CAPV de 1000 psi apenas com ar, passou a ser superior a 1000 psi contendo a mistura de ar e vapores combustíveis.

O fato de não ter havido uma explosão dentro do CAPV mostra que a velocidade de formação de vapores combustíveis era extremamente alta e que a rica mistura em alta temperatura do ar com os vapores tendia a migrar para o coletor, afinando a mistura até que o mesmo atingisse maior explosividade limite, já dentro do trecho de 2”.

A explosão ocorrida dentro do limite mais alto de explosividade é de maior energia do que a combinação ar-combustível pode provocar, gerando os extensos danos encontrados.

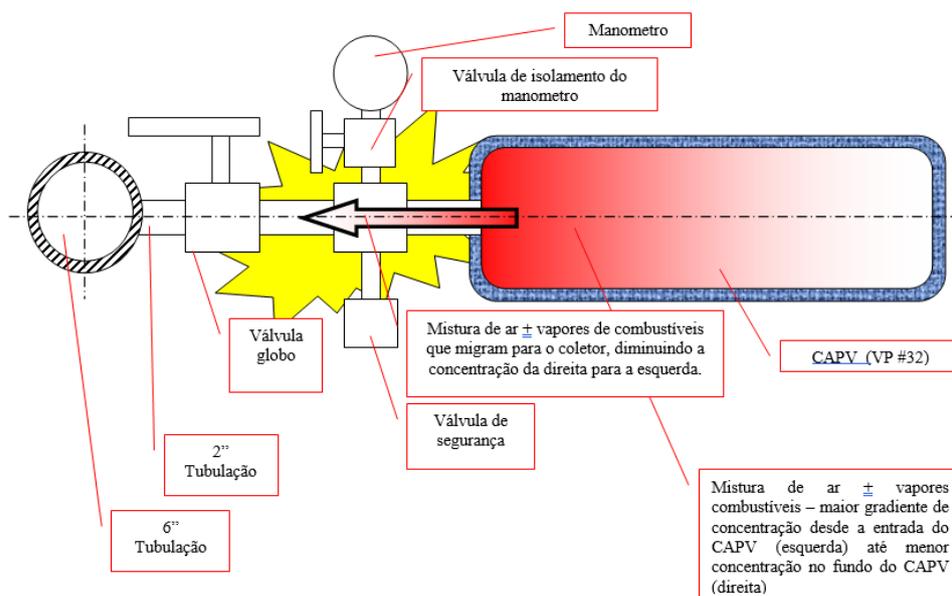


Figura 19: Formação de vapores combustíveis e migração de mistura explosiva para o coletor.

A análise mostra uma alta probabilidade de explosão antes da válvula de segurança, próxima ao VP #32, obrigando a válvula de segurança, destruindo o manômetro e mantendo a combustão resultante da mistura de vapores combustíveis com o ar externo, incluindo perfuração a quente do tubo de 6”, em frente à interseção com a tubulação de 2” proveniente do CAPV.

A comparação entre resultados experimentais que foram obtidos com base na atualização de diferentes camadas de perfis de mandril foi concluído. Com a ajuda do sistema tridimensional Critérios de Hashin, o modelo de dano progressivo foi estabelecido a fim de prever a pressão de ruptura que foi usada para calcular os fatores de desempenho.²⁸

3.6 RECOMENDAÇÃO DE PRESSURIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE APV'S

Com base no incidente ocorrido em um vaso de pressão de ar, é importante salientar que o rápido aumento da pressão nos sistemas de ar pressurizado pode resultar em altas temperaturas devido à compressão adiabática.

O ar de alta pressão contém muita energia e muito calor pode ser gerado quando as CAPV's de baixa pressão são preenchidas com sistemas pressurizados mais elevados. Esse enchimento envolve aumento de temperatura, choques de pressão e tensão mecânica em vedações, válvulas, tubos, conexões e CAPVs. O aumento da temperatura também envolve um risco de ignição. Esse risco existe quando os hidrocarbonetos são expostos a alta pressão (o efeito diesel). O sistema de ar não foi projetado para suportar esse tipo de incêndio interno, que pode se espalhar para o exterior e causar danos e fatalidades.

O aumento máximo de temperatura é observado no início do enchimento, quando a pressão nos CAPVs de trabalho é inferior a 30 barg. A geração de calor diminui com a diminuição da diferença de pressão entre os vasos em funcionamento e o sistema conectado, também com maiores volumes de ar. O ideal para o enchimento seguro do ar são manter a temperatura baixa e manter o ar limpo.

A temperatura é mantida baixa, fazendo pequenas pausas para resfriamento durante as partes mais críticas do enchimento da CAPV. Os procedimentos de preenchimento aplicam-se a temperaturas ambientes abaixo de 55 ° C (131 ° F) e CAPVs de trabalho de tamanho 2000 litros ou acima, com válvula de entrada mínima de 2". É feita referência aos diferentes procedimentos operacionais para as preparações do sistema antes do enchimento.

4 EXPERIMENTO

Em contraste com os metais em que a propagação de uma única trinca dominante é responsável pela falha por fadiga, várias microfissuras aparecem na matriz durante o estágio

inicial da carga e, então, diferentes mecanismos de dano podem ser experimentados pelos materiais compósitos.^{29,30} Portanto, um entendimento claro do início e evolução do dano é necessário para prever o tempo de vida em estruturas compostas.

Os modelos de vida à fadiga foram construídos com base em curvas S-N ou diagramas do tipo Goodman.¹⁰ Esses modelos não são capazes de capturar diferentes mecanismos de falha associados aos compósitos.^{31,32,33} Eles também precisam de dados experimentais complexos e extensos, que devem ser repetidos para quaisquer novas configurações de lay-up.



Figura 20: Curva S-N que é um gráfico de magnitude de tensão (S) por número de ciclos (N).

Categorizado sob as técnicas baseadas na física, uma célula unitária apropriada de compósitos investigados é escolhida em primeiro lugar e seus campos de tensão e deformação são derivados de acordo. No nível macro, as tensões homogeneizadas são calculadas; no entanto, no nível micro, os componentes de tensão nos materiais constituintes são necessários. Assim, uma análise multi-escala para prever o início e propagação de fissuras e também a redução da rigidez é realizada usando modelos micromecânicos, incluindo mecanismos de transferência de tensão, método de cisalhamento e abordagens variantes.^{34,35,36}

A principal desvantagem dessas técnicas pode ser encontrada em sua dependência da habilidade dos modelos micromecânicos empregados em analisar vários mecanismos de danos associados aos compósitos. Além disso, o desempenho desses modelos é

consideravelmente limitado pelas condições de limite aplicadas, carregamentos e várias configurações de lay-up. Em abordagens de mecânica de dano contínuo,^{37,38} uma variável de dano é definida e seu crescimento está relacionado aos princípios da termodinâmica. A redução da rigidez é avaliada no nível da lâmina e, portanto, esses métodos podem ser aplicados a qualquer configuração de lay-up, independentemente das cargas. Nesta categoria, algumas técnicas numéricas avançadas foram desenvolvidas para prever o início e a propagação de trincas.^{18,39,40}

As técnicas de modelagem de dano progressivo são geralmente uma combinação de critérios de falha, modelos de fadiga e regras de degradação para propriedades mecânicas.^{10,11} Como rotina geral, a análise de tensão é realizada em cada ciclo de carregamento e a ocorrência de falha é examinada. Se a falha ocorrer, as propriedades mecânicas da região com falha correspondente são repentinamente degradadas, caso contrário, as propriedades mecânicas de toda a região do material são degradadas gradualmente com base nos ciclos decorridos. Esse processo continua até que toda a camada experimente modos catastróficos de falha. Como principal vantagem, essas técnicas podem levar em consideração o histórico de carregamento. Para o melhor conhecimento dos autores, a forma mais abrangente de técnica de modelagem de dano progressivo para análise de estruturas compostas foi desenvolvida por Shokrieh e Lessard.^{15,16}

Chamado de “Técnica de degradação de propriedade de material generalizada”, o modelo consiste na degradação da rigidez e da resistência em todas as direções dos materiais, acompanhada de uma avaliação normalizada da vida em fadiga. O modelo pode ser utilizado para qualquer configuração de lay-up arbitrária, uma vez que necessita caracterizar o comportamento de camadas Unidirecionais (U-D) constitutivas. Assim, a caracterização completa de cada configuração não é necessária. Apesar do desempenho adequado do modelo na previsão do tempo de vida à fadiga de compósitos, o modelo consome muito tempo. Uma técnica de modelagem mais simples e facilitada foi construída por Shokrieh e Zakeri^[14] na plataforma semelhante do modelo desenvolvido anteriormente.^{15,16}

A seguir, iremos apresentar o material compósito utilizado em nosso experimento e em seguida os resultados alcançados através dos ensaios.



Figura 21: CAPVs fabricadas de FV e PEAD.

4.1 MATERIAIS

Materiais compósitos são genericamente constituídos por dois tipos de fases; uma é chamada matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa. A matriz pode ser um polímero, um metal ou uma cerâmica que confere estrutura ao material compósito preenchendo os espaços vazios que ficam no reforço e mantendo-o na sua posição. Já a fase dispersa ou reforço existe em diversas formas sendo a classificação mais geral em três categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas e compósitos de fibras contínuas. A figura 16 apresenta o esquema da classificação dos compósitos.⁴¹

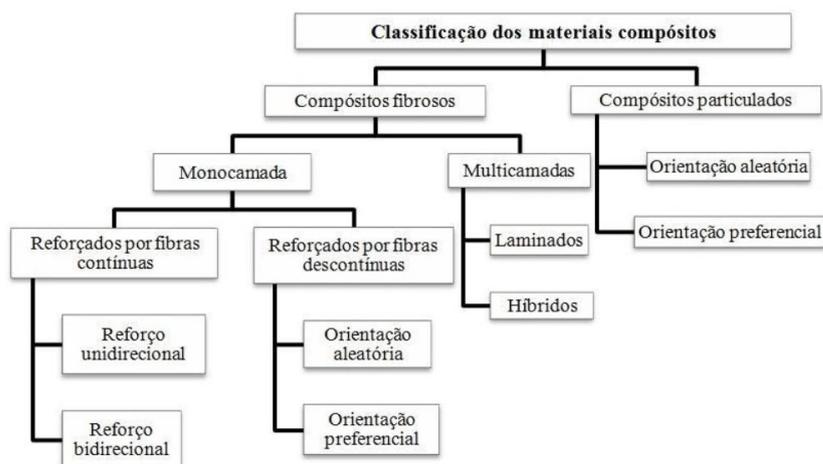


Figura 22: Classificação geral dos materiais compósitos.

Existem pelo menos duas configurações possíveis em relação à orientação das fibras: uma com fibras (geralmente contínuas) orientadas com relação ao sentido de aplicação da carga e outra com fibras (em geral descontínuas) com disposição totalmente aleatória. As fibras descontínuas podem estar orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas.

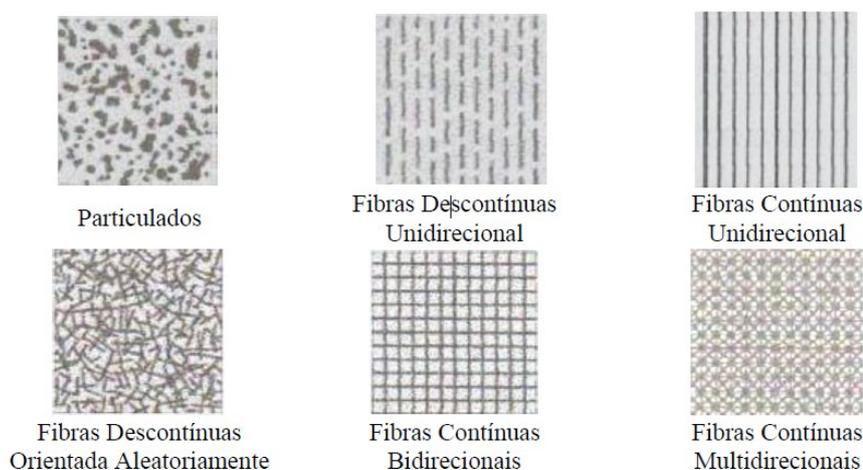


Figura 23: Esquemas das formas mais comuns de reforços (Fonte: Daniel e Ishai, 1994).⁴²

Os compósitos com fibras contínuas e orientadas possuem melhores respostas mecânicas em relação às fibras descontínuas (curtas) com orientação aleatória, entretanto, em vários casos, a fibra curta com orientação aleatória possui uma maior aplicabilidade industrial devido a seu fácil manuseio quanto ao processo de fabricação. A orientação e comprimento da fibra para um determinado compósito dependem do nível e natureza da tensão aplicada, bem como dos custos de fabricação.

O presente estudo tem como foco os materiais compósitos de FV e o PEAD utilizadas nos CAPV's e que são comumente utilizadas na indústria de óleo e gás. O PEAD possui um grau polietileno (PE) estabilizado com UV Borecene RM 7403. Apresenta bom fluxo e alta rigidez. É adequado para processamento por moldagem por injeção. Recomendado para aplicações de paredes espessas, grandes recipientes e artigos de espuma. A FV é do tipo T30 SE 1500, ela também é adequada para uso em tubos confeccionados por enrolamentos de filamentos, tanques e vasos de pressão de atmosférico.

O Compósito de FV utilizada é compatível com poliéster como resina. Impregnando este tipo de reforço à resina, dá origem a um material compósito amplamente utilizado e comum para a fabricação de tubos, embarcações, bem como tanques de armazenamento de produtos químicos, graças ao seu bom estado físico e propriedades químicas mecânicas.⁴³



Figura 24: CAPV onde foram removidas as amostras para os ensaios.



Figura 25: Amostras de PEAD e FV utilizadas nos ensaios.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Em sua maioria, os desenvolvimentos dos compósitos têm como objetivos principais à aplicação estrutural e dessa forma, as propriedades mecânicas são as que despertam um maior interesse para as indústrias.⁴⁴

Com relação essa propriedade deve-se levar em conta a complexidade da interação mecânica entre o reforço e a matriz. As propriedades mecânicas de maior interesse são: resistência à tração, compressão, flexão, impacto e abrasão, além do módulo de elasticidade em tração e flexão, dureza e tenacidade à fratura.

No ensaio de flexão as propriedades de interesse são a resistência à flexão e o módulo de rigidez em flexão. As configurações de carregamento podem ser flexão em três pontos e flexão em quatro pontos. A resistência à flexão representa a tensão máxima desenvolvida nas fibras externas de uma barra sujeita a dobramento, no momento da quebra. O módulo de rigidez em flexão é determinado tal como em um ensaio de tração: a razão, dentro do regime elástico, entre a tensão e a deformação.

A resistência ao impacto representa a energia para fraturar um corpo de prova sob impacto. Oferece valores comparativos, mas de grande utilidade no desenvolvimento de materiais. Em compósitos, a resistência ao impacto depende fortemente da resistência interfacial.⁴⁵

As propriedades finais são significativamente influenciadas tanto pela proporção de fibra presente no material quanto pela qualidade da matriz de fibra interface. A adição de até mesmo uma pequena proporção de fibra no PEAD entregou um aumento significativo na rigidez do material, um benefício mostrado para material PEAD primário e secundário.⁴⁶

TESTE DE IMPACTO

Os ensaios de impacto foram realizados de acordo com a norma ASTM D6110-10 (Standard test Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics, 2010),⁴⁷ nos quais foram realizados utilizando os corpos de prova com as dimensões de 127 x 12,7 x 12,7mm (comprimento x largura x espessura). Este método é usado para determinar a resistência dos materiais à fratura, conforme indicado pela energia extraída de martelos tipo pêndulo, montados em máquinas padronizadas, na quebra de corpos de prova padrão com uma oscilação de pêndulo.

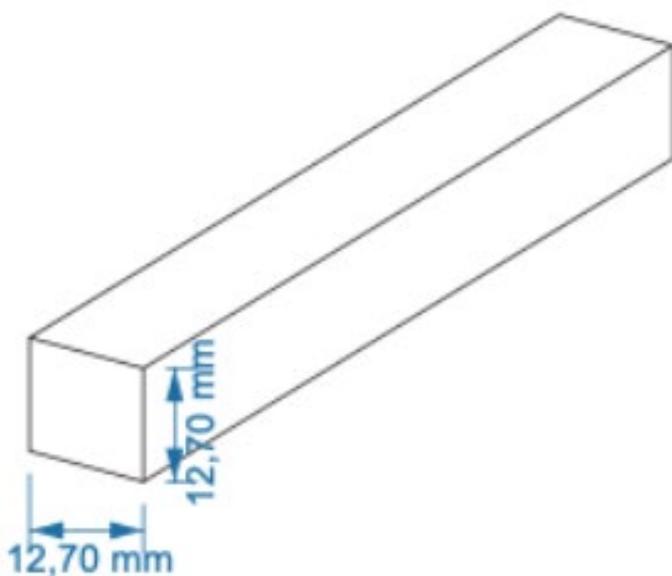


Figura 26: Dimensões das amostras utilizadas para realização do Charpy.



Figura 27: Amostras de FV e PEAD utilizadas no ensaio de impacto.



Figura 28: Amostras de FV e PEAD após o ensaio de impacto.

Uma investigação sistemática da força de impacto Charpy de diferentes materiais foi realizada para diferentes espessuras de amostra e amostras de curvatura diferente. Pode ser demonstrado que a espessura e a curvatura das amostras investigadas tem uma influência significativa na resistência ao impacto.⁴⁸

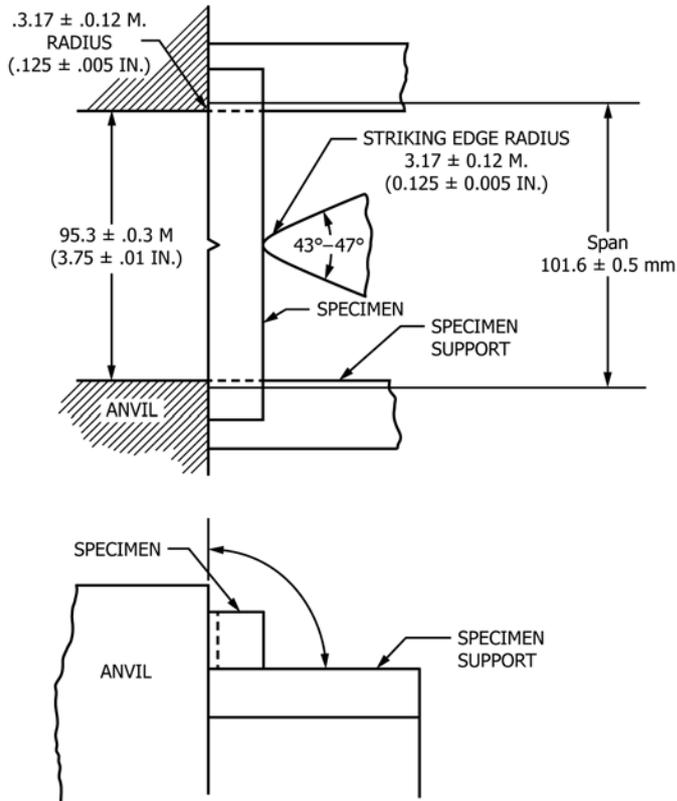


Figura 29: Relação de bigorna, corpo de prova e borda de ataque entre si para o método de teste Charpy

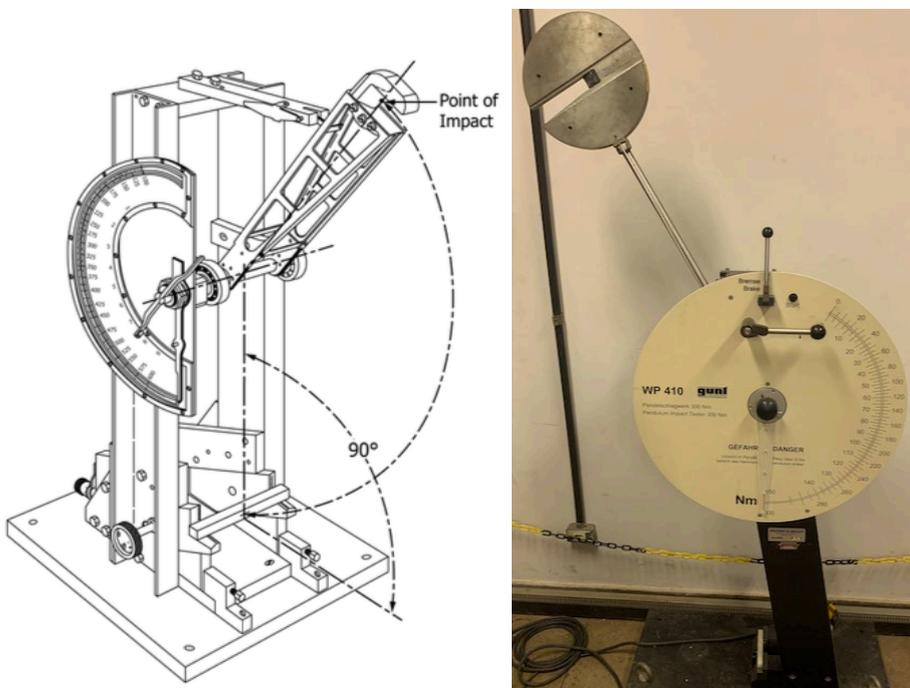


Figura 30: Equipamento utilizado para os testes de impacto.

Em análise, pode-se demonstrar que o teste de impacto Charpy instrumentado é uma mecânica sensível método para detectar até mesmo estágios iniciais de deterioração do material de PEAD.⁴⁹

O modelo de fratura dúctil é determinado a partir do teste de tração e dos dados do teste de tensão de entalhe de borda única. Para o modelo de fratura de clivagem, a tensão principal máxima é determinada como uma função da energia de impacto Charpy usando os dados de teste Charpy sobre as temperaturas.⁵⁰

Independentemente do mecanismo de falha dominante, a deformação foi altamente localizada para todos os materiais, o que levou a uma aparência macroscópica frágil da superfície de fratura. Os testes dos materiais mostraram que uma “crítica tensão”, que é independente da magnitude da fluência ou carga de fadiga, existe semelhante ao comportamento de termoplásticos puros no controle de plasticidade regime.⁵¹

TESTE DE FLEXÃO

Os testes de flexão foram realizados de acordo com a norma ASTM D790-17 - (Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, 2017),⁵² que têm dimensões de 128 x 13 x 4 mm (comprimento x largura x espessura). Esses métodos de teste são usados para determinar as propriedades de flexão de plásticos não reforçados e reforçados, incluindo compósitos de alto módulo e materiais de isolamento elétrico, utilizando um sistema de carregamento de três pontos para aplicar uma carga a uma viga simplesmente apoiada (amostra).

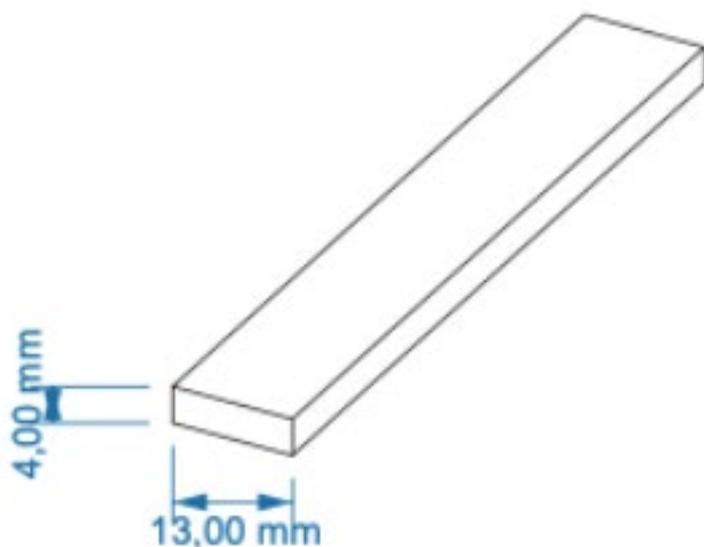
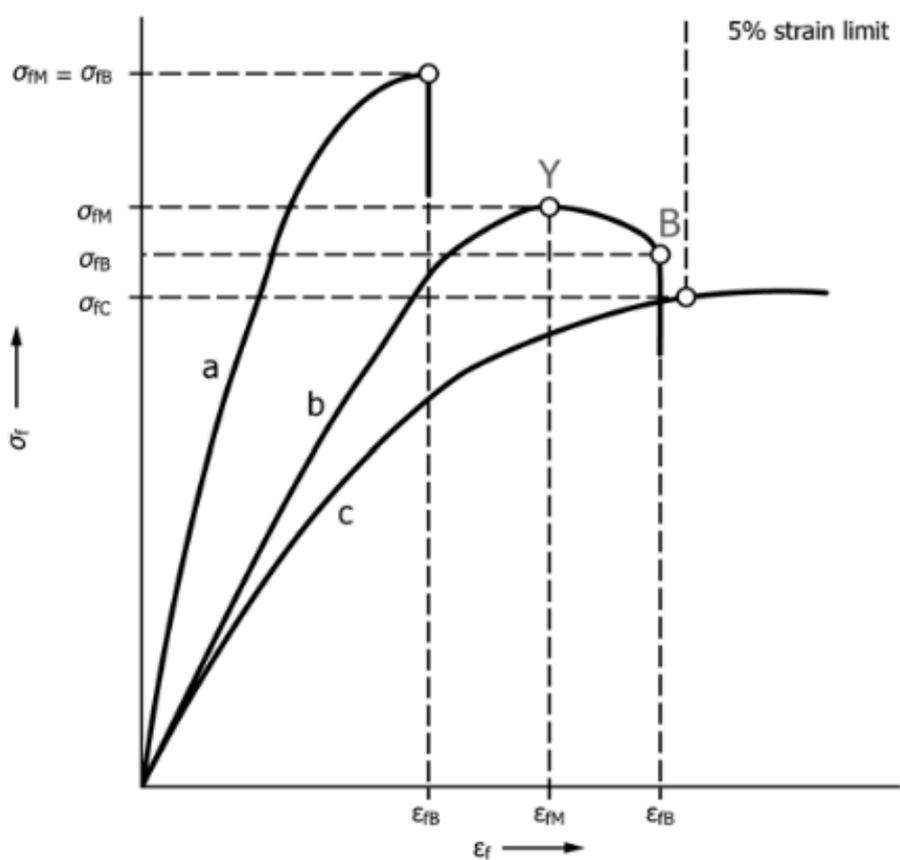


Figura 31: Dimensões das amostras utilizadas para realização do teste de flexão.



NOTE 1—Curve a: Specimen that breaks before yielding.
 Curve b: Specimen that yields and then breaks before the 5 % strain limit.
 Curve c: Specimen that neither yields nor breaks before the 5 % strain limit.

Figura 32: Exemplos típicos de curvas de flexão (σ_f) x (ϵ_f)

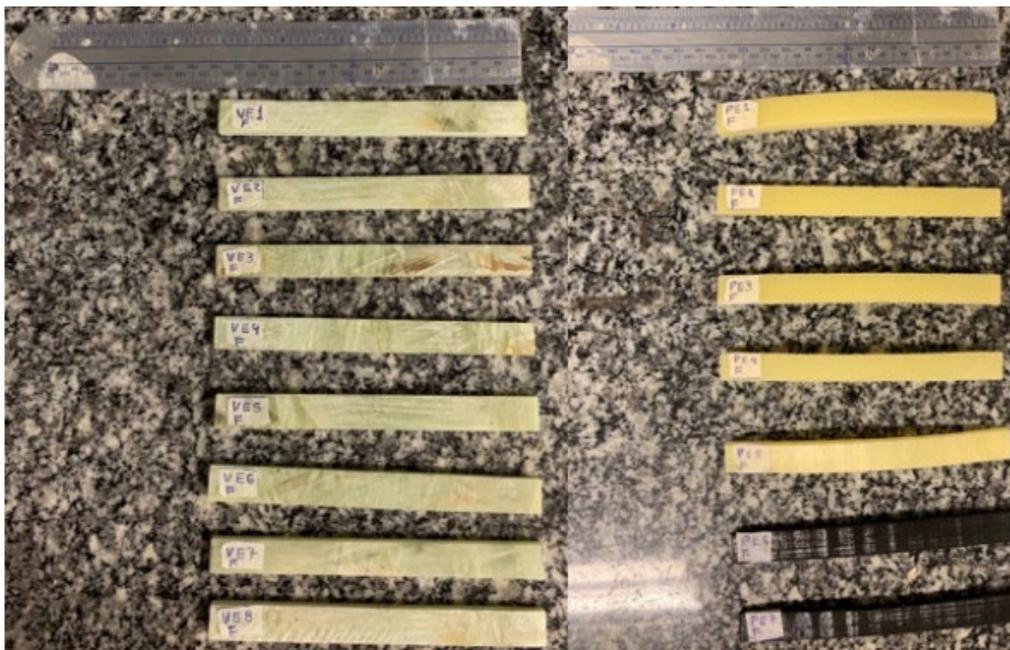


Figura 33: Amostras de FV e PEAD utilizadas no ensaio de flexão.

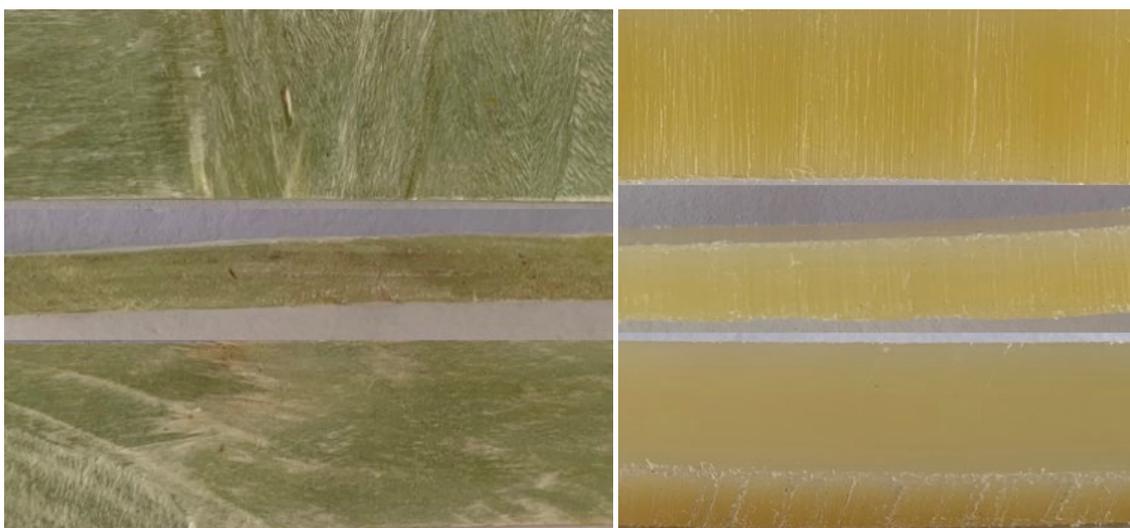


Figura 34: Amostras de FV e PEAD após os ensaios de flexão.



Figura 35: Equipamento utilizado para os ensaios de flexão.

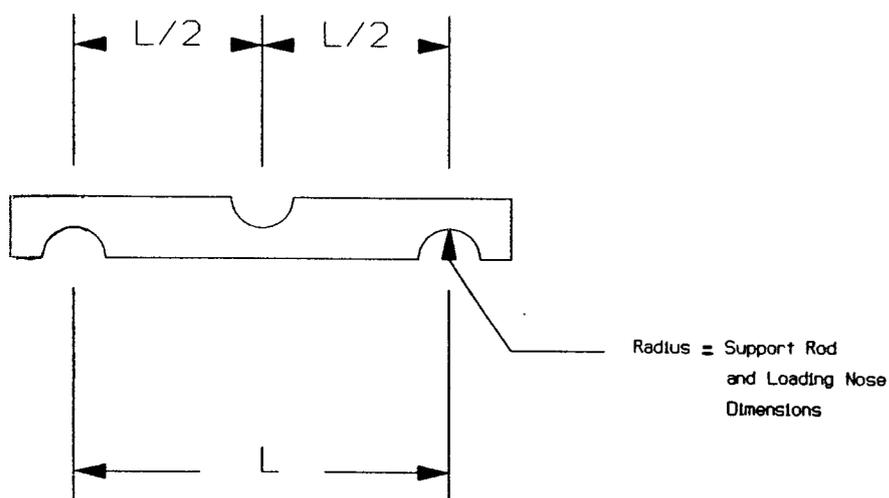


Figura 36: Acessório usado para definir o centro de carga e o espaçamento e alinhamento de suporte

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica na qual um feixe de elétrons focalizado varre a superfície da amostra, interagindo com a matéria. Desta interação, são gerados diferentes tipos de sinais que podem oferecer informações sobre a morfologia e composição química do material.⁵³

Os elétrons secundários emitidos são os mais utilizados para a obtenção da imagem que oferece informações sobre a morfologia e a topografia do material. Já elétrons retroespalhados, cuja intensidade está ligada ao número atômico, podem ser utilizados para a construção da imagem que fornece informações sobre a distribuição dos elementos químicos na imagem. Outro sinal importante é composto dos fótons emitidos de raios-x característicos que permitem a identificação qualitativa dos elementos presentes em sua composição.⁵³

A identificação qualitativa dos elementos presentes na amostra foi realizada via EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy* – Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X) acoplado ao MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura – FEI INSPECT S50. A análise via EDS é uma técnica que caracteriza os elementos presentes na amostra, e não os compostos, sendo que o limite de detecção pode chegar a 0,1% de concentração em massa.

4.3 PROPRIEDADES TERMICAS DOS MATERIAIS

CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

Os testes foram realizados de acordo com a norma ASTM D3418-12 (Standard test method for transition temperatures and enthalpies of fusion and crystallization of polymers by differential scanning calorimetry, 2012),⁵⁴ a técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC) é largamente utilizada para a caracterização de polímeros. Consiste em um ensaio no qual é medida a diferença de temperatura entre a amostra a ser caracterizada e uma substância inerte (referência), quando ambas são submetidas a um programa controlado de temperatura.⁵³ A amostra é submetida a uma rampa de aquecimento uniforme, com temperatura monitorada por meio de um termopar e comparada com a temperatura da amostra de referência.⁵⁵

As transições entálpicas (endotérmicas ou exotérmicas), são responsáveis pela mudança na temperatura e indicam mudanças de fases, fusão, oxidação e vaporização, entre outras reações químicas.⁵⁶ A análise de DSC é comumente utilizada para a determinação das

temperaturas de transição vítrea, fusão cristalina e cristalização (T_g , T_m e T_c), entalpias de fusão e ocorrência de cinética de reações como cura e decomposição.

Foram enviadas 2 amostras, uma de FV e a outra de PEAD para o laboratório AFINKO com o objetivo de realizar ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Teor de Cinzas e análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS) em 02 (duas) amostras para caracterizá-las.

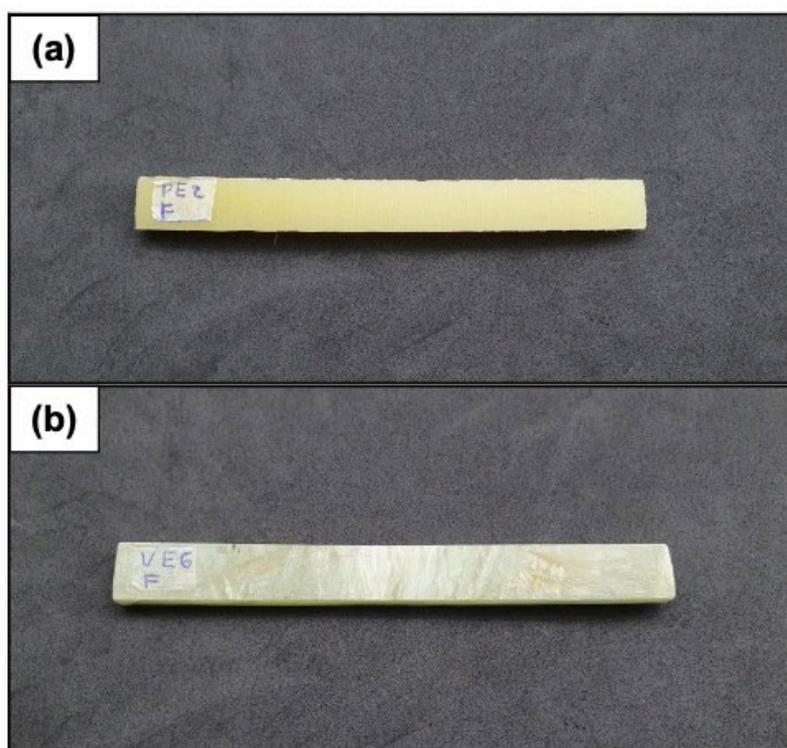


Figura 37: Imagens das Amostras: (a) AFK211230 e (b) AFK211231

Tabela 5: Condições do ensaio de DSC.

ETAPA	Faixa de Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Gás Utilizado	Vazão do Gás (mL/min)
1º Aquecimento	25 a 300	10	N ₂	50
Isoterma 5 min	300	-	N ₂	50
2º Aquecimento	25 a 300	10	N ₂	50
Porta amostra: Cadinho de Alumínio				
Data de Realização: 26/04/2021				
Norma de Referência: Metodologia Interna da AFINKO				
Equipamento: DSC Shimadzu, modelo DSC-60				
Massas das Amostras (mg)	AFK211230: 5,010	AFK211231: 4,700		

TEOR DE CINZAS

Para determinação da quantidade de material inorgânico, calcinou-se a amostra em uma mufla, que consiste basicamente em um forno para altas temperaturas, com temperatura controlada. Dessa forma, todo o material orgânico é eliminado e através da pesagem da amostra antes e depois da calcinação determina-se a quantidade de material inorgânico presente no cadinho após a calcinação.⁵⁷

Tabela 6: Condições do ensaio de Teor de Cinzas.

Norma de Referência:	ISO 3451-1:2019 – “ <i>Plastics -- Determination of ash -- Part 1: General methods</i> ”		
Método:	() A- Rapid Ashing ou () B ou () C		
Temperatura do Laboratório: 23,5°C	Umidade do Laboratório: 42%		
Temperatura de Calcinação: 600°C	Tempo de Calcinação: 60 minutos		
Taxa de Aquecimento: 20°C/min			
Data de Realização: 12/04/2021			
Equipamento: Mufla e Balança Analítica Shimadzu, modelo AUW220D			

OBS: Quando utilizada a norma ISO 3451-1-2019, a norma estabelece que o resultado entre as medidas (duplicata) não deve ser superior a 10%.⁵⁷

TERMOGRAVIMETRIA (TG)

A análise termogravimétrica (TG ou TGA) é uma ferramenta largamente utilizada para a caracterização de materiais para diversas aplicações, sobretudo para a caracterização de

polímeros. Esta análise baseia-se na medição contínua da massa da amostra em função da temperatura ou tempo e sob atmosfera controlada.⁵³ Os resultados obtidos a partir da análise termogravimétrica são apresentados em curvas de variação de massa versus temperatura e, a partir dessas informações é possível determinar, por exemplo, composição da amostra, estabilidade térmica e quantificação de resíduos inorgânicos.⁵⁶

O equipamento usado na análise é constituído por uma microbalança e um forno conectados a um programador responsável pelo controle do perfil de temperaturas a que a amostra será submetida.⁵⁵

Tabela 7: Condições do ensaio de Teor de Cinzas.

Etapa	Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Gás Utilizado	Vazão do Gás (mL/min)
I	30 a 800	10	N ₂	20
Norma de Referência: Procedimento Interno da Afinko				
Data de Realização: 01/06/2021				
Equipamento: Shimadzu, módulo termogravimétrico TGA-50				
Suporte de Amostra: Platina				
Massas das Amostras (mg)		AFK211230: 12,426	AFK211231: 10,894	

4.4 RESULTADOS

Nesta seção apresentamos os resultados obtidos das amostras do compósito de FV e do PEAD através dos ensaios realizados em laboratórios. Para melhor descrever as características mecânicas dos compósitos, um estudo sistemático das propriedades de flexão e impacto de compósitos foi conduzido na presente pesquisa. As resistências das amostras variaram de 138 MPa a 10835 MPa. Diferentes tamanhos de corpo de provas foram feitos seguindo suas respectivas normas foram empregados para investigar os efeitos do índice de reforço da fibra nas propriedades de flexão e impacto, incluindo mecânica propriedades e padrões de fissuras. As relações entre o índice de reforço da fibra e as propriedades do polietileno foram estabelecidas em todos os ensaios e comparadas com os valores experimentais anteriores.

RESULTADO TESTE DE IMPACTO

O compósito de FV demonstra alta resistência mecânica durante os testes, a resistência á flexão da fibra de vidro variou de 4364 a 10835 Mpa e a deformação no ensaio Charpy variou de 149 a 268 Nm. A FV é do tipo T30 SE 1500, ela também é adequada para uso em tubos de filamentos, tanques e vasos de pressão de atmosférico.

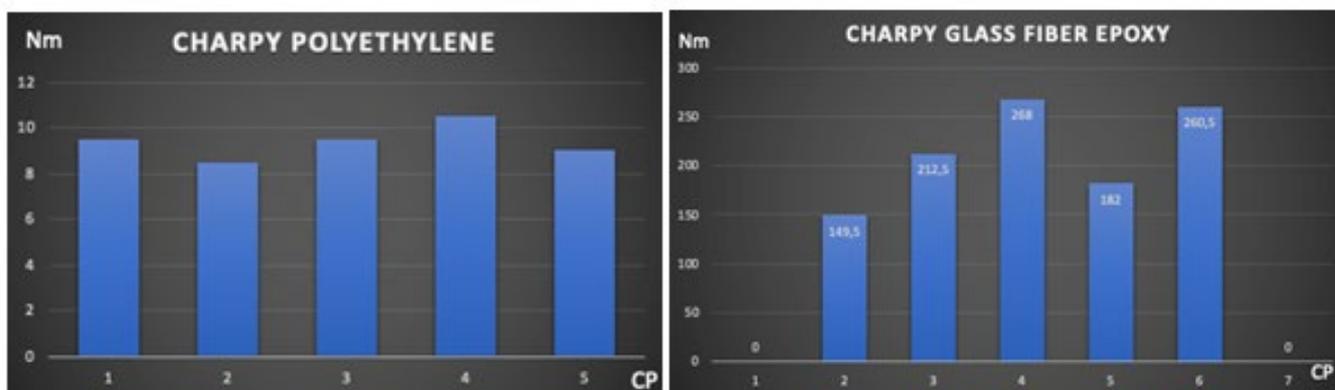


Figura 38: Resultados obtidos dos ensaios de impacto

O PEAD também demonstrou uma boa resistência mecânica durante os testes, a resistência á flexão do PEAD variou de 138 á 426 Mpa e a deformação no ensaio Charpy variou de 8 á 11 Nm. O PEAD utilizadas nos CAPV's e que são comumente utilizadas na indústria de óleo e gás. O PEAD possui um grau polietileno (PE) estabilizado com UV Borecene RM 7403. Apresenta bom fluxo e alta rigidez. É adequado para processamento por moldagem por injeção (IM). Recomendado para aplicações de paredes espessas, grandes recipientes e artigos de espuma.

RESULTADO TESTE DE FLEXÃO

As figuras 33 e 34 mostram os gráficos força-deformação típica de um ensaio de flexão nos corpos de prova para os materiais compósitos e PEAD respectivamente. Os principais parâmetros destacados durante as análises foram os seguintes: (1) Força (N), (2) tensão (MPa), (3) deformação (mm), (4) módulo de elasticidade (MPa), (5) área (mm²) e (6) o comprimento (mm).

A incorporação de fibras que atuam como contenção de fissuras ou barreiras pode mudar o modo de falha de um corpo de prova muito modo mais dúctil. Conforme o carregamento externo aumenta, a microfissura aparece e se propagou na matriz. O efeito de ligação das fibras foi ativado e forneceu uma barreira lateral na amostra como as rachaduras estendidas.⁵⁸

O processo de extrusão simples permite uma boa dispersão e distribuição de enchimento na matriz polimérica. A interface pobre entre os polímeros e aumenta o módulo de perda e diminui ligeiramente a resistência ao impacto dos compósitos.⁵⁹

O comportamento de deformação plástica do PEAD foi examinado experimentalmente. sob diferentes estados de tensão. A tensão macroscópica e a deformação volumétrica foram quantificado enquanto a taxa de deformação transversal foi controlada. As previsões teóricas e os resultados experimentais foram encontrados em boa concordância destacando a relevância da representação constitutiva para PEAD.⁶⁰

Para cada caso, os valores médios dos parâmetros foram usados para realizarmos o teste de flexão, as informações detalhadas para os seis parâmetros mencionados acima (isto é, Força, tensão, deformação, módulo de elasticidade, área e comprimento) estão resumidos nos gráficos a seguir:

O desempenho de amostras de PEAD sob condições cíclicas de carregamento foram avaliadas e um cenário físico é proposto para a interpretação das medidas macro-micro correlacionadas: Deteriorizações estruturais como ruptura, desemaranhamento e quebra das lamelas são induzidas principalmente pelo primeiro ciclo. Essas deteriorações estruturais podem induzir a perda de módulo e competir com a orientação dos transmissores de estresse / recristalização associado ao efeito de fortalecimento.⁶¹

Além disso, a tendência do PEAD de "cavitar" era altamente dependente da microestrutura inicial, uma vez que era limitada em amostras temperadas devido a sua alta densidade de transmissores de estresse e menor cristalinidade. Esta diferença de comportamento de cavitação nessas amostras deve ser valioso para uma investigação mais aprofundada sobre a origem da dependência das perdas mecânicas durante a deformação cíclica em materiais de PEAD e suas microestruturas / morfologias originais que podem contribuir para a concepção e seleção de materiais PEAD.⁶²

No presente estudo, a tensão de primeira fissuração representa o ponto de viragem da parte elástica linear para a parte de endurecimento por deformação das curvas tensão-deformação. Em alguns corpos de provas, flutuações ocorreu na parte elástica linear e posteriormente aumentou novamente até o ponto de endurecimento por deformação. Portanto, o valor da tensão de primeira fissura foi determinado a partir do ponto inicial do ramo de endurecimento por deformação das curvas tensão-deformação. A capacidade de dissipação de energia foi calculada usando a área abaixo do ramo ascendente das curvas tensão-deformação. O ramo descendente das curvas tensão-deformação durante a fase de localização da fissura não foi considerado neste cálculo.

As fissuras foram distribuídas uniformemente, e as larguras das fissuras eram relativamente pequenas. As fibras foram arrancadas para fora da matriz (como mostrado na Fig. 37), resultando em um modo de falha dúctil, exceto para alguns casos, que apresentou ruptura considerável da fibra, e para o PEAD na superfície da fratura (como mostrado na Fig. 38). No estágio de falha, as fibras foram predominantemente arrancadas da matriz. A tensão flutua durante o processo de propagação da fissuração.

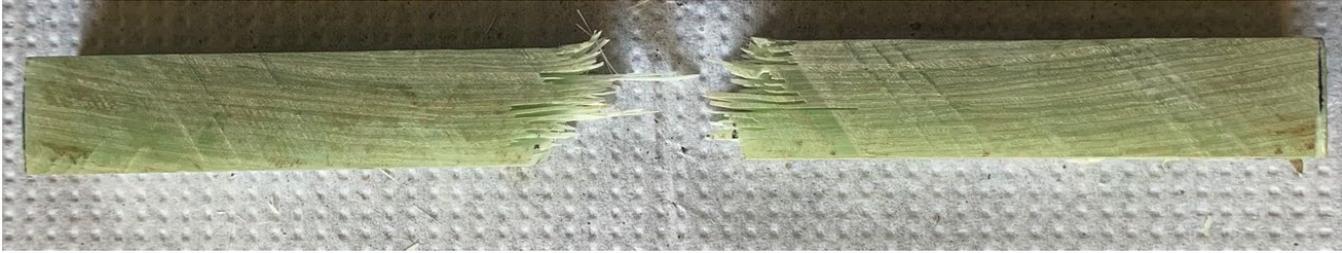


Figura 41: Corpo de prova (FV) arrancadas da matriz



Figura 42: Corpo de prova (PEAD) fraturado

Os resultados mostram que a ordem de layup teve pouco efeito nas propriedades de tração dos compósitos, e a transferência da carga de tração da superfície fibras fracas para as fibras fortes na camada central foi uma maneira melhorada para a carga de transferência.⁶³

As curvas mostram um tipo de platô ou um leve comportamento de endurecimento por escorregamento com o fenômeno de endurecimento por escorregamento. As fibras de PE foram predominantemente arrancadas da matriz em todas as intensidades. Na escala composta, algumas fibras de PE fraturadas na matriz de alta resistência, o que foi atribuído principalmente ao aumento do estresse interfacial devido ao efeito de inclinação da fibra.⁶⁴

RESULTADO TESTE DE CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

Os resultados Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) podem ser observadas através das curvas de DSC conforme demonstrado nas seguintes figuras:

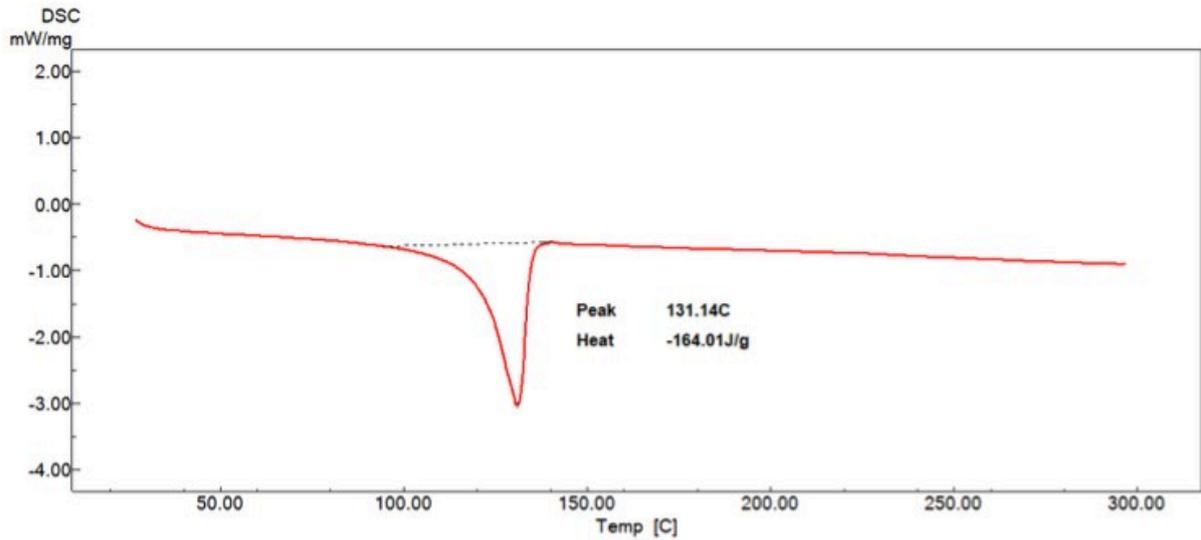


Figura 43: Curva DSC da amostra AFK211230 – 1o Aquecimento

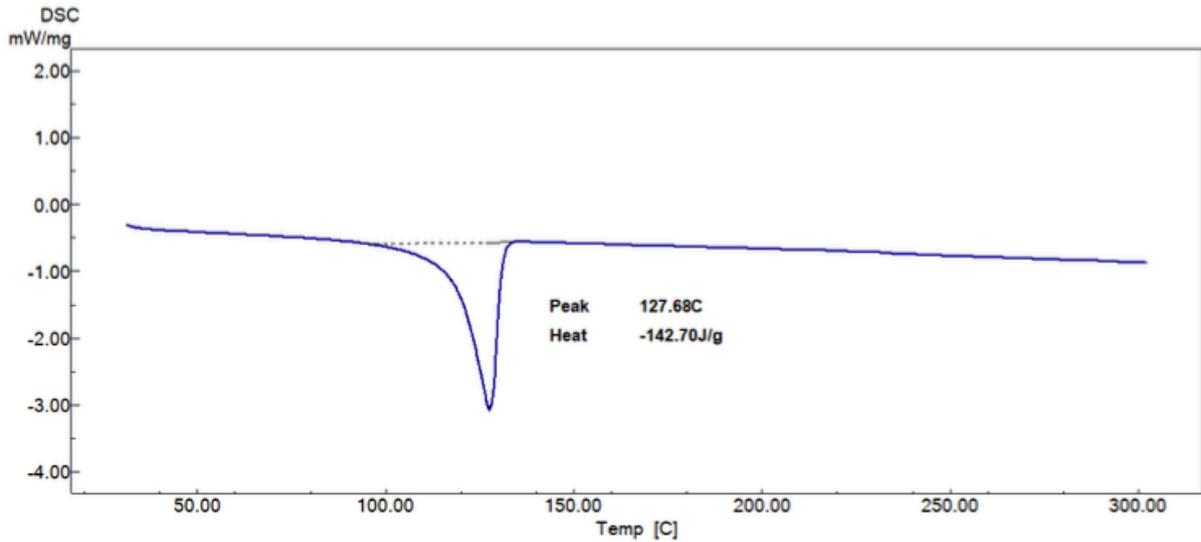


Figura 44: Curva DSC da amostra AFK211230 – 2o Aquecimento

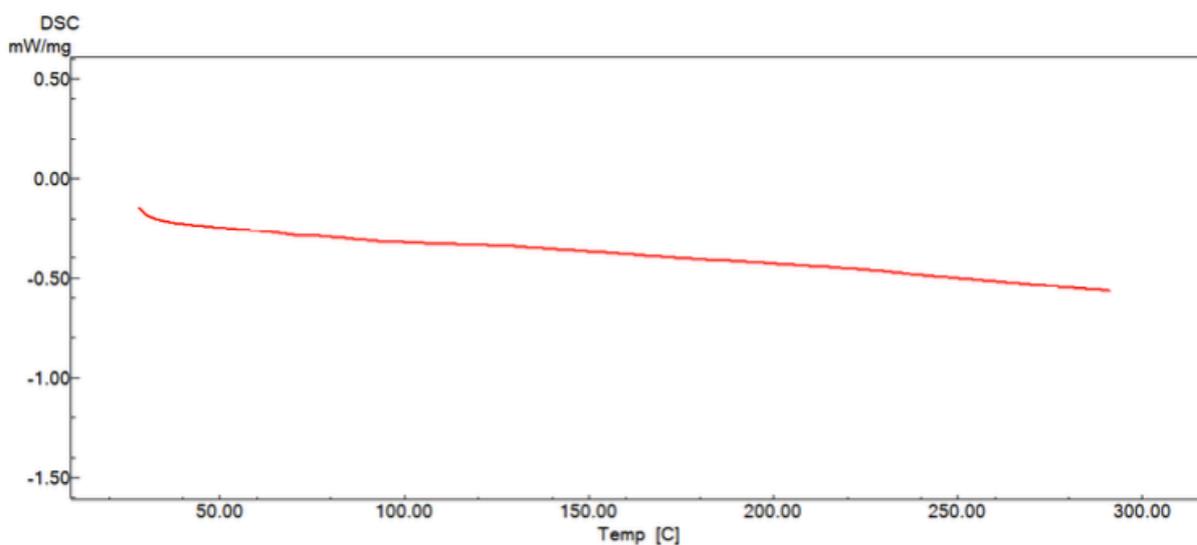


Figura 45: Curva DSC da amostra AFK211231 – 1o Aquecimento

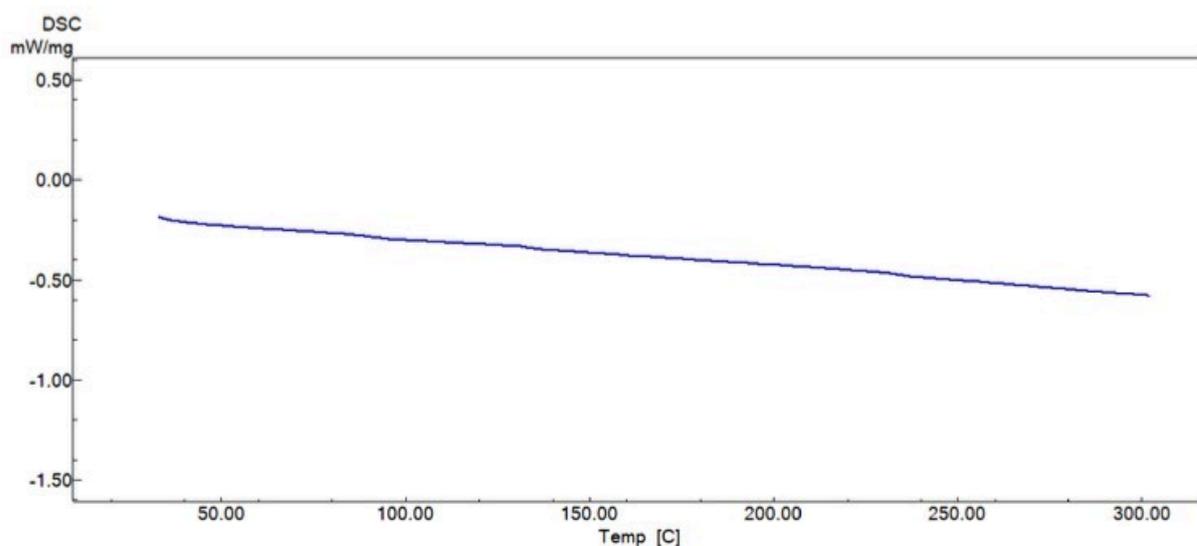


Figura 46: Curva DSC da amostra AFK211231 – 2o Aquecimento

Podemos de fato afirmar que DSC desempenhou um papel fundamental no esclarecimento de fundamentos questões científicas relacionadas à transição vítrea e vítrea Estado. A transição vítrea ainda é considerada uma das problemas mais desafiadores e interessantes em condensado ciência da matéria.⁶⁵

Tabela 8: Resultados de DSC.

Amostra	1º Aquecimento	2º Aquecimento
	Tm (°C)	Tm (°C)
AFK211230	131,14	127,68
AFK211231	---	---

Tm: Temperatura de Fusão Cristalina.

Tabela 9: Resultados do ensaio de Teor de Cinzas.

Amostra	Teor de Cinzas		
	Medidas (%)	Média (%)	Média (mg/kg)
AFK211230	0,168	0,142	1423,65
	0,116		
AFK211231	79,378	78,862	788618,56
	78,346		

RESULTADO MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As micrografias MEV mostraram que os enchimentos são finamente distribuídos dentro do PEAD matriz. No entanto, uma correlação direta pode ser observada entre o teor de cargas e a tendência de formação de aglomerados.⁶⁶

A figura a seguir apresenta as micrografias das amostras AFK211230, evidenciando os pontos onde foram realizadas as análises de EDS. A tabela que a segue apresenta os resultados de EDS obtidos.

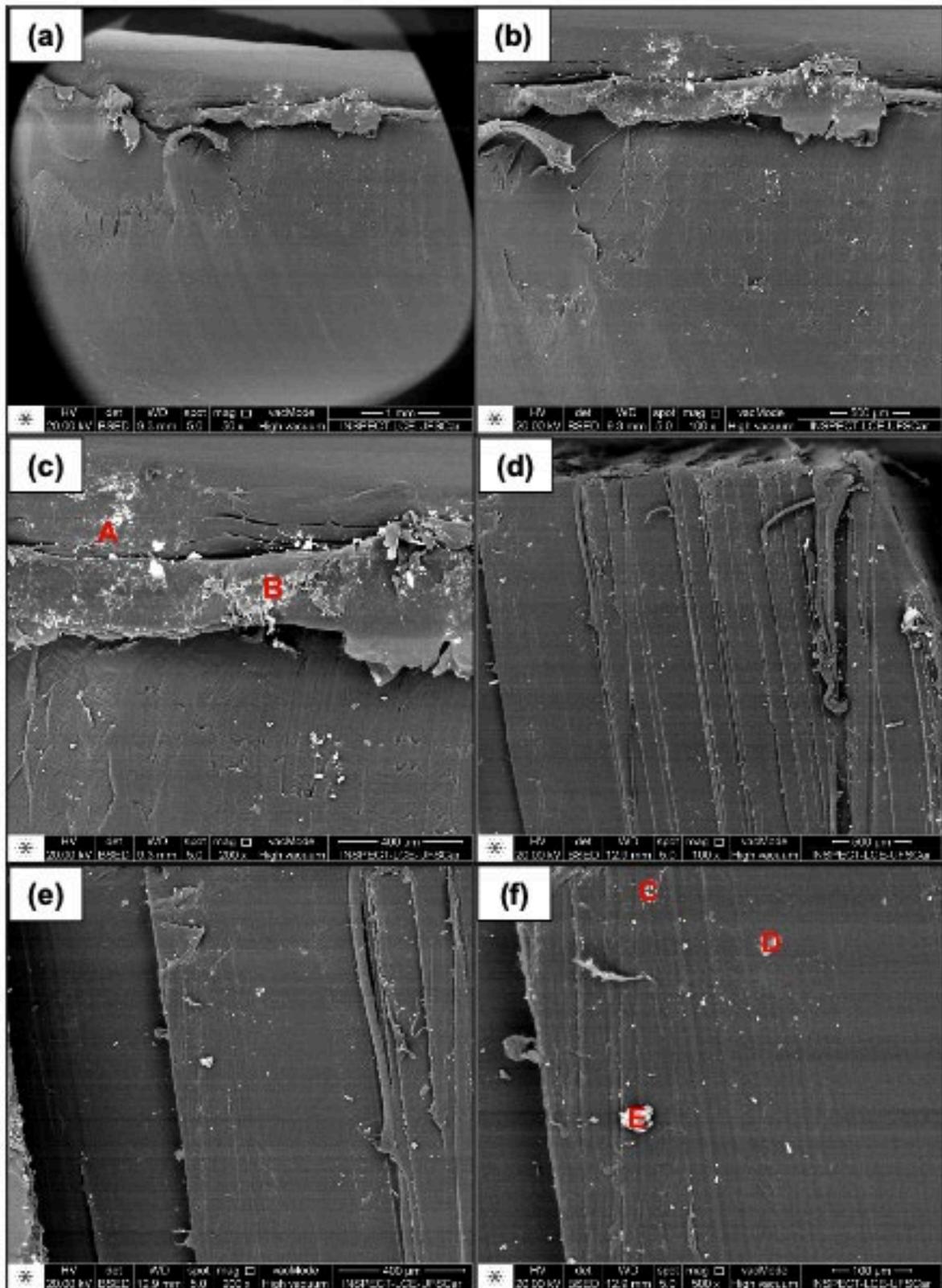


Figura 47: Micrografias da amostra AFK211230, com aumentos de: (a) 50X, (b) 100X, (c) 200X, (d) 100X, (e) 200X e (f) 500X.

Tabela 10: Resultados de EDS para a amostra AFK211230.

Elemento	(%) em Massa				
	A	B	C	D	E
C	86,64	83,70	91,18	84,42	81,97
O	5,14	5,60	6,83	10,55	12,17
Na	0,46	0,42	1,00	2,18	0,54
Mg	---	---	---	---	0,19
Al	---	---	---	---	0,82
Si	0,49	0,59		0,33	2,00
Cl	---	---	0,99	2,52	0,71
Fe	3,18	3,39	---	---	---
Ni	2,06	1,79	---	---	---
Cu		2,80	---	---	---
Zn	2,02	1,72	---	---	---
K	---	---	---	---	0,51
Ca	---	---	---	---	1,12

A figura a seguir apresenta as micrografias da amostra AFK211231, evidenciando os pontos onde foram realizadas as análises de EDS. A tabela que a segue apresenta os resultados de EDS obtidos.

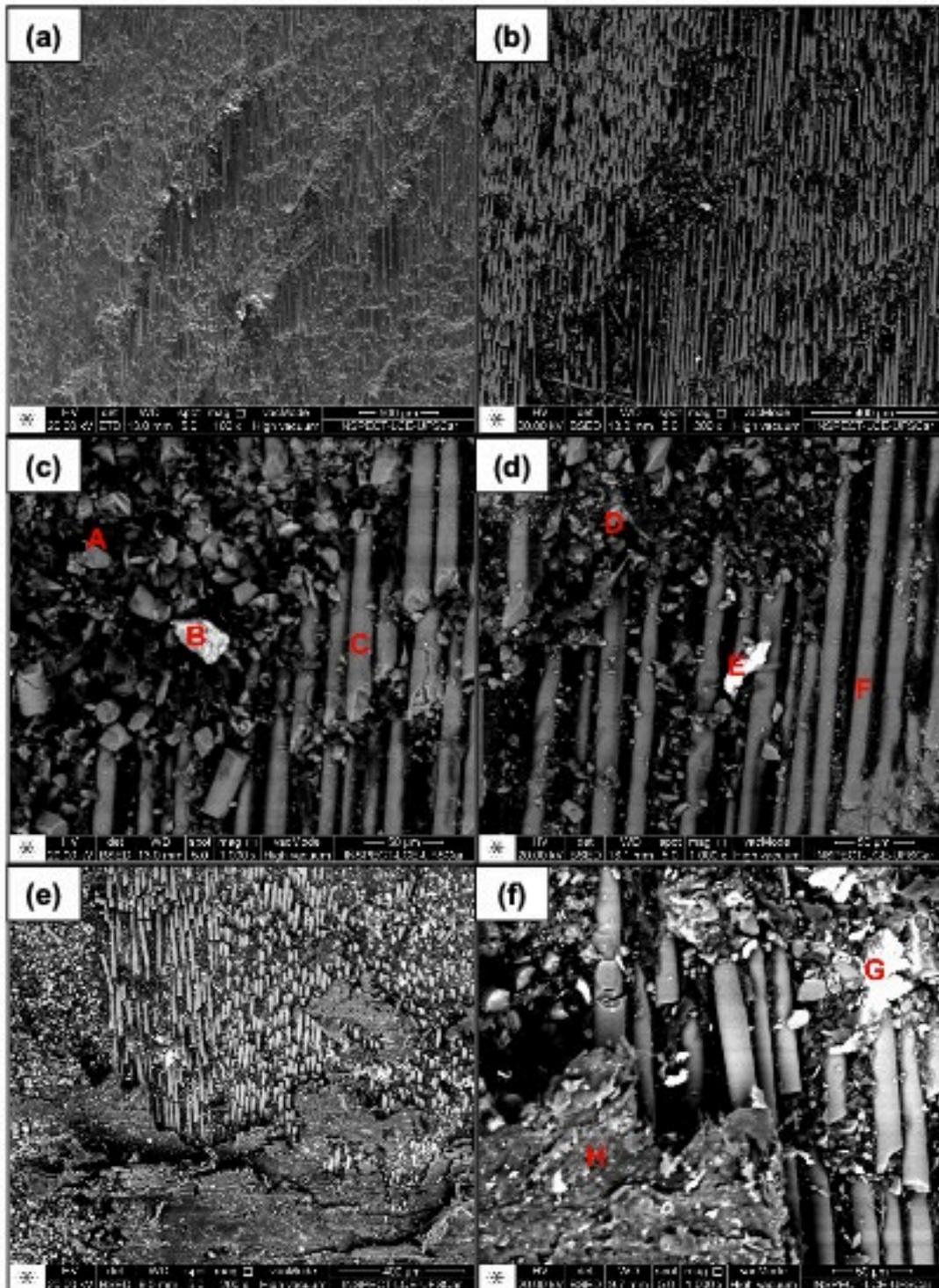


Figura 48: Micrografias da amostra AFK211231, com aumentos de: (a) 100X, (b) 200X, (c) 1000X, (d) 1000X, (e) 200X e (f) 1000X.

Tabela 11: Resultados de EDS para a amostra AFK211231.

Elemento	(%) em Massa							
	A	B	C	D	E	F	G	H
C	44,77	24,71	33,56	47,53	30,87	39,08	30,37	40,35
O	26,03	28,42	28,99	24,01	16,22	26,77	12,05	11,92
Na	0,71	0,30	0,37	0,73	0,64	0,69	---	0,95
Mg	0,84	0,81	1,14	0,88	1,18	1,06	0,77	0,72
Al	3,28	2,84	4,91	3,31	3,99	4,04	2,22	1,69
Si	14,29	10,54	20,48	14,25	17,42	18,54	10,47	4,44
Cl	0,61	0,37	---	0,77	---	---	2,03	16,30
K	0,33	---	---	---	---	---	0,31	---
Ca	9,14	6,28	10,55	8,51	9,06	9,82	5,99	6,05
Fe	---	25,74	---	---	20,61	---	27,34	5,89
Ti	---	---	---	---	---	---	8,46	11,70

RESULTADO TEOR DE CINZAS

Os resultados da cristalina em torno de 128°C para a amostra AFK211230, considerando o segundo aquecimento, que reflete propriedades intrínsecas do material, a qual é característica de PEAD. Já a amostra AFK211231 não apresentou transições térmicas na faixa de temperatura analisada.

A Tabela 12 apresenta um resumo dos resultados de Teor de cinzas obtidos.

Tabela 12: Resumo dos Resultados de Teor de cinzas.

Propriedade	AFK211230	AFK211231
Teor de Cinzas (%)	0,14	78,86

Os resultados da análise de MEV/EDS da amostra AFK211230 apresentaram como elemento majoritário o Carbono (C), com frações baixas dos elementos Oxigênio (O), Sódio (Na), Silício (Si) e Cloro (Cl), e ainda, resquícios dos elementos Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Ferro (Fe), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Potássio (K) e Cálcio (Ca).

Já para a amostra AFK211231, onde é possível observar a presença de fibras, os resultados de MEV/EDS apresentaram frações de majoritárias de Carbono (C) e Oxigênio (O), com frações altas de Silício (Si) e Cálcio (Ca), além de diversas frações baixas de Sódio (Na), Magnésio (Mg), Alumínio (Al) e Cloro (Cl). Ainda, esta amostra apresentou em alguns pontos o elemento Ferro (Fe) com frações relativamente altas e resquícios dos elementos Potássio (K) e Titânio (Ti).

RESULTADO TESTE TERMOGRAVIMETRIA (TG)

Os resultados da Termogravimetria (TG) podem ser observados através das curvas de TG e DTG conforme demonstrado nas seguintes figuras:

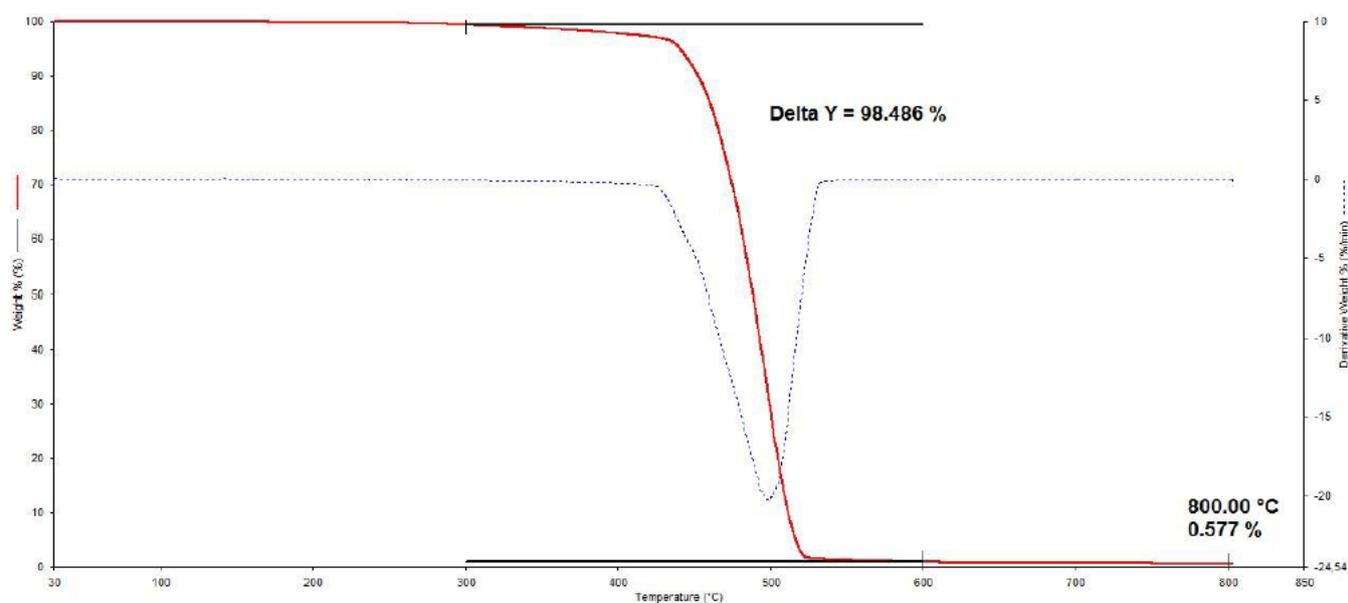


Figura 49: Curvas TG e DTG referentes à amostra AFK211230.

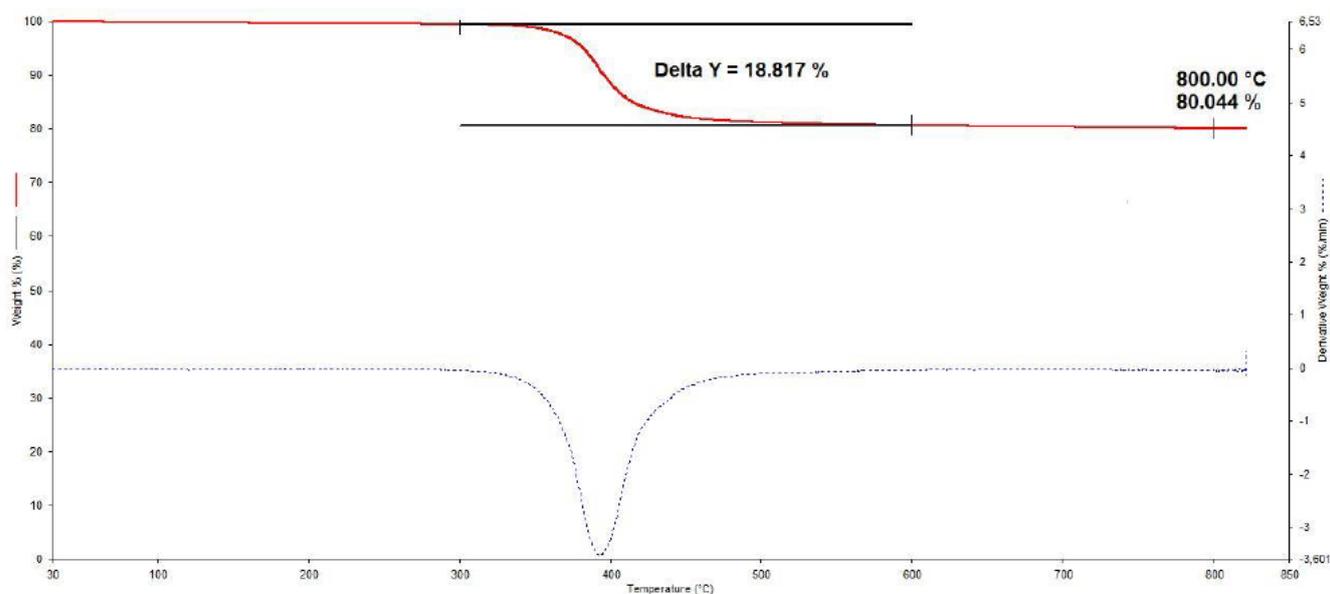


Figura 50: Curvas TG e DTG referentes à amostra AFK211231.

A Tabela 13 apresenta os resultados de Termogravimetria.

Tabela 13: Resumo dos resultados de TG

Amostra	Faixa de Temperatura (°C)	Perda de Massa (%)	Resíduo Estável a 800°C (%)
AFK211230	300 a 600	98,486	0,577
AFK211231	300 a 600	18,817	80,044

Os resultados da análise de TG indicaram que para a amostra AFK211230 apresentou uma perda de massa na faixa de 300°C a 600°C em torno de 98,5% e resíduo estável a 800°C de aproximadamente 0,57%, referente ao teor de material inorgânico em sua composição. A amostra AFK211230 apresentou uma perda de massa na faixa de 300°C a 600°C e resíduo estável a 800°C de aproximadamente 80,04%, referente ao teor de material inorgânico em sua composição.

5 CONCLUSÕES

CAPV (composite air pressure vessel) tem sido utilizado em diversas indústrias nas últimas duas décadas para armazenamento de fluidos (líquidos e gases), água, derivados de petróleo e produtos químicos, entre outros. Em particular, CAPV estão se tornando cada vez mais atraentes nas indústrias de petróleo e gás natural, devido às suas vantagens significativas, como resistência à corrosão e flexibilidade estrutural, menor custo de transporte e produção, menor peso para maior resistência específica, facilidade de reparos ou manutenção e alta durabilidade contra condições climáticas desfavoráveis. Essas propriedades inerentes da moldagem por injeção (IM) ao CAPV são extremamente difíceis de obter em materiais metálicos, aço e concreto. A melhor técnica de fabricação de CAPV é o método de moldagem por injeção. Além das propriedades da fibra e do PEAD, a temperatura, a velocidade de rotação e a orientação / sequência são fatores significativos que determinam a resistência do CAPV. Existem várias pesquisas sobre o CAPV, no entanto, há um estudo de revisão extenso muito limitado sobre as matérias-primas utilizadas no CAPV, produção, utilização, reparo e recuperação do CAPV, bem como desenvolvimentos e inovações recentes. Portanto, este estudo tem como objetivo contribuir para o conhecimento nas áreas citadas e negligenciadas, bem como propor a utilização do CAPV para diferentes áreas de aplicação em diversos setores. Os materiais compostos usados para a fabricação do CAPV e sua aplicabilidade foram revisados criticamente e relatados no escopo deste trabalho. Ficou evidente que as pressões externa, interna e hidrostática são utilizadas principalmente para analisar os vazamentos do CAPV. Além disso, as rachaduras do CAPV ocorrem devido a operações de esvaziamento ou enchimento que resultaram em temperaturas fora dos limites dos vasos de pressão. A baixa temperatura pode resultar no encolhimento da camisa interna de polietileno e então vazamentos acontecem pelas fissuras, mas facilmente resolvido através da operação correta para esvaziar ou preencher o CAPV, onde o operador deve estar atento à pressão diferencial utilizada no sistema e também seguir o procedimento correto de operações. Além disso, as propriedades de durabilidade da CAPV dependem das suas condições ambientais. Os desempenhos de durabilidade dos vasos podem ser reduzidos devido aos efeitos adversos de envelhecimento do meio ambiente ou condições adversas, como: raios ultravioletas a partir de energia solar, o meio quente, a pressão diferencial, entre outros que tendem a piorar caso as fibras não forem revestidas e tratadas. As consequências prejudiciais, como rachaduras, encolhimento da absorção do revestimento interno de polietileno, inchaço, mudança na morfologia da superfície, perda de estética e fraca adesão

interfacial fibra-matriz são os motivos que reduzem as propriedades mecânicas e outras propriedades estruturais do CAPV.

REFERÊNCIAS

1. TRAN, Phuong; WU, Changlang; SALEH, Michael; BORTOLAN NETO, Luiz; NGUYEN-XUAN, H.; FERREIRA, A.J.M. Composite structures subjected to underwater explosive loadings: a comprehensive review. **Composite Structures**, v. 263, p. 113684, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113684>. Acesso em: 19 maio 2021. (Citado na página 12).
2. WANG, Qiang; ZHOU, Haiting; XIE, Junwei; XU, Xiaomeng. Nonlinear ultrasonic evaluation of high-density polyethylene natural gas pipe thermal butt fusion joint aging behavior. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 189, p. 104272, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104272>. Acesso em: 27 maio 2021. (Citado na página 12).
3. DAHL, Erik; BECKER, Jan Simon; MITTELSTEDT, Christian; SCHÜRMAN, Helmut. A new concept for a modular composite pressure vessel design. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 124, p. 105475, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105475>. Acesso em: 20 maio 2021. (Citado na página 13).
4. JARIWALA, Hitesh; JAIN, Piyush; MAISURIYA, Vatsal. Experimental and statistical analysis of strength of glass fiber reinforced polymer composite for different fiber architecture. **Polymer Composites**, v. 42, n. 3, p. 1407-1419, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.25911>. Acesso em: 27 maio 2021. (Citado na página 13).
5. RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. São Paulo: Atlas, 2017 – 4. ed. (Citado na página 14).
6. CODE, Pressure Vessel. Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. **ASME B&PV Code Section XI**, ASME, New York, 2013. (Citado na página 22).
7. BESSONOVA, N. P.; KRASHENINNIKOV, S.V.; SHCHERBINA, M.A.; CHVALUN, S.N. Thermal behavior of crystalline and amorphous HDPE phase in the process of necking at creep deformation. **Polymer Testing**, v. 97, p. 107127, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107127>. Acesso em: 18 maio 2021. (Citado na página 25).
8. TEBALDI, Adriano; COELHO, Leandro dos Santos; LOPES JUNIOR, Vicente. Detecção de falhas em estruturas inteligentes usando otimização por nuvem de partículas: fundamentos e estudo de casos. **Revista Controle & Automação**, v. 17, n. 3, p. 312–330, 2006. (Citado na página 26).
9. MORTAZAVIAN, Seyyedvahid; FATEMI, Ali. Fatigue behavior and modeling of short fiber reinforced polymer composites: a literature review. **International Journal of Fatigue**, v. 70, p. 297-321, 2015. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.10.005>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 26).

10. DEGRIECK, Joris; VAN PAEPEGEM, Wim. Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials. **Appl. Mech. Rev.**, v. 54, n. 4, p. 279-300, 2001. Disponível em: <http://doi.org/10.1115/1.1381395>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado nas páginas 26, 37 e 38).
11. HARRIS, Bryan (Ed.). **Fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics**. Woodhead Publishing, 2003. (Citado nas páginas 26 e 38).
12. GENTILE, Michela; SUMMERS, Angela E. Random, systematic and common cause failure: How do you manage them? **Process Safety Progress**, v. 25, n. 4, p. 331-338, 2006. Disponível em: <http://doi.org/10.1002/prs.10145>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 27).
13. GARCÍA, Fausto P.; PEDREGAL, Diego J.; ROBERTS, Clive. Time series methods applied to failure prediction and detection. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 95, n. 6, p. 698-703, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.10.009>. Acesso em: 04 jun. 2021. (Citado na página 27).
14. SHOKRIEH, Mahmood M.; ZAKERI, Mahnaz. Generalized technique for cumulative damage modeling of composite laminates. **Journal of Composite Materials**, v. 41, n. 22, p. 2643-2656, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021998307078718>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado nas páginas 27 e 38).
15. SHOKRIEH, Mahmood M.; LESSARD, Larry B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part I: modeling. **Journal of Composite Materials**, v. 34, n. 13, p. 1056-1080, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1177%2F002199830003401301>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado nas páginas 27 e 38).
16. SHOKRIEH, Mahmood M.; LESSARD, Larry B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part II: material characterization and model verification. **Journal of Composite Materials**, v. 34, n. 13, p. 1080-1116, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1177%2F002199830003401302>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado nas páginas 27 e 38).
17. RAFIEE, Roham; ELASMI, Fereshteh. Theoretical modeling of fatigue phenomenon in composite pipes. **Composite Structures**, v. 161, p. 256-263, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.054>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 27).
18. AREIAS, P.; MSEKH, M. A.; RABCZUK, Timon. Damage and fracture algorithm using the screened Poisson equation and local remeshing. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 158, p. 116-143, 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.10.042>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado nas páginas 27 e 38).
19. CHAU-DINH, Thanh; ZI, Goangseup; LEE, Phill-Seung; RABCZUK, Timon; SONG, Jeong-Hoon. Phantom-node method for shell models with arbitrary cracks. **Computers & Structures**, v. 92, p. 242-256, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.10.021>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 27).

20. DAI, Z. Z.; HARRIS, B. Acoustic emission study of impact-damaged GRP pipes. **NDT International**, v. 21, n. 4, p. 259-265, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(88\)90339-2](https://doi.org/10.1016/0308-9126(88)90339-2). Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 28).
21. EFFENDI, R. R.; BARRAU, J.-J.; GUEDRA-DEGEORGES, D. Failure mechanism analysis under compression loading of unidirectional carbon/epoxy composites using micromechanical modelling. **Composite Structures**, v. 31, n. 2, p. 87-98, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(94\)00060-3](https://doi.org/10.1016/0263-8223(94)00060-3). Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 28).
22. ZHANG, Tairui; LU, Kai; KATSUYAMA, Jinya; LI, Yinsheng. Stress intensity factor solutions for surface cracks with large aspect ratios in cylinders and plates. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 189, p. 104262, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104262>. Acesso em: 27 maio 2021. (Citado na página 30).
23. REN, Yueqing; SUN, Xiaojie; LI, Yafei; CHEN, Lanlan; SUN, Miaomiao; LIANG, Wenbin. Relationships between impact performance and structures of rotationally molded crosslinked high-density polyethylene. **Polymer Engineering and Science**, v. 61, p. 410-419, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pen.25584>. Acesso em: 27 maio 2021. (Citado na página 31).
24. SHOJAEFARD, M. H.; GOUDARZI, K. The numerical estimation of thermal contact resistance in contacting surfaces. **American Journal of Applied Sciences**, v. 5, n. 11, p. 1566–1571, 2008. ISSN 1546-9239. Disponível em: <https://doi.org/10.3844/ajassp.2008.1566.1571>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 33).
25. DOU, Ruifeng; GE, Tianran; LIU, Xunliang; WEN, Zhi. Effects of contact pressure, interface temperature, and surface roughness on thermal contact conductance between stainless steel surfaces under atmosphere condition. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 94, p. 156 – 163, 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.069>. Acesso em: 04 jun. 2021. (Citado na página 34).
26. ZHENG, Jiang; LI, Yanzhong; CHEN, Pengwei; YIN, Geyuan; LUO, Huaihua. Measurements of interfacial thermal contact conductance between pressed alloys at low temperatures. **Cryogenics**, v. 80, p. 33–43, 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2016.09.004>. Acesso em: 04 jun. 2021. (Citado na página 34).
27. TANG, Qingyun; ZHANG, Weifang. The effect of pressure on thermal contact conductance of superalloys under high temperature. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 103, p. 1208 – 1213, 2016. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.028>. Acesso em: 04 jun. 2021. (Citado na página 34).

28. ZU, Lei; XU, Hui; JIA, Xiaolong; ZHANG, Qian; WANG, Huabi; ZHANG, Bingzhan. Winding path design based on mandrel profile updates of composite pressure vessels. **Composite Structures**, v. 235, p. 111766, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111766>. Acesso em: 20 maio 2021. (Citado na página 36).
29. TAHERI-BEHROOZ, Fathollah; SHOKRIEH, Mahmood M.; LESSARD, Larry B. Residual stiffness in cross-ply laminates subjected to cyclic loading. **Composite Structures**, v. 85, p. 205–12, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.025>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 37).
30. SHOKRIEH, M. M.; TAHERI-BEHROOZ, F. A unified fatigue life model based on energy method. **Composite Structures**, v. 75, n. 1-4, p. 444-450, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.041>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 37).
31. HASHIN, Zvi; ROTEM, Assa. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials. **Journal of Composite Materials**, v. 7, n. 4, p. 448-464, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1177%2F002199837300700404>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 37).
32. WU, CM Lawrence. Thermal and mechanical fatigue analysis of CFRP laminates. **Composite Structures**, v. 25, n. 1-4, p. 339-344, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(93\)90180-X](https://doi.org/10.1016/0263-8223(93)90180-X). Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 37).
33. FAWAZ, Z.; ELLYIN, F. Fatigue failure model for fibre-reinforced materials under general loading conditions. **Journal of Composite Materials**, v. 28, n. 15, p. 1432-1451, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1177%2F002199839402801503>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 37).
34. McCARTNEY, L. N. Energy methods for fatigue damage modelling of laminates. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 13, p. 2601-2615, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.04.044>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 37).
35. SUBRAMANIAN, S.; REIFSNIDER, K. L.; STINCHCOMB, W. W. A cumulative damage model to predict the fatigue life of composite laminates including the effect of a fibre-matrix interphase. **International Journal of Fatigue**, v. 17, n. 5, p. 343-351, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(95\)99735-S](https://doi.org/10.1016/0142-1123(95)99735-S). Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 37).
36. ZHANG, Hui; MINNETYAN, Levon. Variational analysis of transverse cracking and local delamination in $[\theta_m/90_n]$ s laminates. **International Journal of Solids and Structures**, v. 43, n. 22-23, p. 7061-7081, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.03.004>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 37).
37. XIONG, J. J.; SHENOI, R. A. A two-stage theory on fatigue damage and life prediction of composites. **Composites Science and Technology**, v. 64, n. 9, p. 1331-1343, 2004.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.10.006>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 38).

38. ALLEN, David H.; GROVES, Scott E.; HARRIS, Charles E. A cumulative damage model for continuous fiber composite laminates with matrix cracking and interply delaminations. *In: Composite materials: testing and design (Eighth conference)*. **ASTM International**, p. 57–80, 1988. (Citado na página 38).

39. RABCZUK, Timon; AREIAS, P. M. A.; BELYTSCHKO, T. A meshfree thin shell method for non-linear dynamic fracture. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 72, n. 5, p. 524-548, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/nme.2013>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 38).

40. RABCZUK, Timon; BELYTSCHKO, T. Cracking particles: a simplified meshfree method for arbitrary evolving cracks. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 61, n. 13, p. 2316-2343, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/nme.1151>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 38).

41. VENTURA, Ana Mafalda FM. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009. (Citado na página 39).

42. DANIEL, Isaac M.; ISHAI, Ori. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. New York: Oxford University Press, 1994. (Citado na página 40).

43. BOUSSETTA, Hajer; BEYAOUI, Moez; LAKSIMI, Abdelouahed; WALHA, Lassaad; HADDAR, Mohamed. Study of the filament wound glass/polyester composite damage behavior by acoustic emission data unsupervised learning. **Applied Acoustics**, v. 127, p. 175-183, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.06.004>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 41).

44. HAGE JUNIOR, E. **Compósitos e blendas poliméricas**. Campinas: Instituto Latino-Americano e IBM Brasil, 1989 203p. ISBN 1678-5189. (Citado na página 42).

45. CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2007. ISBN 978-85-216-1595-8. (Citado na página 42).

46. ADOLE, Onuh; ANGUILANO, Lorna; MINTON, Timothy; CAMPBELL, James; SEAN, Lavelle; VALISIOS, Samaras; TARVERDI, Karnik. Basalt fibre-reinforced high-density polyethylene composite development using the twin screw extrusion process. **Polymer Testing**, v. 91, p. 106467, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106467>. Acesso em: 18 maio 2021. (Citado na página 43).

47. ASTM D6110. Standard test Method for determining the Charpy impact resistance of notched specimens of plastics. **ASTM International**: West Conshohocken, PA, USA, 2010. (Citado na página 43).

48. GRAUPNER, Nina; KÜHN, Niels; MÜSSIG, Jörg. Influence of sample thickness, curvature and notches on the Charpy impact strength - an approach to standardise the impact strength of curved test specimens and biological structures. **Polymer Testing**, v. 93, p. 106864, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106864>. Acesso em: 26 maio 2021. (Citado na página 44).
49. ERDMANN, Maren; NIEBERGALL, Ute; WACHTENDORF, Volker; BÖHNING, Martin. Evaluation of UV-induced embrittlement of PE-HD by Charpy impact test. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, p. 49069, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.49069>. Acesso em: 26 maio 2021. (Citado na página 46).
50. KIM, Ji-Su; KIM, Yun-Jae; LEE, Myeong-Woo; KIM, Ki-Seok; SHIBANUMA, Kazuki. Fracture simulation model for API X80 Charpy test in ductile-brittle transition temperatures. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 182, p. 105771, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105771>. Acesso em: 26 maio 2021. (Citado na página 46).
51. ERARTSIN, Ozan; DRONGELEN, Martin van; GOVAERT, Leon E. Identification of plasticity-controlled creep and fatigue failure mechanisms in transversely loaded unidirectional thermoplastic composites. **Journal of Composite Materials**, v. 55, n. 14, p. 1947-1965, 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.1177/0021998320964252>. Acesso em: 26 maio 2021. (Citado na página 46).
52. ASTM D790-17. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. **ASTM International**: West Conshohocken, PA, USA, 2017. (Citado na página 46).
53. CANEVAROLO, S. J. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2003. (Citado nas páginas 50 e 53).
54. ASTM D3418-12. Standard test method for transition temperatures and enthalpies of fusion and crystallization of polymers by differential scanning calorimetry. **ASTM International**: West Conshohocken, PA, USA, 2012. (Citado na página 50).
55. LUCAS, Elizabete F.; SOARES, Bluma G.; MONTEIRO, Elizabeth E. C. **Caracterização de polímeros**: determinação de peso molecular e análise térmica. Rio de Janeiro: E-papers, 2001. (Citado nas páginas 50 e 53).
56. MOTHÉ, Cheila Gonçalves; AZEVEDO, Aline Damico de. **Análise Térmica de Materiais**. São Paulo: Artliber, 2009. (Citado nas páginas 51 e 53).
57. ISO 3451-1:2019: Plastics - Determination of ash - Part 1: General methods. Switzerland, 2019. (Citado 2 vezes na página 52).
58. LI, Linzhi; CAI, Ziwei; YU, Kequan; ZHANG, Y.X.; DING, Yao. Performance-based design of all-grade strain hardening cementitious composites with compressive strengths from 40 MPa to 120 Mpa. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, p. 202–217, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.001>. Acesso em: 03 jun. 2021. (Citado na página 55).

59. DI MARO, M.; DURACCIO, D.; MALUCELLI, G.; FAGA, M.G. High density polyethylene composites containing alumina-toughened zirconia particles: mechanical and tribological behavior. **Composites Part B: Engineering**, v. 217, p. 108892, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108892>. Acesso em: 27 maio 2021. (Citado na página 55).
60. MESBAH, Amar; ELMEGUENNI, Mohamed; YAN, Zhu; ZAÏRI, Fahmi; DING, Ning; GLOAGUEN, Jean-Michel. How stress triaxiality affects cavitation damage in high-density polyethylene: experiments and constitutive modeling. **Polymer Testing**, v. 100, p. 107248, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107248>. Acesso em: 26 maio 2021. (Citado na página 55).
61. GUO, Hang; RINALDI, Renaud G.; TAYAKOUT, Sourour; BROUDIN, Morgane; LAME, Olivier. The correlation between the mixed-mode oligo-cyclic loading induced mechanical and microstructure changes in HDPE. **Polymer**, v. 224, p. 123706, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123706>. Acesso em: 20 maio 2021. (Citado na página 58).
62. GUO, Hang; RINALDI, Renaud G.; TAYAKOUT, Sourour; BROUDIN, Morgane; LAME, Olivier. Characterization of the spherulitic deformation in equatorial region and cavitation in HDPE materials submitted to mixed-mode oligo-cyclic tensile loading. **Polymer Testing**, v. 99, p. 107208, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107208>. Acesso em: 18 maio 2021. (Citado na página 58).
63. WANG, Hongguang; YANG, Lanjie; WU, Hao. Study on mechanical and thermomechanical properties of flax/glass fiber hybrid-reinforced epoxy composites. **Polymer Composites**, v. 42, p. 714-723, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.25860>. Acesso em: 28 maio 2021. (Citado na página 59).
64. RANADE, Ravi; LI, Victor C.; STULTS, Michael D.; HEARD, William F.; RUSHING, Todd S. Composite properties of high-strength, high-ductility concrete. **ACI Materials Journal**, v. 110, n. 4, p. 413–422, 2013. (Citado na página 59).
65. ZHENG, Qiuju; ZHANG, Yanfei; MONTAZERIAN, Maziar; GULBITEN, Ozgur; MAURO, John C.; ZANOTTO, Edgar D.; YUE, Yuanzheng. Understanding glass through differential scanning calorimetry. **Chemical Reviews**, v. 119, n. 13, p. 7848-7939, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00510>. Acesso em: 25 maio 2021. (Citado na página 61).
66. SALEH, Mohamed; AL-HAJRI, Zainab; POPELKA, Anton; ZAIDI, Syed Javaid. Preparation and characterization of alumina HDPE composites. **Materials**, v. 13, n. 1, p. 250, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13010250>. Acesso em: 20 maio 2021. (Citado na página 62).