

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

JEFFERSON MORAIS GAUTERIO

**ESTIMATIVA DE VIDA SOB FLUÊNCIA DE FIOS DE POLIETILENO
DE ALTO MÓDULO ATRAVÉS DA METODOLOGIA DE LARSON-
MILLER**

ORIENTADOR: FELIPE TEMPEL STUMPF

Rio Grande
2018

JEFFERSON MORAIS GAUTERIO

**ESTIMATIVA DE VIDA SOB FLUÊNCIA DE FIOS DE POLIETILENO
DE ALTO MÓDULO ATRAVÉS DA METODOLOGIA DE LARSON-
MILLER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPMEC da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf

Área de concentração: Fabricação Mecânica

RIO GRANDE

2018

JEFFERSON MORAIS GAUTERIO

**ESTIMATIVA DE VIDA SOB FLUÊNCIA DE FIOS DE POLIETILENO
DE ALTO MÓDULO ATRAVÉS DA METODOLOGIA DE LARSON-
MILLER**

BANCA EXAMINADORA

Orientador Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Dr. Carlos Eduardo Marcos Guilherme

Prof. Dra. Amanda Dantas de Oliveira

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo aplicação da técnica de Larson-Miller para o estudo do comportamento de fibras sintéticas de HMPE – Polietileno de alto módulo, utilizados em cabos de ancoragem *offshore*. Cabos de aço, que são utilizados na ancoragem de plataformas *offshore*, estão sendo substituídos por cabos de fibras sintéticas, pois as mesmas apresentam melhores características que o aço para essa utilização, por exemplo, cabos de fibras sintéticas apresentam uma resistência maior que a do aço, tendo um peso muitas vezes menor. Durante as últimas décadas, tem se intensificado os estudos a respeito da utilização das fibras sintéticas em cabos de ancoragem, tanto é, que em meados dos anos de 1980 foram feitas as primeiras tentativas de utilização de fibras sintéticas em amarrações. A fluência é um fenômeno de longo prazo, porém é inviável a reprodução de testes reais de fluência, visto que a vida útil de cabos de ancoragem pode ultrapassar décadas, fato esse que exige que se faça ensaios acelerados para verificar o comportamento do material a longo prazo. A técnica de Larson-Miller é uma das técnicas mais difundidas e utilizadas para predição de vida de materiais. A técnica consiste na realização de ensaios de fluência acelerados para determinação da constante e do parâmetro de Larson-Miller. De posse desses dois dados é possível se estimar o tempo de ruptura do material. Após os ensaios e cálculos de tempo de ruptura constatou-se que a técnica de Larson-Miller é eficiente para o cálculo de um intervalo de tempo de ruptura do material.

Palavras-Chaves: HMPE – Polietileno de alto módulo. Ancoragem *Offshore*. Larson-Miller. Fluência. Fibras sintéticas.

Abstract

The aim of the present work is to apply the Larson-Miller technique for the study of the behavior of high modulus HMPE-polyethylene fibers used in offshore anchorage cables. Steel cables, which are used for anchoring offshore platforms, are being replaced by synthetic fiber cables because they have better characteristics than steel for such use, for example, synthetic fiber cables have a higher resistance than steel, often weighing less. Studies on the use of synthetic fibers in anchoring ropes have been intensified over the last few decades, so much so that in the mid-1980s the first attempts were made to use synthetic fibers in moorings. Creep is a long-term phenomenon, but it is not feasible to reproduce actual creep tests, as the lifespan of anchoring cables can exceed decades, which requires accelerated tests to verify the long-term behavior of the material. The Larson-Miller technique is one of the most widespread and used techniques for material life prediction. The technique consists in performing accelerated creep tests to determine the Larson-Miller constant and parameter. From these two data it is possible to estimate the rupture time of the material. After the tests and calculations of rupture time it was found that the Larson-Miller technique is efficient for calculating a time interval of rupture of the material.

Key words: HMPE - High modulus polyethylene. Offshore Anchorage. Larson-Miller. Fluency. Synthetic fibers

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução na profundidade de exploração de petróleo.	16
Figura 2.1 - Ancoragem catenária x taut-leg.	25
Figura 2.2 - Amarra de elo com malhete	27
Figura 2.3 - Cabo de aço.....	27
Figura 2.4 - Estrutura do cabo de ancoragem	28
Figura 2.5 - Orientação e cristalinidade para o HMPE.	30
Figura 2.6 - Cabo de HMPE	31
Figura 2.7 - Curva típica de fluência para o HMPE	32
Figura 2.8 - Parâmetro de Larson-Miller.....	34
Figura 2.9 - Constantes de Larson-Miller e Constante de Larson-Miller vs Tensão. .	35
Figura 3.1 - Corpo de prova para ensaio de fluência.	39
Figura 4.1 - Curva de ensaios de fluência a 40% de YBL	43
Figura 4.2 - Curva de ensaios de fluência a 50% de YBL.	44
Figura 4.3 - Curva de ensaios de fluência a 70 de YBL.	45
Figura 4.4 - Constantes de Larson-Miller em função da % de YBL.....	46
Figura 4.5 - Parâmetros de Larson-Miller em função da % de YBL.	48
Figura 4.6 - Máquina de ensaio de fluência a altas temperaturas	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Temperatura de fusão e vítrea para alguns materiais poliméricos	23
Tabela 2.2 - Propriedades nominal de fibras de HMPE.	29
Tabela 3.3 - Ensaio preliminares	38
Tabela 3.4 - % de YBL e Temperaturas utilizadas nos ensaios	39
Tabela 4.5 - Hold time (t_r) e Log de t_r para 40% de YBL.	42
Tabela 4.6 - <i>Hold time</i> para 50% de YBL.	44
Tabela 4.7 - Hold time para 70% de YBL.	45
Tabela 4.8 - Tabela de valores da constante de Larson-Miller	46
Tabela 4.9 - Valores de Larson-Miller para 40% de YBL	47
Tabela 4.10 - Valores de Larson-Miller para 50% de YBL	47
Tabela 4.11 - Valores de Larson-Miller para 70% de YBL.	47
Tabela 4.12 - Médias de LM para diferentes % de YBL.	48
Tabela 4.13 - Dados para primeiro caso	49
Tabela 4.14 - Variações no tempo final de ruptura para 45% de YBL.....	50
Tabela 4.15 – Dados para o segundo caso.....	51
Tabela 4.16 - Variações no tempo final de ruptura para 30% de YBL.....	51
Tabela 4.17 – Resultados ensaios experimentais para comparação - 30% e 40% de YBL.	53
Tabela 5.18 - Comparação dos resultados.	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivo geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Polímeros.....	20
2.1.1	Polímeros Sintéticos.....	21
2.2	Comportamento Térmico dos Polímeros.....	22
2.3	Comportamento Mecânico dos Polímeros	23
2.4	Sistemas de Ancoragem	24
2.5	HMPE – Polietileno de alto peso molecular	29
2.6	Fluência em Materiais Poliméricos.....	31
2.7	Ensaio de Fluência.....	32
2.8	Métodos de Extrapolação de Dados	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Ensaio de Tração	38
3.2	Ensaio de Fluência.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5	CONCLUSÕES.....	54
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	56
7	BIBLIOGRAFIA.....	58

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, em boa parte dos projetos de engenharia, há utilização de materiais poliméricos, e na indústria *offshore* não é diferente. Cabos de aço são, cada vez mais, substituídos por cabos sintéticos, pois estes últimos apresentam uma série de características favoráveis no que diz respeito à amarração e ancoragem de plataformas de petróleo. No entanto, ainda há uma lacuna muito grande a ser preenchida no que diz respeito ao melhor conhecimento acerca de seu comportamento mecânico, em especial quando em casos de aplicações em ambientes severos, como é o caso de ancoragem de plataformas offshore.

Com o aumento das profundidades na exploração de petróleo, sistemas de ancoragem fixos foram sendo substituídos por sistemas flexíveis. A Figura 1.1 mostra a evolução na profundidade de exploração de petróleo ao longo dos últimos anos.

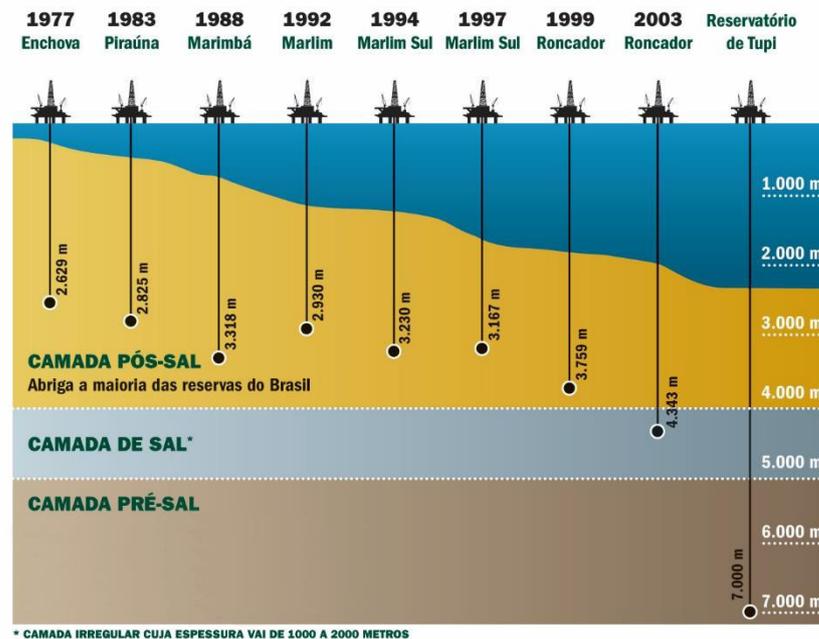


Figura 1.1 - Evolução na profundidade de exploração de petróleo.
Fonte: (www.agenciapetrobras.com.br)

A utilização de materiais sintéticos em substituição ao aço, mais precisamente nos cabos de ancoragem, torna as linhas flexíveis de amarração das plataformas de exploração de petróleo mais leves, visto que os materiais sintéticos utilizados nesta substituição possuem uma densidade muito menor que a do aço, que possui uma

massa específica em torno de $7,5 \text{ g/cm}^3$ contra os cerca de $0,9 \text{ g/cm}^3$ do Polietileno de alto módulo (HMPE), por exemplo.

A exploração de petróleo continua sendo uma atividade em amplo crescimento, além disso, continua sendo executado em lâminas d'água cada vez mais profundas. As plataformas de exploração de petróleo permanecem ancoradas por longos períodos de tempo e, em geral, os seus equipamentos e estruturas a bordo devem se manter em plenas condições de funcionamento por, pelo menos, 20 anos. Durante esse tempo de operação, a estrutura *offshore* é exposta às mais diversas intempéries causadas pelas condições ambientais severas do mar, e o sistema de ancoragem, que é composto basicamente por amarras, cabos e âncoras, fica em constante solicitação axial causada pelas condições ambientais do ambiente marítimo.

Fatores como temperatura, carga de trabalho e tempo de operação podem afetar consideravelmente o comportamento mecânico dos materiais poliméricos durante sua utilização. Sendo assim, não basta apenas o conhecimento das propriedades dos materiais utilizados nos cabos sintéticos, mas são também necessários estudos que, de maneira confiável, possam prever ou estimar o comportamento dos materiais quando submetidos a essas solicitações.

Com ensaios acelerados de fluência é possível que se obtenha informações de elevada importância acerca de deformações dos materiais ao longo do tempo. Além disso, são necessários ensaios acelerados para se obter os dados, pois, como já visto, a vida útil de alguns componentes dos sistemas de ancoragem ultrapassa décadas.

1.1 Justificativa

A utilização de cabos sintéticos na indústria *offshore* vem crescendo gradativamente e, por isso, são necessários estudos mais profundos acerca do comportamento mecânico desses materiais. A vida útil de cabos de ancoragem de materiais sintéticos ultrapassa décadas, e a fluência pode ocorrer nos cabos sintéticos mesmo a temperaturas relativamente baixas.

Uma análise do comportamento do material na temperatura e solicitação de operação levaria muito tempo, o que torna o ensaio real uma prática totalmente inviável. Essa impossibilidade justifica, por si só, a necessidade de realizar ensaios

acelerados, para que se tenha conhecimento a respeito das propriedades de longo prazo do material, como é o caso da fluência, e utilizar metodologias já conhecidas, para que se possa então determinar a vida útil do material ou seu comportamento a longo prazo das linhas de ancoragem.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a aplicação de uma técnica de obtenção do comportamento de longo prazo sob fluência de fios sintéticos a partir de ensaios no curto prazo. A técnica apresentada por LARSON e MILLER (1952), se utiliza de dados de ensaios de fluência a altas temperaturas para o cálculo analítico do tempo até a ruptura, também em fluência, a temperaturas mais baixas.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ - Realizar ensaios de tração a fim de caracterizar o material e, assim, definir sua carga de ruptura (YBL - *Yarn Break Load*);
- ✓ - Realizar ensaios de fluência em variadas cargas de ruptura (40% de YBL, 50% de YBL e 70% de YBL) com variação a diferentes temperaturas (40, 50, 60, 80 e 100°C);
- ✓ - Utilizar os dados dos ensaios para determinar as constantes e os parâmetros de Larson-Miller para cada % de YBL e extrapolar os dados utilizando a metodologia de Larson-Miller;
- ✓ - Estimar o tempo de ruptura para filamentos em temperaturas e % de YBL não ensaiados;

- ✓ - Realizar ensaios de fluência na mesma temperatura e % de YBL estimados para comparar os resultados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Polímeros

Polímeros podem ser definidos como sendo um material orgânico ou inorgânico com alta massa molar. Termos como massa molecular, peso molecular e massa molecular relativa também podem ser utilizados (CALLISTER, 2014). A palavra polímero vem do grego e foi criada em meados dos anos 1830, por Berzelius. *Poli* significa muitos e *mero* significa unidades de repetição. Assim, um polímero representa muitas unidades de repetição, ou seja, polímeros são macromoléculas compostas por milhares de moléculas, que são conhecidas por meros, os quais estão ligados com ligações covalentes. Dependendo o tipo de estrutura química, número de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, os polímeros podem ser divididos em Plásticos, Borrachas e Fibras (CANEVAROLO, 2002; MANO, 2004).

Não só a massa molar e a forma molecular influenciam nas características físicas dos polímeros, mas também as diferenças em sua estrutura molecular são responsáveis por essas características. O controle sobre as possibilidades estruturais é possível com técnicas de síntese dos polímeros. Polímeros lineares, ramificados, com ligações cruzadas e em rede são alguns tipos de estruturas (CALLISTER, 2012).

Os Polímeros Lineares são aqueles que estão dispostos em longas cadeias únicas e flexíveis onde suas unidades repetidas são ligadas entre si, de extremidade a extremidade. O polietileno, o cloreto de polivinila, o poliestireno, o náilon e os fluorocarbonos são exemplos de polímeros lineares (CALLISTER, 2012).

Os Polímeros Ramificados são aqueles que possuem cadeias laterais ligadas à cadeia principal. O polietileno de baixa massa específica (PEBD) é um exemplo de polímeros ramificados (CALLISTER, 2012).

Nos polímeros com Ligações Cruzadas, cadeias estão ligadas entre si, através de segmentos de cadeias unidos por fortes ligações covalentes. Podem ainda se subdividir em alta densidade de ligações cruzadas e baixa densidade de ligações cruzadas. A borracha, por exemplo, possui baixa densidade de ligações cruzadas, já os polímeros termorrígidos possuem alta densidade de ligações cruzadas. As ligações

cruzadas impedem o deslizamento livre das cadeias, amarrando uma cadeia a outra. (CANEVAROLO, 2012).

Polímeros em Rede são aqueles polímeros que possuem pelo menos três ligações covalentes ativas, formando redes tridimensionais. Um polímero que possui muitas ligações cruzadas pode ser considerado um polímero em rede.

2.1.1 Polímeros Sintéticos

Materiais sintéticos estão sendo cada vez mais utilizados por engenheiros e projetistas, e praticamente em todos os projetos executados na atualidade, há a utilização de algum material sintético, sejam eles na forma de resinas, borrachas ou outros tipos de polímeros. Um dos motivos da grande utilização desses materiais se deve ao fato de que com eles é possível que, em algumas vezes, se obtenha determinadas características específicas em alguns componentes para certas condições de trabalho. Polímeros sintéticos podem trazer, para certos tipos de aplicações, características que inexistem na natureza ou não que não sejam possíveis de obter diretamente na natureza.

De acordo com LE GAC, DAVIES e CHOQUEUSE (2015), com o aumento da produção *offshore* e profundidade de exploração, que hoje passam dos 4000 metros de profundidade, por mais que os polímeros “mais comuns” possuam as propriedades desejadas e necessárias para certos tipos de aplicações, em determinadas aplicações há uma exigência maior do material, devido a grandes profundidades, grandes pressões, bem como condições ambientais desfavoráveis, tais como temperatura e umidade. LE GAC, DAVIES e CHOQUEUSE (2015), ainda destacam a importância de efetuar testes acelerados nesses materiais para uso em aplicações como elementos estruturais e revestimento de isolamento térmico de fluxo de linhas, visto que os materiais são usados em aplicações que, geralmente, ultrapassam 20 anos de serviço.

2.2 Comportamento Térmico dos Polímeros

De acordo com CANEVAROLO (2002), os polímeros apresentam pelo menos três temperaturas de transição importantes: a temperatura de transição vítrea, a temperatura de fusão cristalina e a temperatura de cristalização.

De acordo com CALLISTER (2012), “A temperatura na qual o polímero apresenta a transição do estado borrachoso para o estado rígido é denominada temperatura de transição vítrea”. O fenômeno da transição vítrea ocorre nos polímeros amorfos e semicristalinos. CANEVAROLO (2002) ainda destaca que essa temperatura é um valor médio que ocorre a mobilidade das cadeias poliméricas na sua fase amorfa.

Quando se trata de fusão de um cristal polimérico, ocorre uma transformação de um material sólido para um material líquido viscoso, ou seja, as cadeias moleculares que antes eram ordenadas se transformam em uma estrutura altamente aleatória, que é a do sólido no estado líquido viscoso (CALLISTER, 2012). De modo geral, durante a fusão de um material polimérico, ocorre uma desorganização no estado molecular do material.

Segundo CANEVAROLO (2002), a temperatura de cristalização é uma faixa de temperatura intermediária em que ocorre a recristalização. Quando um polímero semicristalino é resfriado, após ser fundido acima da temperatura de fusão cristalina, sua temperatura vai diminuindo até que em certo ponto, em uma parte da massa que foi fundida, ocorre uma organização molecular, ou seja, suas cadeias começam a se organizar de forma regular possibilitando a formação de uma estrutura cristalina no ponto. Além disso, a cristalização pode ocorrer isotermicamente ou dinamicamente. Na primeira, a temperatura cai bruscamente até atingir um ponto em que a temperatura se estabiliza e ocorre toda a cristalização. Já na cristalização dinâmica, a temperatura diminui de maneira constante e a cristalização ocorre somente em uma faixa de temperatura.

As temperaturas de fusão e transição vítrea são parâmetros que devem ser levados em consideração quando se trabalha com polímeros. Elas definem, respectivamente, os limites máximos e mínimos de temperatura para determinadas aplicações.

A figura a seguir mostra as temperaturas de fusão e vítrea para alguns materiais poliméricos.

Tabela 2.1 - Temperatura de fusão e vítrea para alguns materiais poliméricos

Material	Temperatura de Transição Vítrea [°C(°F)]	Temperatura de Fusão [°C(°F)]
Polietileno (baixa massa específica)	-110 (-165)	115(240)
Politetrafluoroetileno	-97 (-140)	327 (620)
Polietileno (alta massa específica)	-90 (-130)	137 (279)
Polipropileno	-18 (0)	175 (347)
Náilon 6,6	57 (135)	265 (510)
Polietileno tereftalato	69 (155)	265 (510)
Cloreto de polivinila	87 (190)	212 (415)
Poliestireno	100 (212)	240 (465)
Polycarbonato	150 (300)	265 (510)

Fonte: Adaptado CALLISTER (2012).

2.3 Comportamento Mecânico dos Polímeros

As propriedades mecânicas de um material polimérico podem ser obtidas analisando a resposta do material às solicitações mecânicas. Essa resposta do material vai depender de alguns fatores importantes como tempo, temperatura e estrutura química do material.

O tempo que o material será solicitado é um fator de extrema relevância, pois ele pode definir o tipo de ensaio que está sendo feito. Por exemplo, ensaios muito rápidos, com tempos de duração de menos de 1 segundo, podem ser considerados ensaios de impacto, já os ensaios de longa duração podem ser utilizados para se obter a resposta do material à fluência e relaxação. Esses ensaios conseguem caracterizar o comportamento dos materiais em largas escalas de tempo.

Existem diferentes maneiras de se avaliar os materiais, como por exemplo estaticamente e dinamicamente. Somado a isso, de modo geral, os ensaios podem ser realizados com ou sem ruptura do material de prova. Alguns parâmetros como tensões de escoamento, tensão máxima e módulo de elasticidade podem ser obtidos antes da ruptura do material, já parâmetros como tensões e deformações de ruptura, ciclos de vida em fadiga, podem ser obtidos no limite destrutivo do material (CANAVEROLO, 2002).

A estrutura molecular de um polímero define a resposta dele quando solicitado em altas temperaturas, e seu comportamento em altas temperaturas pode ser classificado em termoplástico e termofixo (CALLISTER, 2014). De acordo com RUDIN e CHOI (2015), de modo geral, um polímero termoplástico pode amolecer (ou fluir) quando aquecido, no entanto, quando esfria, ele fica rígido e mantém a forma que estava quando aquecido. CALLISTER (2014) ainda ressalta que os polímeros termoplásticos têm uma dureza baixa, além disso, por ser um processo reversível, nos polímeros termoplásticos o processo de aquecer e resfriar pode ser repetido.

Ao contrário dos polímeros termoplásticos, os termofixos não amolecem ao serem aquecidos. Isso ocorre porque as ligações prendem as cadeias umas às outras, evitando que isso ocorra.

2.4 Sistemas de Ancoragem

Com a exploração de petróleo em águas cada vez mais profundas, tornou-se praticamente impossível a fixação de plataformas *offshore* por sistemas fixos ou rígidos (ALBRECHT 2005), visto que a exploração de petróleo hoje ultrapassa os 4000 metros de profundidade (LE GAC, DAVIES e CHOQUEUSE, 2015).

De modo geral, um sistema de ancoragem é o conjunto de linhas de ancoragem e suas âncoras e, por óbvio, sua função é manter a plataforma na sua posição correta, evitando o deslocamento excessivo da embarcação. Por sua vez, as linhas de ancoragem são compostas por amarras e cabos. Os cabos podem ser de aço ou podem ser de materiais sintéticos. O sistema de ancoragem precisa ser eficiente a ponto de suportar os esforços aos quais as embarcações estão submetidas, como por

exemplo, esforços causados pelas forças das ondas, dos ventos e da correnteza (ALBRECHT, 2005).

Segundo NARIÑO, MARTHA e DE MENEZES (2014), existem 2 tipos principais de sistemas de ancoragem: em catenária e em taut-leg.

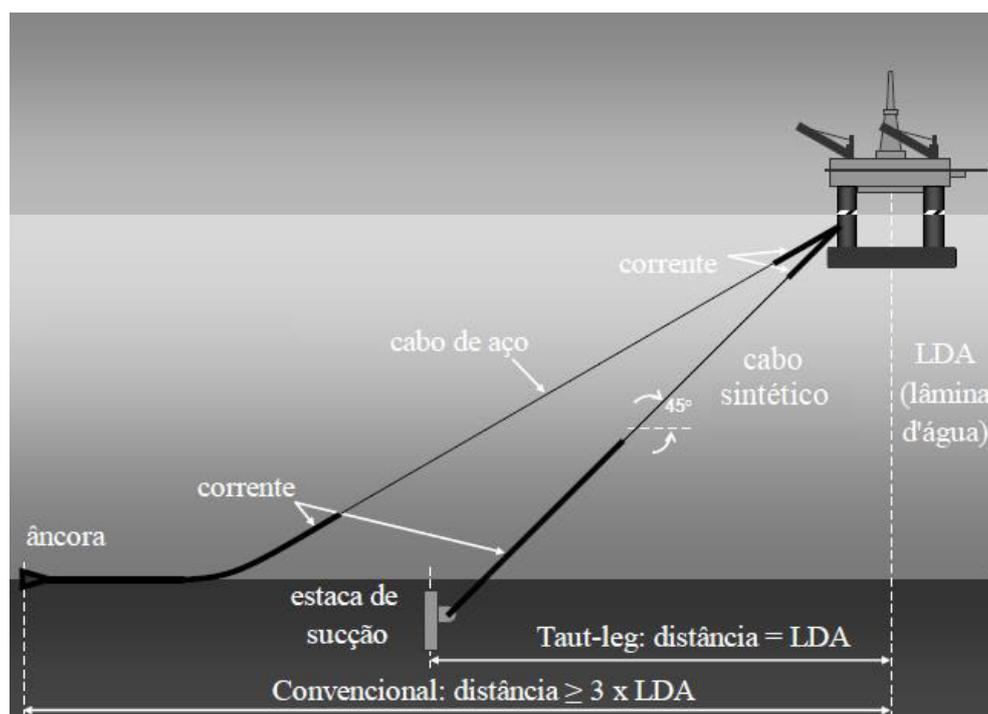


Figura 2.1 - Ancoragem catenária x taut-leg.
Fonte: Girón (2009) adaptada.

A ancoragem em catenária, tipo de ancoragem convencional, é utilizada em operações de perfuração e produção de petróleo e gás. Nesse tipo de ancoragem, devido ao seu raio de linha ser relativamente grande, o próprio trecho de linha contribui para que a estrutura fique na posição correta (ALBRECHT, 2005). KOCHER (2016) ainda destaca que o raio de linha pode chegar a 3 vezes a lâmina de água, ficando praticamente inviável esse tipo de ancoragem em lâminas de águas profundas, pois, devido ao peso da linha, são necessários guinchos mais potentes para manuseá-la. Além disso, pelo fato do raio ser amplo, ocorre o congestionamento de linhas de ancoragem no fundo do mar, dificultando que se tenha mais estruturas perto uma das outras.

A ancoragem em taut-leg possui as linhas tensionadas a 45° com a vertical, e esse tipo de ancoragem surge como alternativa à ancoragem em catenária. Com a

menor extensão horizontal, tende-se a evitar o congestionamento das linhas de ancoragem, diminuindo o tamanho das linhas, que são grandes desvantagens da ancoragem em catenária (NARIÑO, MARTHA e DE MENEZES, 2014).

De acordo com Lima (2011), existem 4 tipos principais de configurações de uma linha de ancoragem. Para utilização em águas rasas, ou seja, águas que não ultrapasse 100 metros de profundidade, é utilizado somente amarras. Para utilização em águas intermediárias é usada a configuração com cabos de aço junto com amarras, sendo maior parte da linha de cabos de aço. Em se tratando de águas profundas, com profundidades acima de 2000 metros, existe a necessidade de utilização de uma configuração de linha, com amarras e cabos sintéticos, ou ainda uma mesclagem com amarras, cabos sintéticos e cabos de aço. Fica claro que quanto maior a profundidade de operação, maior a necessidade de utilização de cabos sintéticos ou a mesclagem de sintéticos com cabos de aço. Isso é devido ao peso do cabo de aço ser muito superior ao dos cabos sintéticos, tornando, assim, totalmente inviável a utilização de cabos de aço em profundidades muito extremas.

Como já visto, linhas de ancoragem podem possuir diferentes configurações, como somente amarras, amarras e cabos de aço, amarras e cabos sintéticos ou amarras, cabos de aço e cabos sintéticos.

- a) Amarras: Pelo fato de as amarras serem mais resistentes ao manuseio, ao atrito, e, além disso, terem uma maior facilidade ao manusear-se com guinchos, geralmente elas ficam nos trechos iniciais e finais das linhas de ancoragem (ALBRECHT, 2005).

De modo geral, uma amarra é uma corrente contendo elos. São geralmente fabricadas de aço e são a parte mais simples da linha de ancoragem. De acordo com SECKLER (2011), amarras de elos com malhete são mais comumente utilizadas e, além disso, são projetadas em função de sua geometria, sendo suas medidas em função do diâmetro do elo da corrente. BICO (2013) ainda destaca que os malhetes, nas amarras que possuem elos de malhetes, impedem o entrelaçamento dos elos. A Figura 2.2 mostra a foto de uma amarra de elo com malhete.



Figura 2.2 - Amarra de elo com malhete
Fonte: (deno.oceanica.ufrj.br)

b) Cabos: Outro componente do sistema de ancoragem são os cabos. Como já visto, a linha de ancoragem pode ser composta por cabos de aço, cabos sintéticos ou cabos de aço e sintéticos.

b -1) Cabos de aço: Normalmente um cabo de aço é um elemento flexível formado por pernas e almas. As pernas são feitas com arames que são enrolados de forma helicoidal. Quando possui alma, as pernas envolvem a alma do cabo. Quando possuem uma perna, são denominados *single strand* e quando possuem mais de uma perna *multi strand* (LIMA 2011). A Figura 2.3 mostra as partes de um cabo de aço.

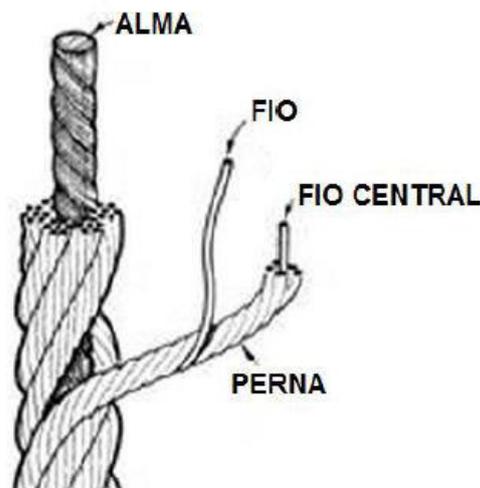


Figura 2.3 - Cabo de aço
Fonte: LIMA (2011)

Ainda de acordo com Albrecht (2005), existem dois tipos principais de cabos utilizados em sistemas flutuantes, *spiral strand* e *six strand*. Os cabos *spiral strand*

são mais resistentes e duráveis, quando comparados ao *six strand* e, quando encapados com uma camada plástica, aumentam ainda mais sua durabilidade. Por serem melhores em comparação aos cabos *six strand*, os cabos *spiral strand* possuem a desvantagem de serem mais caros. A vantagem dos cabos *six strand* é que são mais fáceis de manusear em relação aos *spiral strand*.

b – 2) Cabos Sintéticos:

Como já é sabido, cabos sintéticos apresentam inúmeras vantagens quando utilizados em amarrações *offshore*. O uso desses materiais sintéticos vem se tornando cada vez mais atraentes devido as suas melhores propriedades frente aos cabos de aço (LIAN, YUSHUN et al, 2015).

Os estudos acerca dessas fibras não são de agora. De acordo com LIAN, YUSHUN et al (2015), estudos relacionados à utilização dessas fibras remetem aos anos 1960. Ainda de acordo com LIAN, YUSHUN et al (2015), estudos vêm sendo conduzidos ao longo dos anos, para que se tenha um melhor conhecimento do comportamento desses materiais.

Como já se sabe, ao longo das últimas décadas, as fibras sintéticas vêm sendo vistas como uma alternativa para materiais de linhas de ancoragem, porém LIU, HAIXIAO et al, (2014) destacam a importância de estudos aprofundados acerca de seu comportamento frente à fluência.

A estrutura de um cabo sintético pode ser vista na figura a seguir.

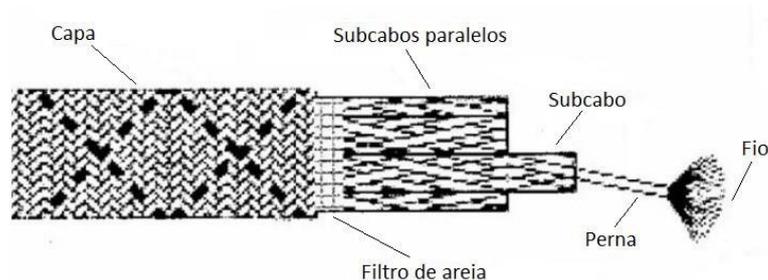


Figura 2.4 - Estrutura do cabo de ancoragem
Fonte: BICO (2013).

2.5 HMPE – Polietileno de alto peso molecular

De acordo DAVIES, et al (2011), um filamento de HMPE com diâmetro de 18,5 μm , possui módulo de elasticidade em torno de 109-132 GPa e resistência à tração em torno de 3300-3900 Mpa. Já um filamento de aramida, para que se tenha uma base de comparação com outro material utilizado em cabos de ancoragem, de diâmetro 12,5 μm , possui módulo de elasticidade da ordem de 70 GPa e uma resistência à tração de 3000 MPa. No entanto, mesmo apresentando um diâmetro maior que o filamento de aramida, sua densidade gira em torno de 0,98, enquanto a da aramida é cerca de 1,39.

Algumas propriedades do HMPE podem ser verificadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades nominal de fibras de HMPE.

PROPRIEDADES NOMINAL DE FIBRAS				
FIBRA	DENSIDADE	DIÂMETRO FILAMENTO (μm)	MÓDULO ELASTICIDADE (GPa)	STRENGTH (MPa)
HMPE	0,98	18,5	109-132	3300-3900

Fonte: (DAVIES, et al ,2011)

As fibras dos polímeros são constituídas de filamentos. Esses filamentos são constituídos de fases cristalinas (regiões que são altamente orientadas) e amorfas (regiões não estruturadas). VLASBLOM e BOSMAN (2006) destacam que a estrutura do HMPE é altamente cristalina e, além disso, são altamente orientadas, de modo que sua orientação chega a ser maior que 95% na mesma direção do eixo da fibra. MATTOS e CHIMISSO (2010) também destacam o alto grau de orientação molecular do HMPE e o alto grau de cristalino que chega a 85% e uma pequena parte amorfa.

HMPE
Orientação > 95%
Cristalinidade até 85%



Figura 2.5 - Orientação e cristalinidade para o HMPE.
Fonte: Adaptado (MATTOS, CHIMISSO (2010))

Cabos de fibras sintéticas de HMPE apresentam uma boa resistência à fadiga e à abrasão, mas também são uma ótima alternativa para cabos submetidos a cargas cíclicas (PASTERNAK, SHELTON e GILMORE, 2011). HEINS, MOZSGAI e TANZARELLA (2013) ainda destacam que cabos de ancoragem quando feitos com fibras sintéticas de HMPE conseguem resistência e rigidez similar à do aço e, ainda assim, possuem uma densidade menor que da água, representando uma significativa redução no peso da linha de ancoragem, sendo ainda uma fibra inerte podendo permanecer períodos consideráveis na água.

Cabos de ancoragem fabricados com fibras de HMPE reúnem características importantes e por isso são uma alternativa não só para substituição aos cabos de aço, mas também aos cabos de outras fibras sintéticas, como poliéster. Baixo peso, menor diâmetro, maior rigidez, melhor comportamento a longo prazo como resistência à fadiga e resistência à radiação UV são características bastante atraentes deste material (VLASBLOM e BOSMAN, 2006). A Figura 2.6 mostra um cabo feito com fibras de HMPE.



Figura 2.6 - Cabo de HMPE
Fonte: LEITE (2011)

2.6 Fluência em Materiais Poliméricos

Grande parte dos polímeros sofrem deformações dependentes do tempo, mesmo que a tensão aplicada ao corpo continue constante. CALLISTER (2014) define essas deformações como sendo *fluência viscoelástica* e tal fenômeno pode ocorrer nos materiais poliméricos mesmo à temperatura ambiente.

Cabos de ancoragem feitos com fibras de HMPE quando submetidos a uma carga constante se alongam, e se submetidos a carga e temperatura, podem mostrar um alongamento irreversível. VLASBLOM e BOSMAN (2006) mostram que a curva típica de fluência para HMPE possui as típicas 3 fases de uma curva de fluência. Fluência primária, fluência secundária e fluência terciária como pode ser visto na Figura 2.7.

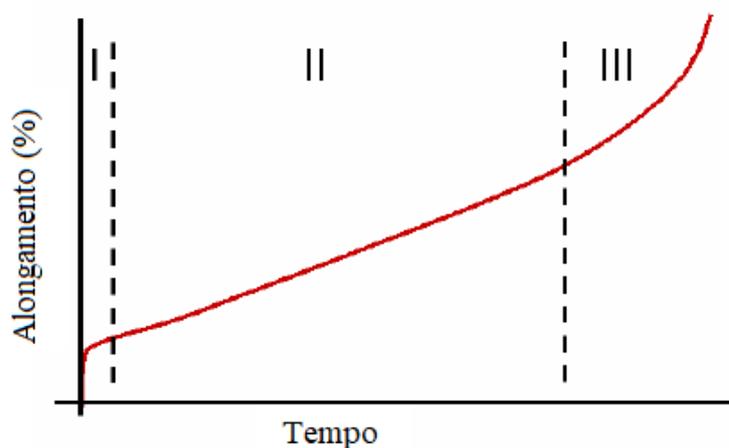


Figura 2.7 - Curva típica de fluência para o HMPE

Fonte: Adaptado (VLASBLOM E BOSMAN, 2006)

Conforme VLASBLOM e BOSMAN (2006), a fluência primária é caracterizada pelo alongamento reversível. Já na fluência secundária ocorre o deslizamento das moléculas, a taxa de fluência tem um leve aumento e o alongamento é irreversível. CALLISTER (2012) ainda destaca que na fase secundária de fluência, conhecida também como estacionária, a taxa de fluência é constante de modo que a curva do estágio 2 se torna praticamente linear. Na fluência terciária ocorre a quebra das moléculas, aceleração da taxa de fluência e ocorre o rompimento do material.

2.7 Ensaio de Fluência

A fluência em um material pode ser avaliada submetendo um corpo de prova do material a um esforço de tração, com carregamento e temperatura constantes. De acordo com SMITH, HASHEMI (2013), é através do ensaio de fluência que é possível determinar os efeitos da temperatura e da tensão sobre a taxa de fluência. De modo geral em um ensaio de fluência, um corpo de prova é submetido a um esforço de tração com temperatura e carga controladas. Geralmente os ensaios são feitos com uma temperatura constante e variando a carga aplicada, ou, com a carga constante e várias temperaturas. SMITH, HASHEMI (2013), ainda destaca que o ensaio de

fluência pode ser feito até a ruptura do material, ou seja, o ensaio de fluência pode ser feito com ou sem a ruptura do material.

Os ensaios de fluência necessitam de um severo controle de temperatura. JONES e ASHBY (2001) afirmam o tempo é inversamente proporcional a carga e temperatura, ou seja, conforme a temperatura e carga aumentam o tempo de ensaio tende a diminuir.

2.8 Métodos de Extrapolação de Dados

Tratando-se de fluência, existe a necessidade de se obter resultados cujos experimentos são impraticáveis em condições normais em laboratórios, uma vez que para conhecer o comportamento de longo prazo do material seriam necessários ensaios com, muitas vezes, anos de duração. Por esse motivo é que existe a necessidade de utilização de ensaios acelerados, em que o corpo de prova é submetido a uma temperatura alta, além daquela de operação, para que então possa se analisar seu comportamento. Posteriormente, os dados obtidos são extrapolados para as temperaturas de interesse (CALLISTER, 2014).

O método de Larson-Miller (LARSON e MILLER (1952)), é o método de extrapolação de dados mais utilizado em casos de fluência (CASTRO, 2009). Ele relaciona tensão, temperatura e tempo de ruptura por fluência, de modo que é possível estimar a vida útil do material, desde que se saiba a tensão e a temperatura a que o material está submetido nas condições de serviço (WINCK, 2009). De acordo com MORETO (2008), o método de Larson-Miller “considera a convergência das retas de isotensão em um ponto do eixo das ordenadas”.

Ou seja, a constante de Larson-Miller pode ser determinada com a intersecção das linhas de tensão com o eixo vertical ($\ln t_f$, onde t_f é o tempo de ruptura do ensaio), mantendo a tensão constante e variando a temperatura do ensaio, conforme é indicado na Figura 2.8.

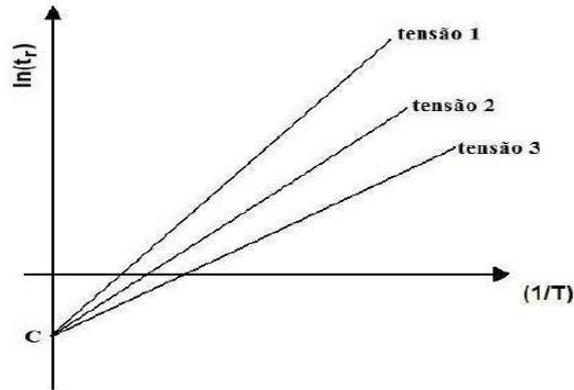


Figura 2.8 - Parâmetro de Larson-Miller
Fonte: (WINCK, 2009).

Ao analisar a Figura 2.8, se for considerado que a constante C é constante para cada material (o que, de fato, é feito na literatura (CALLISTER (2014))), todas as linhas de isotensão deveriam interceptar o eixo vertical ($\ln t_r$) no mesmo ponto, o que não acontece na prática.

Apesar da extrapolação de dados pelo método de Larson-Miller estar entre os mais utilizados, na grande maioria das vezes, ele é muito utilizado para prever a vida sob fluência de metais. Existe uma certa carência de dados da utilização da metodologia de Larson-Miller para polímeros. É preciso verificar através de ensaios se, para materiais poliméricos, a constante C é variável ou um valor constante.

GHATAK e ROBI (2016) destacam em seu trabalho de verificação do valor da constante C de Larson-Miller, para o aço HP40Nb micro-ligado, que na prática, esse valor não é constante, e sim uma função da tensão. Como pode ser visto na Figura 2.9.

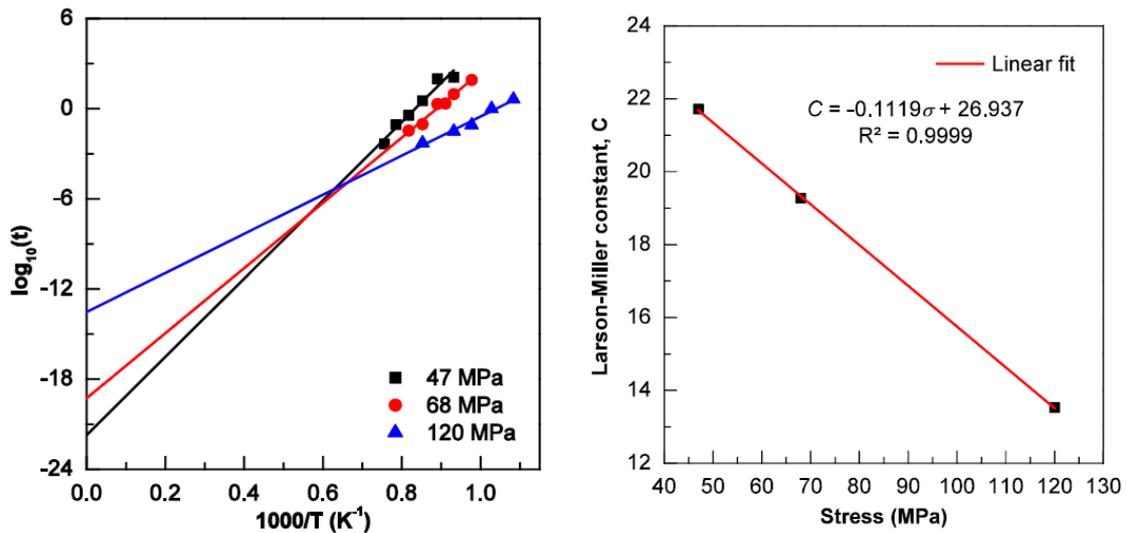


Figura 2.9 - Constantes de Larson-Miller e Constante de Larson-Miller vs Tensão.
Fonte: GHATAK, ROBI (2016)

Parâmetro de Larson-Miller

Conforme WINCK (2009) destaca, “O parâmetro de Larson-Miller é deduzido a partir da dependência da taxa de fluência com a tensão e temperatura”. Ou seja, a partir das equações das taxas de fluência, o parâmetro de Larson-Miller é deduzido.

Ainda de acordo com WINCK (2009), a taxa de fluência é dada por:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad 2.1$$

Sendo $\dot{\epsilon}$ a taxa de fluência, $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$, A a constante do material, Q a energia de ativação para processo de fluência, R a constante dos gases, T a temperatura em unidades absoluta e t tempo.

Como a taxa de fluência é dada por $\dot{\epsilon} = \frac{1}{t_f}$, a equação 2.1 da taxa de fluência pode ser reescrita:

$$\frac{1}{t_f} = A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad 2.2$$

De modo que a equação 2.2 relaciona tempo e temperatura em fluência.

Aplicando logaritmo na equação 2.2 tem-se:

$$\ln\left(\frac{1}{t_f}\right) = \ln\left(A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)\right) \quad 2.3$$

Aplicando as propriedades dos logaritmos na parte $\ln\left(A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)\right)$ da equação 2.3, tem-se:

$$\ln\left(\frac{1}{t_f}\right) = \ln(A) - \ln\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad 2.4$$

Novamente aplicando as propriedades dos logaritmos, dessa vez na parte $\ln\left(\frac{1}{t_f}\right)$ da equação 2.4, tem-se:

$$\ln(t_f) = \left(\frac{Q}{R}\right)\frac{1}{T} - \ln(A) \quad 2.5$$

Nota-se que a equação 2.5 é equação de uma reta escrita na sua forma reduzida.

Lembrando que a equação da reta em sua forma reduzida é escrita na forma:

$$y = mx + n. \quad 2.6$$

Onde m é o coeficiente angular da reta ou declividade e n é o coeficiente linear da reta.

Logo, a declividade da reta da equação 2.5 que é $\left(\frac{Q}{R}\right)$ é o parâmetro de Larson-Miller e seu coeficiente linear ($\ln(A)$), que é onde a reta corta o eixo das ordenadas ($\ln(t_f)$), é a constante de Larson-Miller C, como mostrado anteriormente na Figura 2.8.

Por fim, pode se reescrever a equação 2.5 na sua forma mais tradicional para o parâmetro de Larson-Miller.

$$LM = T(C + \log t_f) \quad 2.7$$

Pelo fato de os valores de LM serem valores altos, que de acordo com CALLISER (2014) chegam a 24 mil para liga S-590, a equação 2.7 pode também ser escrita na forma:

$$LM = \frac{T(C + \log t_r)}{1000} \quad 2.8$$

Onde LM é o parâmetro de Larson-Miller, T é a temperatura a que o componente foi submetido, em Kelvin. e t_f é o tempo de vida até a ruptura, em horas.

Com a equação 2.8 é possível que o tempo de ruptura do material possa ser estimado, desde que se conheça a carga e temperatura em que o material estará submetido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho utilizou como corpos de prova multifilamento de HMPE. Ensaio preliminares foram feitos para que fosse possível a determinação da força de ruptura (YLB) média de fios deste material, de acordo com a Norma ASTM D885. Na sequência, foram feitos ensaios de fluência em altas temperaturas para assim estimar os valores das constantes Larson-Miller para o material.

De posse dos dados dos ensaios e com os valores das constantes, pode-se então calcular o parâmetro de Larson-Miller. Com a curva dos parâmetros de Larson-Miller, a estimativa de vida em fluência do material, utilizando a metodologia de Larson-Miller, pode ser calculada.

3.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi utilizado para que se possa determinar a resistência à tração média dos multifilamentos de HMPE. O equipamento utilizado para esse ensaio foi uma máquina de ensaios universal eletromecânica INSTRON 3365 com célula de carga de +- 1kN. De acordo com a Norma ASTM D885, uma vez o corpo de prova fixado no equipamento, uma pré carga de 1N é aplicada e, após a rampa de carregamento, a carga é aplicada ao corpo de prova até que o mesmo rompa. Ao todo foram realizados ensaios em 30 corpos de prova. A média e o desvio padrão dos ensaios é mostrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Ensaio preliminares

Corpo de Prova	Carregamento Máximo [N]	Alongamento [mm]	Tensão [%]
Média	487.53574	21.03592	4.20718
Desvio padrão	18.98855	0.84580	0.16916

Com os dados dos ensaios preliminares, pode-se então chegar na carga média de ruptura do material, 487.53 N. Essa força é utilizada como referência de carga de ruptura (YBL).

3.2 Ensaio de Fluência

Para a realização dos ensaios de fluência foi utilizada uma máquina de ensaios eletromecânica INSTRON 5969 com célula de Carga de +- 10kN, utilizando temperatura e força fixas. Os corpos de prova para os ensaios de fluência possuem 250 mm de comprimento e têm extremidades do tipo *sanduche* (Figura 3.1). As cargas e temperaturas utilizadas nos ensaios podem ser vista na Tabela 3.4.

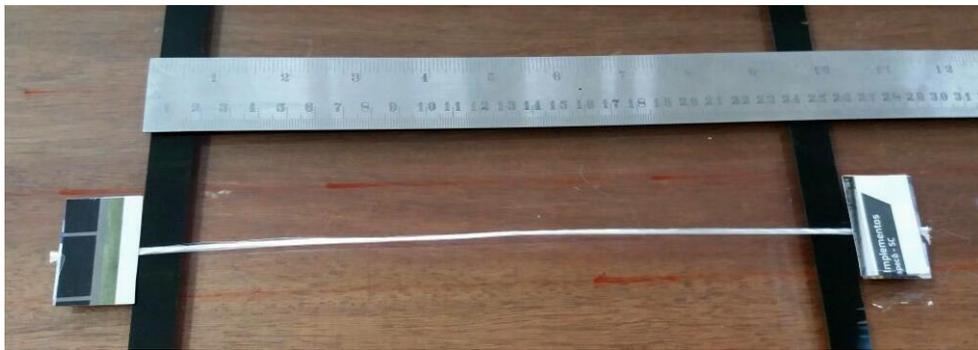


Figura 3.1 - Corpo de prova para ensaio de fluência.

Tabela 3.4 - % de YBL e Temperaturas utilizadas nos ensaios

% de YBL	Temperatura do Ensaio (°C)
40	40, 50, 60, 80 e 100
50	40, 50, 60, 80 e 100
70	40, 50, 60, 70 e 80

Os ensaios foram realizados mantendo constantes a carga de ruptura (% de YBL) e a temperatura. Como pode ser visto na Tabela 3.4, o primeiro ensaio foi com carga de ruptura de 40%YBL e temperatura de 100°C. Em seguida, foi realizado o ensaio a 40% da carga de ruptura e temperatura de 80°C. Os demais ensaios foram realizados de maneira similar, sempre mantendo constantes a carga de ruptura e temperatura do ensaio.

Para os ensaios a 70% de YBL, constatou-se que a 100°C o *hold time* (período ao longo do ensaio de fluência durante o qual a força axial é mantida constante,

prolongando-se até o rompimento do corpo de prova) não era alcançado. Por esse motivo, os ensaios para 70%YBL foram feitos a 40, 50, 60, 70 e 80°C, enquanto os ensaios a 40 e 50%YBL, foram feitos a 40, 50, 60, 80 e 100°C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizados os ensaios, foi calculado o logaritmo do tempo total ocorrido em situação de *hold*. Os dados dos tempos e dos logaritmos para cada % de YBL constam nas Tabela 4.5, Tabela 4.6 e Tabela 4.7.

40% de YBL

Como visto na Tabela 3.4, para os ensaios de 40% de YBL, foi mantida fixa a força de 40%YBL e foi feito o ensaio à temperatura de 100°C. Para os seguintes ensaios a temperatura foi de 80°C, 60°C, 50°C e 40°C, respectivamente. O *hold time* dos ensaios a 40% de YBL pode ser observado na Tabela 4.5. Para determinação da constante C de Larson-Miller para 40% de YBL é necessário que sejam calculados os logaritmos dos *hold times*, o que pode ser visto na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Hold time (t_f) e Log de t_f para 40% de YBL.

YBL (40%)	Temperatura				
	100°C	80°C	60°C	50°C	40°C
t_f [h]	0,0415	0,6781	8,5544	36,1333	180,7763
Log t_f	-1,3822	-0,1687	0,9322	1,5579	2,2571

Com os dados dos logaritmos e as temperaturas dos ensaios é possível montar a curva para determinação da constante C para 40% de YBL. A Figura 4.1 mostra a curva para os ensaios de fluência a 40% de YBL, onde a temperatura está em Kelvin e T_f é o *hold time* medido no ensaio.

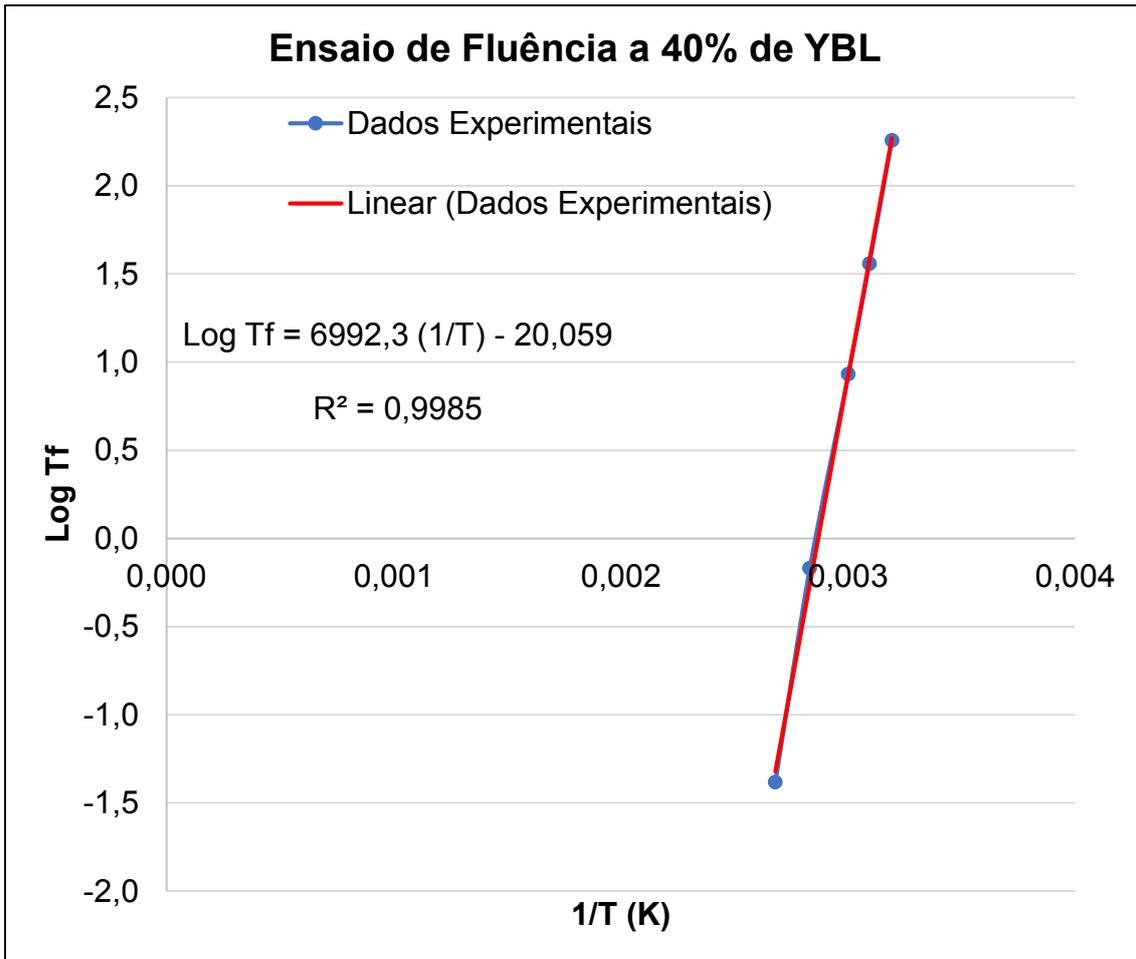


Figura 4.1 - Curva de ensaios de fluência a 40% de YBL

Com base na equação da curva é possível que seja estimado o valor de C para este valor de força, lembrando que o valor negativo da constante pode ser obtido na intersecção da reta com o eixo da ordenada ($\text{Log } T_f$).

A equação da reta ajustada é $\log T_f = 6992,3(1/T) - 20,059$, o que significa que quando $(1/T)$, o valor da constante de Larson-Miller para 40% de YBL é $-C_{40\%YBL} = -20,059$.

50% de YBL

O *Hold time* dos ensaios a 50% de YBL pode observado na Tabela 4.6 juntamente com os seus logaritmos. A Figura 4.2 mostra a curva para os ensaios de fluência a 50% de YBL

Tabela 4.6 - Hold time para 50% de YBL.

YBL (50%)	Temperatura				
	100°C	80°C	60°C	50°C	40°C
t_f [h]	0,0048	0,1628	1,4409	7,4483	27,5035
Log t_f	-2,3200	-0,7884	0,1586	0,8721	1,4394

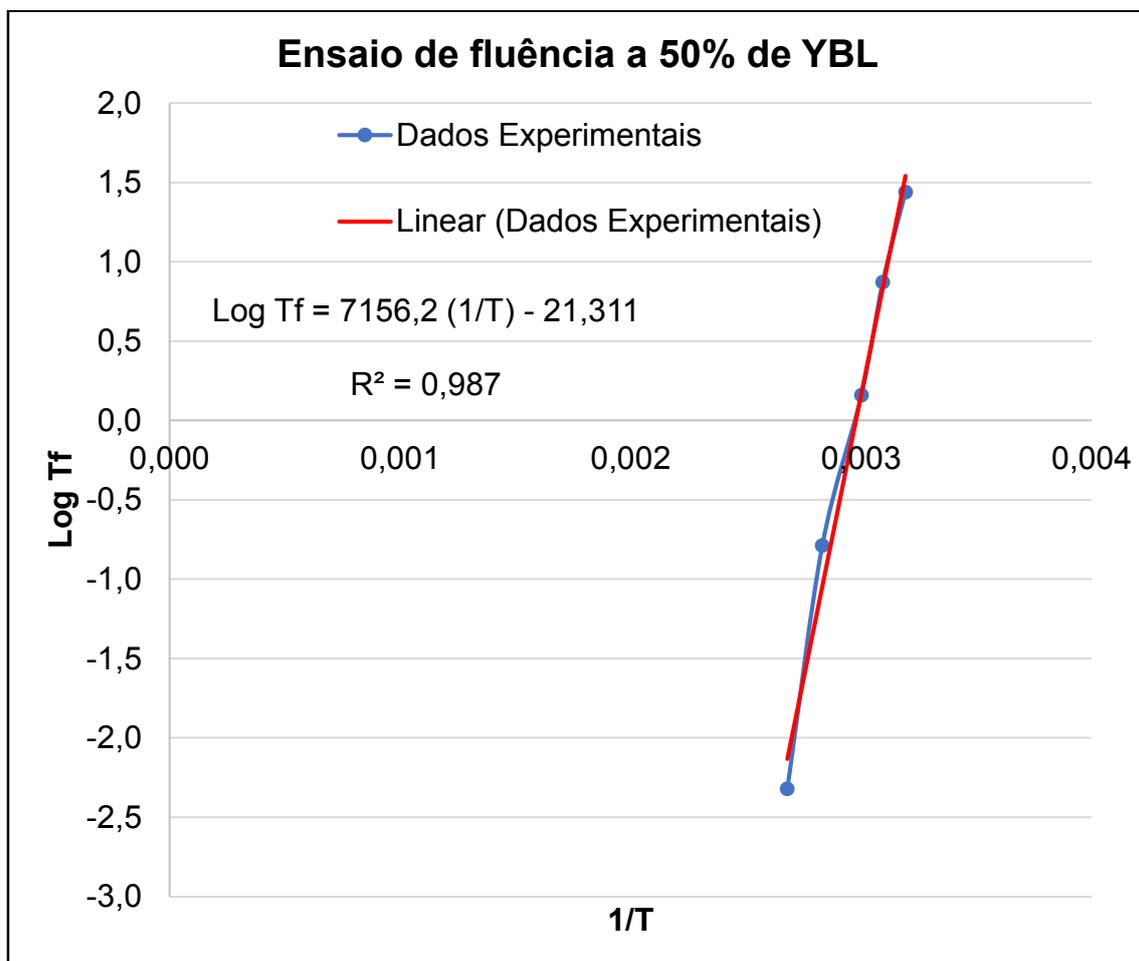


Figura 4.2 - Curva de ensaios de fluência a 50% de YBL.

Analisando a equação da curva ajustada para os ensaios a 50% de YBL é então possível estimar o valor da constante C de Larson-Miller para 50% de YBL:

$$-C_{50\%YBL} = -21,311.$$

70% de YBL

O *Hold time* e seus logaritmos dos ensaios à 70% de YBL podem ser observados na Tabela 4.7 e a Figura 4.3 mostra a curva do ensaio de fluência para 70% de YBL.

Tabela 4.7 - Hold time para 70% de YBL.

YBL (70%)	Temperatura				
	80°C	70°C	60°C	50°C	40°C
t_f [h]	0,0035	0,0439	0,0944	0,6165	1,7490
Log t_f	-2,4509	-1,3571	-1,0252	-0,2101	0,2428

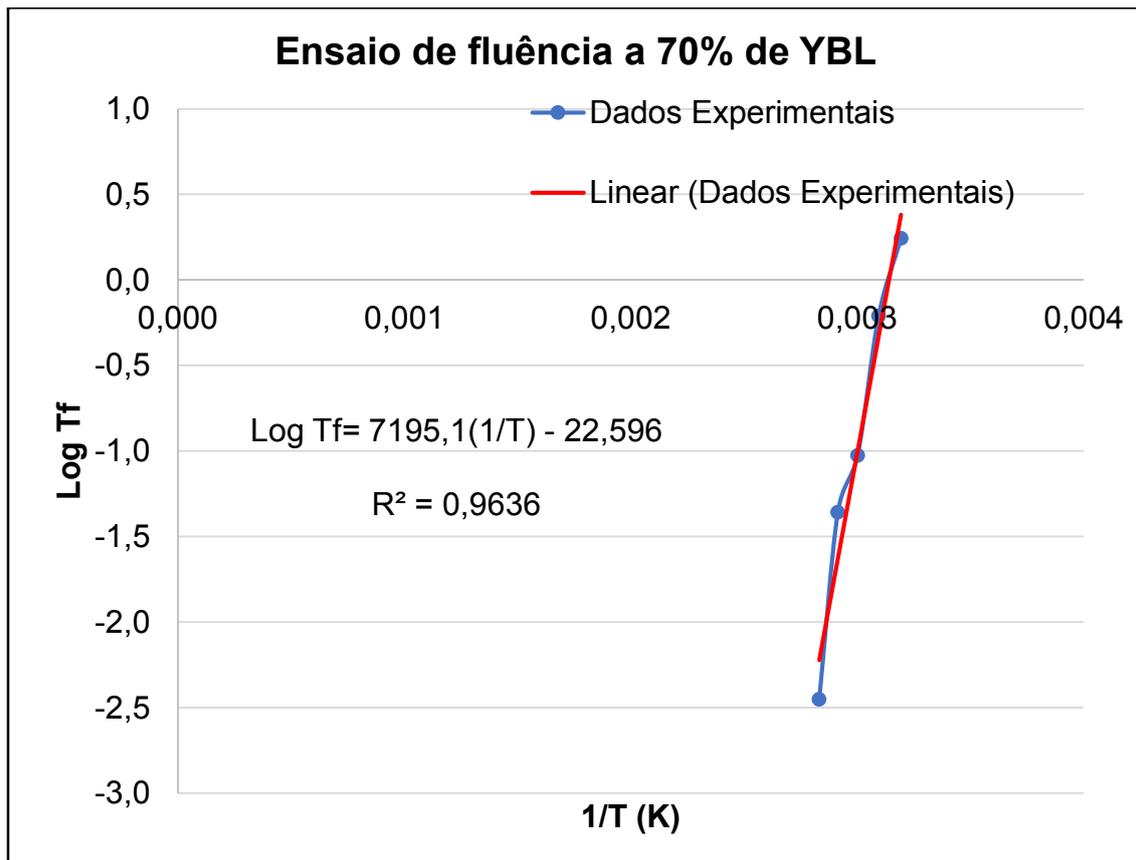


Figura 4.3 - Curva de ensaios de fluência a 70 de YBL.

A equação da reta é ajustada como $\log T_f = 7195,1(1/T) - 21,596$, o que significa que $-C_{70\%YBL} = -22,596$.

Depois de calculados os valores das constantes, os resultados podem ser vistos na Tabela 4.8, e colocando-os em maneira gráfica, em função da força aplicada em fluência, chegamos à Figura 4.14.

Tabela 4.8 - Tabela de valores da constante de Larson-Miller

YBL	40%	50%	70%
C	20,059	21,311	22,596

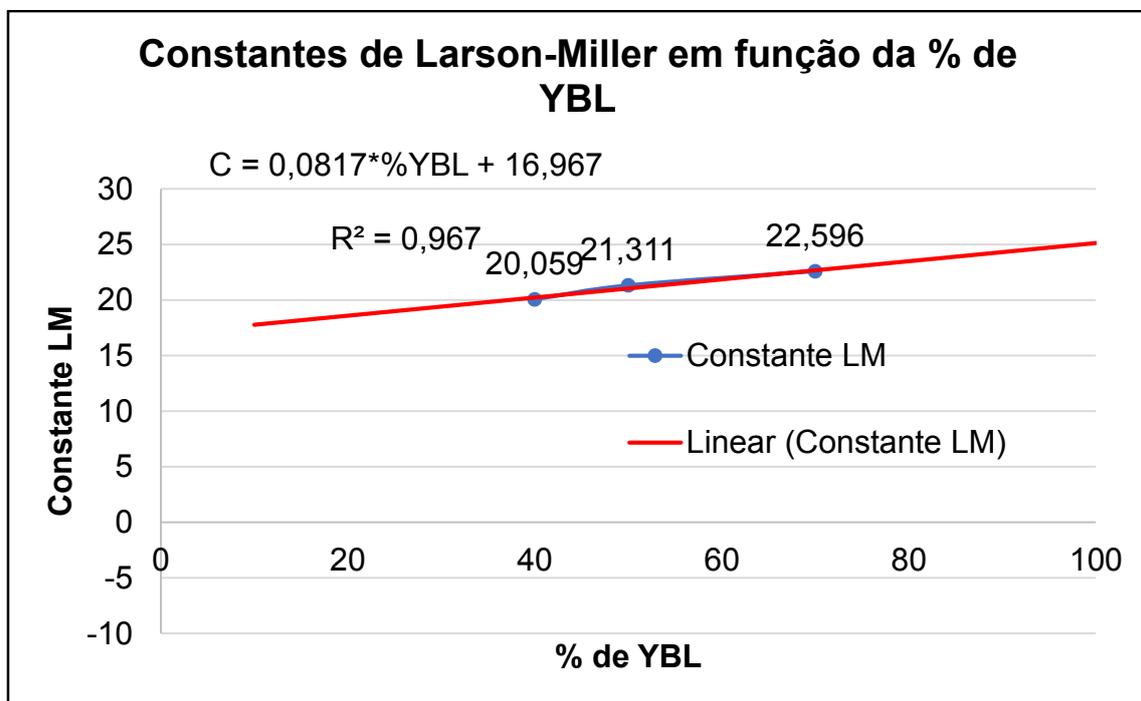


Figura 4.4 - Constantes de Larson-Miller em função da % de YBL.

Com os dados das constantes disponíveis pode-se então calcular os valores dos parâmetros de Larson-Miller para as % de YBL ensaiadas utilizando-se a equação 2.8. Para 40% de YBL e temperaturas que vão de 40°C a 100°C, os valores de Larson-Miller (LM) podem ser vistos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Valores de Larson-Miller para 40% de YBL

40%YBL --C40% = 20,059				
T [°C]	T [K]	T_f [h]	$\log T_f$	LM
40	313,15	180,7763	2,2571	6,9883
50	323,15	36,1333	1,5579	6,9855
60	333,15	8,5544	0,9322	6,9932
80	353,15	0,6781	-0,1687	7,0243
100	373,15	0,0415	-1,3822	6,9693

Para 50% de YBL e temperaturas que vão de 40 a 100°C, os valores de Larson-Miller (LM) podem ser vistos na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Valores de Larson-Miller para 50% de YBL

50%YBL -- C50%=21,311				
T [°C]	T [K]	T_f [h]	$\log T_f$	LM
40	313,15	27,5035	1,4394	7,1243
50	323,15	7,4483	0,8721	7,1685
60	333,15	1,4409	0,1586	7,1526
80	353,15	0,1628	-0,7884	7,2476
100	373,15	0,0048	-2,3200	7,0865

Para 70% de YBL e temperaturas que vão de 40 a 80°C, os valores de Larson-Miller (LM) podem ser vistos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Valores de Larson-Miller para 70% de YBL.

70%YBL -- C70%=22,596				
T [°C]	T [K]	T_f [h]	$\log T_f$	LM
40	313,15	1,7490	0,2428	7,1520
50	323,15	0,6165	-0,2101	7,2340
60	333,15	0,0944	-1,0252	7,1863
70	343,15	0,0439	-1,3571	7,2881
80	353,15	0,0035	-2,4509	7,1142

Ao analisar os valores dos parâmetros LM para cada % de YBL, nota-se que não há grande variação no seu valor para uma mesma % de YBL, ou seja, o valor de

LM para cada % de YBL pode ser aproximado pelas médias dos parâmetros, o que pode ser visto na tabela a seguir (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 - Médias de LM para diferentes % de YBL.

% de YBL	Média de LM
40	6,9921
50	7,1559
70	7,1949

Com os dados das médias é possível então montar a curva que descreve os valores dos parâmetros de Larson-Miller em função da % de YBL.

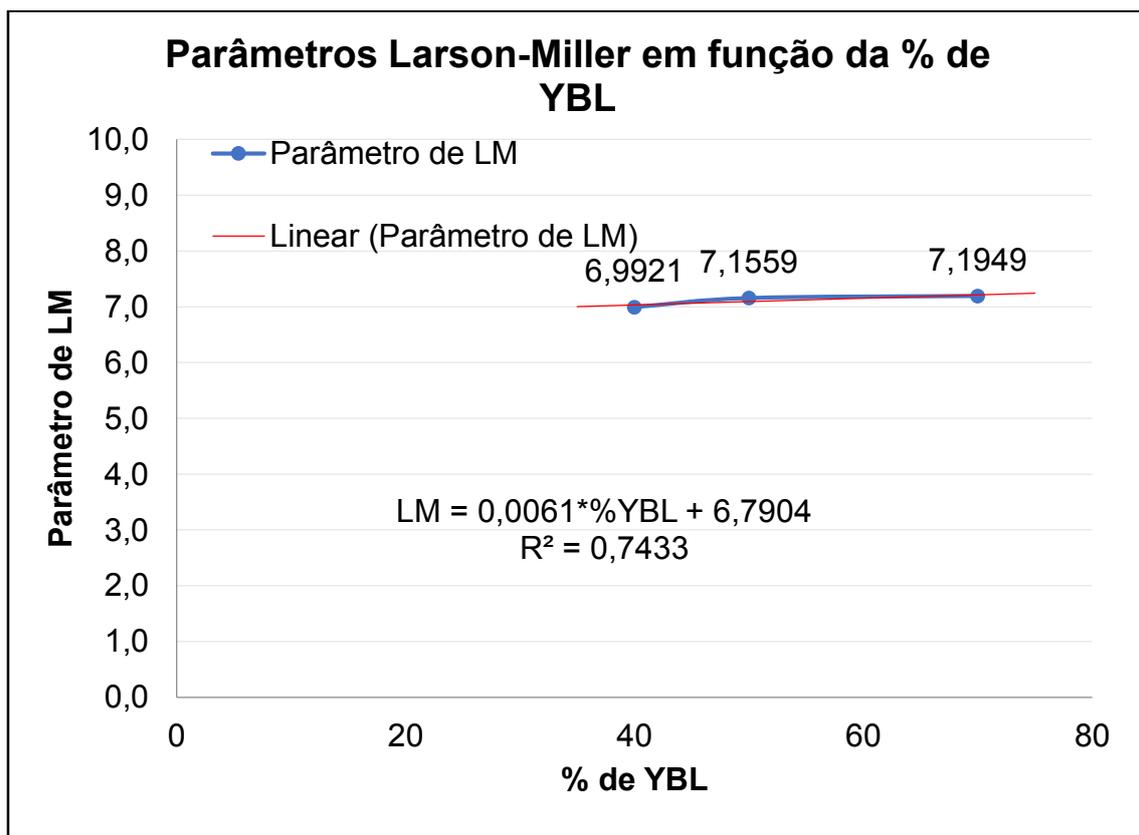


Figura 4.5 - Parâmetros de Larson-Miller em função da % de YBL.

De posse de todos os dados dos ensaios de fluência realizados, foi possível então montar as duas curvas necessárias para fazer a extrapolação de dados através da metodologia pretendida. As duas curvas, da Figura 4.4 e da Figura 4.5, fornecem, respectivamente, os valores das constantes e dos parâmetros de Larson-Miller em função da carga de ruptura, de modo que, sabendo a carga e a temperatura a que o material estará em operação, será possível estimar o tempo de ruptura do material.

Com o objetivo de validar os resultados obtidos foram feitos dois ensaios acelerados para comparar os resultados obtidos nos experimentos com os obtidos pelo método de Larson-Miller.

Uso do Método de Larson-Miller

O uso do método funciona da seguinte forma:

- 1) É definida uma carga de operação para o material, em % de YBL, e é definida a temperatura de operação;
- 2) Com as curvas da Figura 4.4 e da Figura 4.5, se extrai valores da constante e dos parâmetros de Larson-Miller para os dados de operação;
- 3) De posse da constante C e parâmetro LM, a equação 2.8 é utilizada, ficando apenas com T_f como variável indefinida e, sendo assim, o valor de T_f (tempo de ruptura) pode ser estimado.

1ª Caso:

O primeiro caso analisado foi feito utilizando os dados da Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Dados para primeiro caso

% de Carga utilizada	Temperatura do ensaio
45	40°C

Utilizando a equação da Figura 4.4, obtém-se o valor da constante para carga de ruptura e temperatura selecionadas: $C_{45\%} = 20,6435$. Para ser determinado o valor do parâmetro LM foi utilizada a equação da Figura 4.5: $LM_{45\%} = 7,0649$. Por fim, de posse da constante e do parâmetro LM, é utilizada a equação de Larson-Miller,

equação 2.8, para calcular o tempo de ruptura estimado para 45% de YBL e 40°C (313,15 K). Logo, tem-se:

$$\log t_f = 1,9173$$

$$t_f = 82,65 \text{ horas}$$

Utilizando a metodologia, nota-se que uma pequena variação no parâmetro de Larson-Miller retorna uma grande variação no valor do tempo de ruptura do material (t_f). Com base nisso, é conveniente que não se estipule um valor final de tempo para ruptura do material ao utilizar a metodologia, mas sim um intervalo de tempo para possibilidade de tempo de ruptura.

Na Tabela 4.14 é possível notar as variações no resultado do tempo final com pequenas variações no parâmetro LM. A linha 2 mostra os valores nominais calculados pela metodologia.

Tabela 4.14 - Variações no tempo final de ruptura para 45% de YBL.

	Parâmetro de LM	Log t_f	t_f [h]
1	7,0295	1,8042	63,61
<u>2</u>	<u>7,0649</u>	<u>1,9173</u>	<u>82,65</u>
3	7,1002	2,0300	107,15

Nota-se que variações muito pequenas, em torno de 0,5% no valor do parâmetro de Larson-Miller, representam variações que chegam a ser superiores a 20 horas no valor do tempo final de 45% de YBL, por isso é conveniente estipular uma faixa de valores de tempo em que o método é viável.

Considerando o parâmetro de Larson-Miller na faixa de 7,0295 a 7,1002, ou seja, 0,5% para mais e para menos, pode-se então estimar que o material irá romper entre **63,61 a 107,15 horas** se submetido a um ensaio de fluência a 45%YBL a 40°C.

2ª Caso.

O segundo caso analisado foi feito utilizando os dados da Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Dados para o segundo caso.

% de Carga utilizada	Temperatura do ensaio
30	40°C

Da mesma forma que foi feito para 45% de YBL, utilizando a equação da Figura 4.4, obtém-se o valor da constante para carga de ruptura e temperatura selecionadas: $C_{30\%} = 19,4180$. Para ser determinado o valor do parâmetro LM foi utilizada a equação da Figura 4.5: $LM_{30\%} = 6,9734$. Por fim, utilizando a equação de Larson-Miller para calcular o tempo de ruptura estimado para 30% de YBL e 40°C (313,15 K), tem-se:

$$\log t_f = 2,8506$$

$$t_f = 708,86 \text{ horas}$$

Da mesma forma que para 45% de YBL, utilizando a metodologia para 30% de YBL, nota-se também que uma pequena variação no parâmetro de Larson-Miller retorna uma grande variação no valor do tempo de ruptura do material (t_f). Logo, é conveniente que não se estipule um valor final de tempo para ruptura do material ao utilizar a metodologia, mas sim um intervalo de tempo para possibilidade de tempo de ruptura.

Na Tabela 4.16 é possível notar as variações no resultado do tempo final com pequenas variações no parâmetro. A linha 2 mostra os valores nominais calculados pela metodologia.

Tabela 4.16 - Variações no tempo final de ruptura para 30% de YBL.

	Parâmetro de LM	Log t_f	t_f[h]
1	6,9385	2,7391	548,42
2	<u>6,9734</u>	<u>2,8506</u>	<u>708,86</u>
3	7,0082	2,9617	915,57

Para 30% de YBL, variações em entorno de 0,5% no valor do parâmetro de Larson-Miller representam variações que chegam a ser superiores a 200 horas no valor do tempo final. Estipulando um intervalo de tempo e considerando o parâmetro de Larson-Miller na faixa de 6,9385 a 7,0082, ou seja, 0,5% para mais e para menos, pode-se, então, considerar que o material irá romper entre **548,52 a 915,57 horas** se submetido a um ensaio de fluência a 30%YBL a 40°C.

Ensaio experimental para comparação

A fim de verificar a validade dos resultados obtidos pelo método de Larson-Miller, foram feitos dois ensaios experimentais acelerados às mesmas condições observadas nas tabelas Tabela 4.13 Tabela 4.15. O equipamento utilizado para os ensaios experimentais foi uma câmara com controle de temperatura adaptada para ensaios de fluência (Figura 4.6).



Figura 4.6 - Máquina de ensaio de fluência a altas temperaturas

Os tempos de duração dos ensaios experimentais, com a respectiva % de YBL e temperatura, podem ser vistos na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Resultados ensaios experimentais para comparação - 30% e 40% de YBL.

Ensaio	% de YBL	Temperatura (C°)	Tempo de duração do ensaio	Intervalos estimados pelo método LM
1	45	40	72,5 horas	63,61 – 107,15 horas
2	30	40	850 horas	548,42 – 915,57 horas

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados, nota-se que as fibras sintéticas de HMPE se mostraram bastante sensíveis a temperatura e carga de operação, conforme destaca LIAN, YUSHUN et al, (2015) em seu trabalho “*A creep–rupture model of synthetic fiber ropes for deepwater moorings based on thermodynamics*”.

Em relação a constante de Larson-Miller, podemos concluir que seu valor realmente não é constante, conforme GHATAK e ROBI (2016) destacou em seu trabalho, *Modification of Larson–Miller parameter technique for predicting creep life of materials*, mas sim uma função da carga. Tanto é que, conforme visto na Tabela 4.8, tem-se para uma carga de 40% de YBL uma constante de 20,059, para 50% de YBL a constante vale 21,311 e por fim, para 70% de YBL, a constante tem seu valor em 22,596.

A metodologia de Larson-Miller para o cálculo de tempos de ruptura dos multifilamentos de HMPE se mostrou eficaz quando utilizada para determinação de intervalos de tempo em que o material deverá sofrer ruptura.

Como mostrado anteriormente, variações no parâmetro de Larson-Miller, mesmo que muito pequenas (da ordem de 0,5%) afetam os resultados significativamente, sendo inadequado determinar apenas um tempo final para ruptura do material.

As pequenas variações no parâmetro de Larson-Miller são significativas, pois a função que retorna os valores de tempo é uma função logarítmica. Assim, qualquer variação, mesmo que muito pequenas, no logaritmo de t_f é bastante significativo.

Como já se sabe, os ensaios de fluência demandam muito tempo, e como foram feitos muitos ensaios, ficou inviabilizado repetir os ensaios de fluência. Seria interessante que para um refinamento melhor nos intervalos de ruptura, ou seja, uma diminuição nos intervalos de tolerância para o parâmetro de Larson-Miller, que foi de $\pm 0,5\%$, fossem realizados mais ensaios de fluência acelerados, a fim de se ajustar a constante e o parâmetro de Larson-Miller.

Devido à demora dos ensaios, só foi possível fazer dois ensaios experimentais para comparação dos resultados.

Como mostra a Tabela 5.18, os dois intervalos ensaiados experimentalmente para comparação retornaram resultados que se encontram dentro dos intervalos previsto para ruptura do material, com a margem de tolerância no parâmetro de $\pm 0,5\%$.

Tabela 5.18 - Comparação dos resultados.

% de YBL	Resultado experimental	Intervalo de tempo extrapolado
30	850 horas	548,52 a 915,57 horas
45	72,5 horas	63,61 a 107,15 horas.

De modo geral, pode-se concluir que a metodologia utilizada é válida para intervalos de tempo de ruptura, onde se estipula uma faixa de valores (porcentagem para \pm) para o parâmetro de LM, sendo inadequada a conclusão de um tempo final para a de ruptura.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O estudo da fluência em fibras sintéticas é apenas uma parte da análise a ser feita na utilização de fibras sintéticas em cabos para ancoragem *offshore*. Além disso, como a fluência é um processo de longo prazo, mais experimentos devem ser realizados em laboratório, para que se tenha valores de constantes e parâmetros próximos aos reais.

Como trabalho futuro é sugerido que se faça mais testes de fluência a fim de refinar tanto a constante, quanto o parâmetro de Larson-Miller. Um refinamento nestes dois parâmetros (C e LM) pode talvez diminuir o intervalo de tempos para ruptura do material.

Como cabos de ancoragem estão sendo solicitados constantemente, existem outros fatores que contribuem para a redução da vida útil do cabo. Seria interessante também para um trabalho futuro, uma análise conjunta, de fluência e fadiga nos cabos de ancoragem.

7 BIBLIOGRAFIA

1986 - Tecnologia para produção em águas profundas. Disponível em: <<http://exposicao60anos.agenciapetrobras.com.br/decada-1980-momento-25.php>>. Acesso em 10/10/2017.

ALBRECHT, CARL HORST **Algoritmos Evolutivos Aplicados à Síntese e Otimização de Sistemas de Ancoragem** [Rio de Janeiro] 2005 - VII, 166 p. 29.7cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2004) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D885: **Standard Test Methods for Tire Cords, Tire Cord Fabrics, and Industrial Filament Yarns Made from Manufactured Organic-Base Fibers.** West Conshohocken, 1998.

BOUKOUVALAS, Nicolas T.; WIEBECK, Hélio. Caracterização Térmica de Fios de Poliaramida. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 4, p. 284-288, 2007.

CALLISTER JR., WILLIAM D., **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais** - Uma abordagem Integrada, 4a ed., **Rio de Janeiro**, LTC, 2014.

CALLISTER JR., WILLIAM D., **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais** - Uma introdução, 8a ed., **Rio de Janeiro**, LTC, 2012.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros.** Artiber editora, São Paulo, 2002.

CASTRO, R. G. M. **Análise da Fluência e Previsão de Vida Útil dos Aços Astm A387, Astm A516 E Din 16mo3 Aplicados na Fabricação de Conversores-Ld.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João del-Rei, São João Del-Rei, 2009.

COSTA MATTOS, H. S. ; CHIMISSO, F. E. G. . **Modelling the creep behaviour of HMPE fibers used in ultra-deep-sea mooring ropes**. In: Heraldo da Costa Mattos; Marcílio Alves. (Org.). Solid Mechanics in Brazil 2009. 1ed.Rio de Janeiro: Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2009, v. 1, p. 81-93.

DA COSTA MATTOS, H. S.; CHIMISSO, F. E. G. Modelling creep tests in HMPE fibres used in ultra-deep-sea mooring ropes. **International Journal of Solids and Structures**, v. 48, n. 1, p. 144-152, 2011.

DAVIES, Peter et al. **Mechanical behaviour of HMPE and aramid fibre ropes for deep sea handling operations**. Ocean Engineering, v. 38, n. 17, p. 2208-2214, 2011.

GHATAK, Amitava; ROBI, P. S. Modification of Larson–Miller parameter technique for predicting creep life of materials. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 69, n. 2, p. 579-583, 2016.

GIRÓN, Aldo Roberto Cruces. **Aplicação de Metodologias de Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers na Exploração de Petróleo Offshore**. 2009. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil.

HEINS, Dustin; MOZSGAI, Greg; TANZARELLA, Angelo. Inspection criteria for HMPE rope. In: **OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE**. IEEE, 2013. p. 1-7.

JONES, David RH; ASHBY, Michael F. **Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design**. Elsevier, 2011.

JORGE, Jorge Carlos Ferreira et al. Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Juntas Soldadas pelo Processo a Arco Submerso com Elevado Aporte Térmico. **Soldag. insp., São Paulo**, v. 20, n. 3, p. 347-358, 2015.

KOCHEM, R M., **Estudo de Diferentes Concepções de Sistemas de Ancoragem em Lâmina D'água Profunda**. Dissertação (mestrado) UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2016.

LARSON, F. R.; MILLER, J.” **A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses**”. Trans. ASME, vol. 74, n.5, pp. 765-771, 1952.

LE GAC, P.-Y.; DAVIES, Peter; CHOQUEUSE, Dominique. Evaluation of long term behaviour of polymers for offshore oil and gas applications. **Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles**, v. 70, n. 2, p. 279-289, 2015.

LEITE, Sergio et al. HMPE mooring lines for deepwater MODUs. In: **OTC Brasil**. Offshore Technology Conference, 2011.

LIAN, Yushun et al. A creep–rupture model of synthetic fiber ropes for deepwater moorings based on thermodynamics. **Applied Ocean Research**, v. 52, p. 234-244, 2015.

Lima, Diego Amorim **Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Offshore Considerando Aspectos do Projeto de Risers** - Dissertação (mestrado) UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2011.

LIU, Haixiao et al. **An experimental investigation on nonlinear behaviors of synthetic fiber ropes for deepwater moorings under cyclic loading**. Applied Ocean Research, v. 45, p. 22-32, 2014.

MANO, Eloisa Biasotto; Mendes, Luís Cláudio. **Introdução a polímeros** - 2. ed. rev. e ampl. - São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

MENEGHETTI, L. C. **Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MORETO, J. A. **Avaliação do Desempenho de Aços Inoxidáveis Ferríticos com Relação a Propriedades Mecânicas e Oxidação em Altas Temperaturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

NARIÑO, Giovanni Alfredo Rey; MARTHA, Luiz Fernando; DE MENEZES, Ivan Fábio Mota. **Otimização de Risers em Catenária com Amortecedores Hidrodinâmicos**. 2014. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

PASTERNAK, Jason D.; SHELTON, John; GILMORE, Justin. Synthetic “mud ropes” for offshore mooring applications-field history and testing data. In: **OCEANS 2011**. IEEE, 2011. p. 1-8.

RUDIN, A.; CHOI, P. **Ciência e engenharia de polímeros**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SALAVERRÍA, J. H.; CASAS, J. R.; APARICIO, A. C. **Estudio experimental sobre el uso de fibras aramidas para reparación y refuerzo de puentes existentes**. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 6., 1997, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, 1997. p. 191-198.

SECKLER, C. S., **Metodologia Baseada em Inspeção e Retroanálise para Verificação e Ajustes de Sistemas de Ancoragem de Unidades Flutuantes de Produção Offshore**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

SITE: deno.oceanica.ufrj.br. **Amarra de elos com malhete**. Disponível em <http://www.deno.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/atuais/DanielQ+Leticia/relat1/fundeio.htm> Acesso em 31/07/2017

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. AMGH Editora, 2013.

VLASBLOM, M. P.; BOSMAN, R. L. M. **Predicting the creep lifetime of HMPE mooring rope applications**. In: OCEANS 2006. IEEE, 2006. p. 1-10.

WINCK, J. C. **Avaliação dos Danos por Fluência no Superaquecedor da Caldeira de CO da REFAP S/A Segundo API STD 530**. Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009.