

# Ancoragem offshore

Desenvolvimento de fibra HMPE para permanente ancoragem offshore em águas profundas

Com a exploração de campos de petróleo e gás indo mais a fundo e mais longe da costa, os projetistas de sistemas de ancoragem são desafiados a desenvolver sistemas de engenharia de ancoragem que proporcionem equilíbrio entre as demandas de deslocamentos máximos da plataforma, vento e cargas de pico da onda, e de elevadas tensões em correntes marinhas.

Cabos de poliéster são geralmente usados para ancoragem em águas profundas. Além de 2.000 m de profundidade, no entanto, o alongamento elevado do cabo de poliéster torna-se um problema, pois as linhas de ancoragem já permitem maiores deslocamentos horizontais. A linha de poliéster de 2.000 m pode ter alongamento de 40 m, enquanto uma linha de 3.000 m permitiria alongamento de até 60 m sob as mesmas condições ambientais, criando maiores deslocamentos horizontais, que podem ultrapassar os limites dos "risers" (aumento do passeio). Utilizando HMPE com semelhante tensão de ruptura desses deslocamentos seria de apenas 12 m para uma linha de 3.000 m.

Além disso, o HMPE é agora amplamente considerado o material mais adequado para estes maiores comprimentos de linha de ancoragem em águas profundas. As fibras são caracterizadas por alta resistência e módulo elevado, produzindo cordas de rigidez elevadas e diâmetros menores e mais leves, proporcionando vantagens técnicas e operacionais sobre linhas de ancoragem de poliéster tradicionais. Um sistema mais rígido de ancoragem em HMPE é de elevação potencialmente mais compatível do que o poliéster. Cabos HMPE têm tipicamente um alongamento não superior a ruptura de 2%-2,5%.

Durante estação de manutenção, movimentos de ondas impõem cargas cíclicas em linhas de ancoragem, fazendo alongamento da fibra fluante. As linhas de ancoragem estão sujeitas a cargas de tensão-tensão de fadiga. Cabos de fibras HMPE demonstraram uma maior vida de fadiga em comparação com cabos de poliéster para a construção do mesmo cabo e não são vulneráveis a fadiga de compressão axial em comparação com a fibra de aramida <sup>(1), (2)</sup>.

No entanto, a alta rigidez de HMPE também pode ser um fator limitante. Em áreas de alto risco de tempestades e furacões o sistema de ancoragem precisa se esticar para manter a sobrevivência da tempestade. Híbridas, que combinam linhas de ancoragem de segmentos de cabos HMPE com segmentos de cabos de poliéster, proporcionam a rigidez necessária para lidar com cargas máximas durante a estação

**Martin Vlasblom** é formado em engenharia de design industrial com MSc na Universidade de Delft, Holanda e diretor de Pesquisa Aplicada na DSM Dyneema.



**Jorn Boesten** é graduado pela Universidade Técnica de Delft na Holanda em engenharia mecânica em 1996 (mestre) e diretor do segmento offshore da DSM Dyneema.



**Peter Davies** é engenheiro de pesquisa no grupo de Materiais e Estruturas no Ifremer - Instituto Francês de Investigação de Oceanos.



**Sergio Leite** é formado em Engenharia Mecânica na Universidade do Porto em Portugal em 1991 e diretor de vendas para a área de cabos da Lankhorst Ropes/divisão offshore.



	Geral	Fluência reduzida	Fluência ainda mais reduzida
Dyneema® fibra	SK75	SK78	DM20
Titer	1740 dtex	1740 dtex	1740 dtex
Tenacidade	35 cN / dtex	35 cN / dtex	31 cN / dtex
Módulo	1.160 cN / dtex	1.160 cN / dtex	920 cN / dtex
Alongamento à ruptura	3,5%	3,5%	3,6%
Uso típico	Cabos de trabalho	Ancoragem MODU	Ancoragem permanente

Tabela 1: Principais propriedades de alguns tipos de DSM Dyneema HMPE fibras

de manutenção na tempestade, garantindo a elasticidade suficiente para amortecer as cargas de pico induzidas por ondas <sup>(3), (4), (5)</sup>.

A pretensão é responsável para o carregamento a longo prazo das linhas de ancoragem. Fibras HMPE são sensíveis a estas cargas estáticas de longo prazo, e se alongarão de modo irreversível proporcionalmente com o tempo. Este fenômeno é conhecido como fluência (creep). Fluência (creep) excessiva provoca um aumento de deslocamento do navio atracado. O grau de fluência (creep) é dependente do tipo de HMPE, a temperatura de operação, a média de carga e tempo de carregamento.

Todos os tipos de fibras HMPE têm um desempenho diferente, em geral, as fibras a de DSM Dyneema combinam maior resistência à tração e módulo de elasticidade com a mais elevada resistência à fluência (creep). Desenvolvimentos recentes de fibra foram destinados a reduzir significativamente a taxa de fluência (creep) (% de alongamento / unidade de tempo), bem como o desenvolvimento de um modelo para prever com precisão a taxa de fluência (creep) e alongamento de fluência (creep), e, assim, proporcionar melhores estimativas de tempo de vida de fluência (creep) para as categorias de qualidade oferecidas pelo DSM Dyneema.

Em 2003, a categoria de fibra SK78, um HMPE de baixa fluência (creep), foi introduzida para ancoragem semipermanentes da unidade de perfuração operacional móvel (MODU). A Petrobras, recentemente, fez um pedido de um conjunto de cabos de ancoragem SK78 com 630 toneladas carga de ruptura mínima (MBL) para projetos de águas profundas MODU na costa do Brasil.

Pesquisas adicionais na redução da taxa de fluência (creep) resultaram no desenvolvimento da categoria de fibra DM20, concebida especialmente para águas profundas de ancoragem permanente. A Tabela 1 apresenta as principais propriedades para os diferentes tipos de fibra HMPE.

### Fluência (creep) de HMPE em diretrizes e normas da indústria

Todos os cabos sintéticos suportam algum nível de fluência (creep) – definido como o alongamento per-

manente do cabo sob carga. O cabo não irá recuperar completamente quando a carga for removida. Como afirmado anteriormente, cabos produzidos com fibra HMPE têm até agora sofrido significativamente maiores taxas de fluência (creep) do que os de poliéster.

### Modelagem preditiva

Após a publicação do DSM Dyneema em modelagem de fibra HMPE de fluência (creep) <sup>(6)</sup>, as diretrizes da indústria de cabos de ancoragem especificam agora uma variedade de documentação relacionada incluindo a validação de modelos de fluência (creep), fatores de falha de segurança de fluência (creep) e tarefas de monitoramento de fluência (creep).

Quase todas as normas de sistema de ancoragem afirmam que os modelos de estimativa de fluência (creep), com base em dados de testes de fibras, podem ser utilizados para apoiar os requisitos do sistema de ancoragem de desempenho de fluência (creep) e assim limitar a necessidade de testes completos de (sub) cabos (Tabela 2) <sup>(7), (8), (9), (10), (11), (12)</sup>. Tipicamente análises de taxa de fluência (creep), análises de falhas de fluência (creep) e testes de previsões de fluência (creep) de cabos são necessários. Para as análises de fluência (creep), os eventos ambientais a longo prazo podem ser representados por uma série de condições de projetos discretas a partir da qual o alongamento anual de fluência (creep) é calculado, e um total previsto de tensão de fluência (creep) para a vida de serviço do projeto determinada. Durante a avaliação de protótipos, um teste é executado para verificar ou calibrar taxas de longo prazo de fluência (creep) de cabos com os dados do modelo de fluência (creep) da fibra.

### Monitoramento de Fluência (creep)

Monitoramento do alongamento do cabo HMPE é usado para medir o grau de fluência (creep). No entanto, há uma falta de consenso entre órgãos de normatização sobre metodologias de testes.

Algumas normas de ancoragem requerem monitoramento de fluência (creep) do cabo em uso na parte mais crítica, geralmente a parte ou seção superior mais próxima da superfície da água, por causa das

Diretrizes	NI 432 DTO R01E	DNV-OS-E303 DNV-OS-E301	Instruções sobre cabos de fibra de ancoragem no alto-mar	API-RP-2SM	ISO / PDTS 14909
Órgão expedidor	Bureau Veritas <sup>(7)</sup>	Det Norske Veritas <sup>(8), (9)</sup>	American Bureau of Shipping <sup>(10)</sup>	American Petroleum Institute <sup>(11)</sup>	International Organization for Standardization <sup>(12)</sup>
Previsão de fluência	Fluência a longo prazo do cabo com base em dados de fibra de fluência.	Resistência a falha de fluência a ser especificado pelo fabricante do cabo.  Fabricante de fios para testar a falha de fluência do fio.	Análise de fluência para estimar a tensão total de fluência durante a vida útil do projeto.  Análise de ruptura de fluência para estimar a vida de ruptura de fluência.  Modelo de fluência baseado em fibra de dados de fluência.	Análise de fluência com base nas cargas média e máxima do projeto. Análise de falhas de fluência baseado nos dados de teste do cabo.	Estimativa de alongamentos de taxa e fluência admissível, em condições de funcionamento em área mais crítica do cabo.  Com base no modelo de propriedades de fluência da fibra.
Métodos			Número de condições discretas do projeto para calcular tensão de fluência anual e tensão total de previsão para a vida útil do projeto.	Vários intervalos de tensão para calcular danos de ruptura de fluência acumulativa anual.	
Testes de fluência do cabo	Calibrar a longo prazo taxas de fluência de cabos em cabos de protótipo com dados da fibra e modelo de fluência.  Sub cabos permitidos para construções de cabos paralelos.	A ser determinado individualmente por caso se aplicável.  Número de amostras de teste a serem testadas na fluência.	Teste de verificação para taxa de fluência de cabos pelo menos em uma carga e uma temperatura.  Teste continuou até pelo menos 24 horas de uma taxa de fluência constante até atingir o tempo cabos cabos permitidas para construções de cabos paralelas.	Os dados de fluência são coletados em duas tensões.  A porcentagem de fluência em 3 min., 30 min., 300 min. e 3.000 min. podem ser extrapoladas em uma base semilogarítmica (fluência em escala normal contra tempo em escala logarítmica) para tempos mais longos.	Calibrar a longo prazo taxas de fluência de cabos em cabos de escala completa durante 7 dias no máximo 55% BS e máximo 25° C.  Sub cabos permitidos para construções de cabos paralelos.
Monitoramento de fluência em uso	Seção mais crítica - geralmente parte ou seção (superior) através de marcação adequada.	Medições de comprimento para avaliar a progressão da fluência.	Opcional (influência sobre o fator de segurança).		
Critério de descarte de fluência	95% da força inicial do cabo ou 10% do comprimento do cabo instalado.		Tensão de fluência total limitada a 10% do comprimento total do cabo HMPE.		
Fator de segurança		Fator de falha de segurança fluência de 3 para ancoragem móvel e 5-8 para ancoragem a longo prazo.	Fator de segurança ao longo da vida de serviço do projeto contra ruptura de fluência: 5 (fluência é monitorado) ou 10 (fluência não é monitorado).	Fator de segurança para falha de fluência é 10 vezes a vida útil do cabo.	

Tabela 2: Fluência de HMPE como abordada por normas e diretrizes

altas temperaturas envolvidas. Um pequeno número de normas especifica um critério de substituição do cabo de HMPE de 10% de tensão à fluência (creep) do comprimento total do cabo HMPE.

Quando indicados o fator de segurança de fluência (creep) de cabos de HMPE é diferente para ancoragens móveis e ancoragens a longo prazo. Difere também de como é aplicado: nas normas e diretrizes para cabos HMPE (Tabela 2), os fatores de segurança são baseados em ambas as falha de fluência (creep), o tempo de ruptura por fluência (creep) ou vida útil do projeto, que, por definição, não são consistentes. Além disso, o fator de segurança para um cabo monitorado

pode ser menor do que para um cabo de ancoragem não monitorado.

Há também aspectos práticos a serem considerados quando um modelo de fluência (creep) é baseado em dados de cabos. Para extrapolação sobre tempos mais longos, testes de fluência (creep) em cabos HMPE devem ser realizados no assim chamado "regime de estado estacionário de fluência (creep)", para determinar o patamar da taxa de fluência (creep). Como a taxa de fluência (creep) é dependente da temperatura e carga, testando até ocorrer falha de fluência (creep) dentro de um intervalo de tempo aceitável pode ser realizado apenas com cargas e temperaturas elevadas, que não são representativas das condições de operação no alto-mar. Como poderia ser

Força de ruptura do cabos (MBL)	630 mt	Carga de ruptura do fio (YBL)	0.611 kN	
Peso do cabo (W)	4,5 kg/m	Peso de fios (g/m)	0,174 g/m	
Carga de Fluência	MBL 20 %	Carga de Fluência	20 % YBL	8 % YBL
Nível de estresse	270 MPa	Nível de estresse	684 MPa	270 MPa

**Tabela 3:** Relação entre força de ruptura do cabo e a força de ruptura de fio para um cabo típico de fibra de SK78

esperado, o custo das instalações de teste de cabos para realizar estes testes com cargas operacionais e temperaturas pode ser muito alto.

Como resultado, os testes de fluência (creep) de cabos são normalmente limitados a testes de taxa fluência (creep) de cabos, para verificar o modelo de fibra de fluência (creep) utilizado para a análise.

### Dados de fluência da fibra contra dados de fluência (creep) do cabo

Na comparação entre dados de fibra e de fluência (creep) do cabo em uma base de carga relativa, um fator de conversão de força de ruptura da fibra/cabo ou fator de realização, devem ser levados em consideração. Este fator é dependente da construção do cabo, fabricante do cabo e o tipo de fibra usado.

$$RF = \frac{YBL/w}{MBL/W} \quad (1)$$

Onde:  
RF = fator de realização (-); YBL = carga de ruptura do fio (kN); w = peso do fio (g/m); MBL = carga de ruptura mínima do cabo (kN); W = peso do cabo (g/m)

Resultados do teste de fluência (creep) de uma fibra sob força de 20% de ruptura de fibra não são diretamente comparáveis à tensão de um cabo de 20% sob a força da ruptura do cabo e, como tal, nenhuma conclusão sobre o desempenho da fluência (creep) do cabo pode ser feita (ver **tabela 3**).

Em vez disso, comparando os dados da fluência (creep) de fibra e cabo com base em níveis de stress comparáveis (por exemplo MPa ou kN/(g/m)) resulta em uma correlação direta, sem a necessidade de fatores de realização. Quando o nível de stress correspondente ao nível de carga relativa no cabo completo é determinado, os experimentos de fluência (creep), a este nível podem ser realizados em fibras de fios de cabo, ou sub cabos, resultando em dados comparáveis de fluência (creep).

Obs.: É aconselhável consultar o fabricante da fibra, ao definir os níveis de carga e duração dos testes de verificação em cabos HMPE, a fim de alcançar resultados dentro de prazos aceitáveis.

### Programa de teste para DM20

Testes extensivos foram efetuados no tipo de fibra DM20 para determinar suas propriedades e o comportamento em sistemas permanentes de ancoragem offshore, abrangendo:

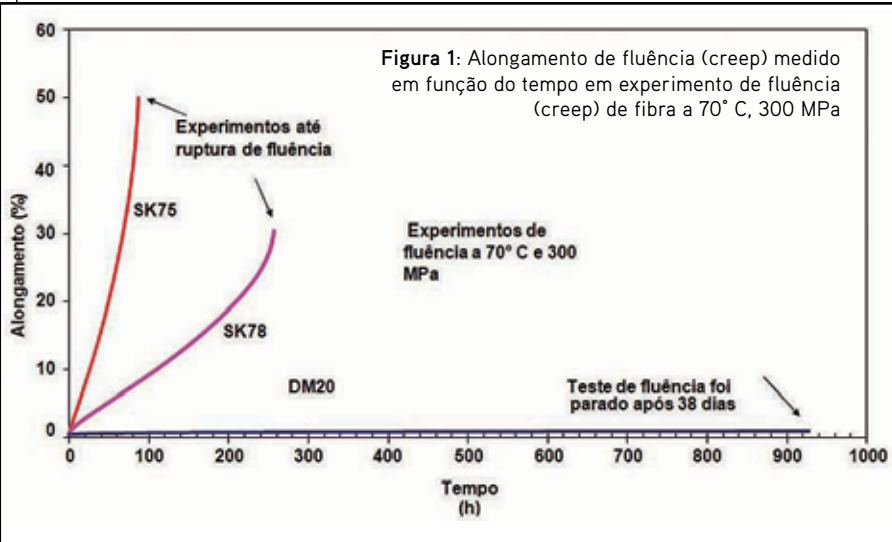
- propriedades de resistência: forças de rupturas em construções de sub cabos,
- propriedades de rigidez: rigidez dinâmica de fios e fios de rigidez estática e rigidez de cabos,
- propriedades de fluência (creep): taxa de fluência (creep) de fibra e experimentos da vida de fluência (creep) para o desenvolvimento do modelo de fluência (creep) e testes de fluência (creep) de cabos para verificar esse modelo de fluência (creep),
- propriedades relacionadas com tempo de vida: desempenho de abrasão fibra-a-fibra, vida de fadiga em amostras de cabos, resistência UV e envelhecimento térmico em fibras, em referência ao tipo de fibra SK78 que foi aceite pela indústria para ancoragem MODU em águas profundas.

### Caracterização de fluência (creep) de fibra DM20

Seguindo o método descrito por Vlasblom e Bosman<sup>(13)</sup> um número de taxa de fluência (creep) de fibra e experimentos de fluência (creep) de ruptura foram realizados a temperaturas entre 30° C a 70° C e níveis de carga de 300 MPa a 1700 MPa, isto é comparável aos níveis acima da carga de ruptura de 20% para um cabo típico de ancoragem offshore.

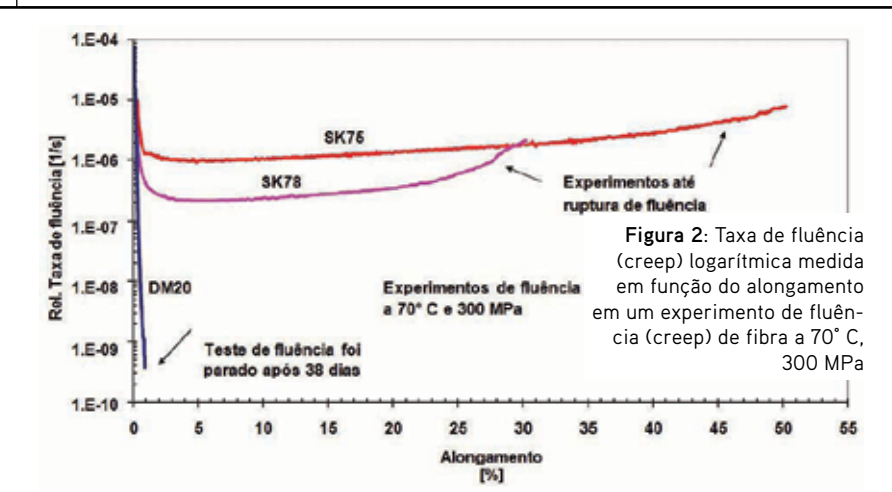
A temperatura ambiente, fibra DM20 carregada em força de ruptura de fibra de 10% mostra uma taxa de fluência (creep) de 0,03% ao ano; enquanto SK78 mostrou uma taxa de fluência (creep) de 2% ao ano e SK75 uma taxa de fluência (creep) de 10% ao ano. Como as outras fibras HMPE, um aumento de temperatura de 20° C aumentou a taxa de fluência (creep) em aproximadamente um fator de 10.

Para testes comparativos, testes acelerados de fluência (creep) são realizados em temperaturas elevadas para fornecer resultados em um período de tempo aceitável. A **Figura 1** mostra um alongamento de fluência (creep) ao longo do tempo em fibra de DM20, fibra de SK78 e a fibra SK75 a 70° C e nível de stress de 300 MPa, que é comparável à carga de ruptura de 20% de um cabo de ancoragem. Devido às limitações de tempo, o experimento em fibra DM20 terminou



DM20 é 50 vezes menor do que a da SK78. Tal como SK75 e SK78, o início da falha de fluência (creep) de DM20 depende da carga aplicada e da temperatura. As matérias-primas utilizadas no HMPE, métodos de produção, força e o módulo têm uma influência (creep) sobre a resistência da fibra à falha de fluência (creep).

Sob os mesmos níveis de carga, DM20 irá atingir o início das falhas de fluência (creep) após um tempo muito mais longo do que SK78, (ver Figura 3), e com alongamentos inferiores. Isto sugere que o critério de descarte de 10% de alongamento permanente recomendada para tipos gerais de HMPE e SK78 em diretrizes e normas da indústria deve ser reduzido para DM20.

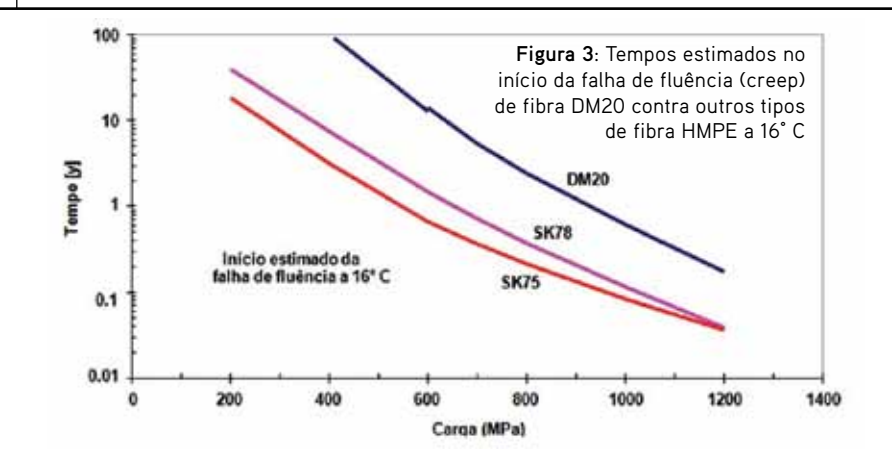


### DM20 estimativa de fluência (creep) na condição de carga offshore

A tendência dos cabos HMPE de ancoragem offshore para fluência (creep) tem de ser abordada no projeto de ancoragem permanente. Uma taxa alta de fluência (creep) representa um risco potencial de falha através da fluência (creep) de ruptura. Também é necessário re-tensionamento de cabos e uma redução na rigidez quasi-estático dos cabos durante uma longa tempestade.

Para sistemas permanentes de ancoragem, um alongamento de fluência (creep) de 0,5% em 25 anos no total da linha de ancoragem é considerado como aceitável. Fatores de segurança de falha de fluência (creep) são propostos pelas várias diretrizes da indústria, por exemplo, um fator de segurança de 5-8 para atracções de longo prazo, conforme recomendado pela DNV (9).

Um modelo que descreve as propriedades de fluência (creep) foi derivado dos experimentos de fluência (creep) de fibra e usado para estimar a fluência (creep) para linhas



depois de mais de 900 horas. Os mesmos dados são mostrados na Figura 2 como a taxa de tensão logarítmica sobre o alongamento, ilustrando a redução significativa na taxa de fluência e alongamentos baixos suportados pelo DM20.

Experimentos de taxa de fluência (creep) de fibra indicam que, em condições normais de carga de cabos de ancoragem no mar, a taxa de fluência de fibra de

de ancoragem offshore sob condições realísticas de carregamento. Isto ilustra a grande melhoria do DM20 sobre outros tipos de fibra HMPE (tabela 4).

### Caracterização de fluência (creep) de cabos DM20

A Lankhorst Ropes fabricou sub cabos de dois tamanhos para verificar as propriedades de fluência



## Ancoragem offshore: desenvolvimento de fibra HMPE para permanente ancoragem offshore em águas profundas

	SK75		SK78		DM20	
Força típica do cabo	630 t					
Peso do cabo (excluindo a capa)	4,2 kg/m				4,4 kg/m (estimado)	
	Alongamento de fluência estimado	Fator de segurança de falha de fluência	Alongamento de fluência estimado	Fator de segurança de falha de fluência	Alongamento de fluência estimado	Fator de segurança de falha de fluência
Condição de ancoragem de MODU (5 anos de 20% BL a 16° C)	6.6%	Não pode ser atingido	1.7 %	Pode ser atingido	0 %	Pode ser atingido
Condição de ancoragem permanente (25 anos de 20% BL a 16° C)	falha		falha		< 0,3 %	Pode ser atingido

Tabela 4: Expectativas de modelo de fluência (creep) para os tipos de fibras de HMPE

(creep) muito baixa da ancoragem de cabos DM20.

a.

**Construção:** sub-cabo trançado de 8 fios

**Diâmetro:** 29 mm

**Fabricante:** Lankhorst Ropes de Portugal

**Força de ruptura média:** 657 kN (terminação de fim emendado)

**Local de teste:** Ifremer Brest Centre

**Condição de teste de fluência (creep):** 30° C, 290 kN (45% BL), 30 dias

Num suporte de teste de capacidade de 1000 kN na Ifremer, um teste de fluência (creep) foi realizado por meio da medição da extensão da parte central da amostra, utilizando um transdutor de deslocamento de fio de 500 milímetros de alongamento preso ao cabo <sup>(14)</sup>.

A parte central da amostra de 8 metros de cabo olho-no-olho era aquecida por aquecedores de ar a 30° C. Para medir a temperatura, a sonda foi inserida em um comprimento de 1 metro de HMPE cabo trançado do mesmo tamanho e colocado no centro da câmara com a amostra seguinte (Figura 4).

A amostra foi submetida a cinco ciclos de assentamento a 290 kN

(Figura 5), e em seguida mantido a uma carga constante de 290 kN, a 30° C durante 30 dias. A Figura 6 mostra o alongamento da parte central do cabo para a duração do teste de fluência (creep). Como referência, o resultado de um teste idêntico realizado em 2003 sobre um cabo feito de SK78 é mostrado na

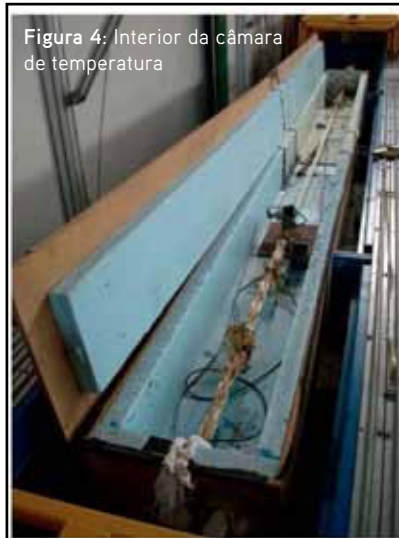


Figura 4: Interior da câmara de temperatura

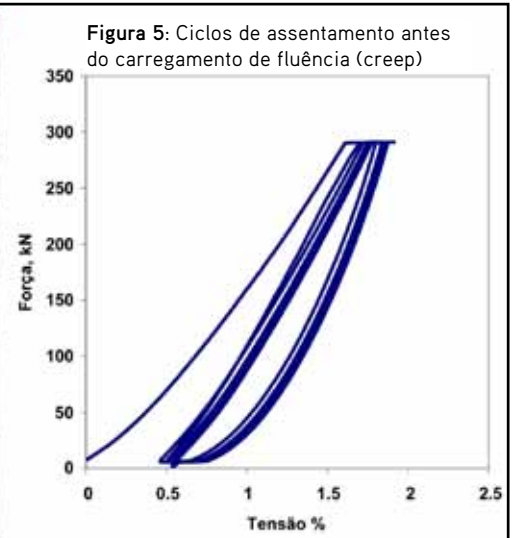


Figura 5: Ciclos de assentamento antes do carregamento de fluência (creep)

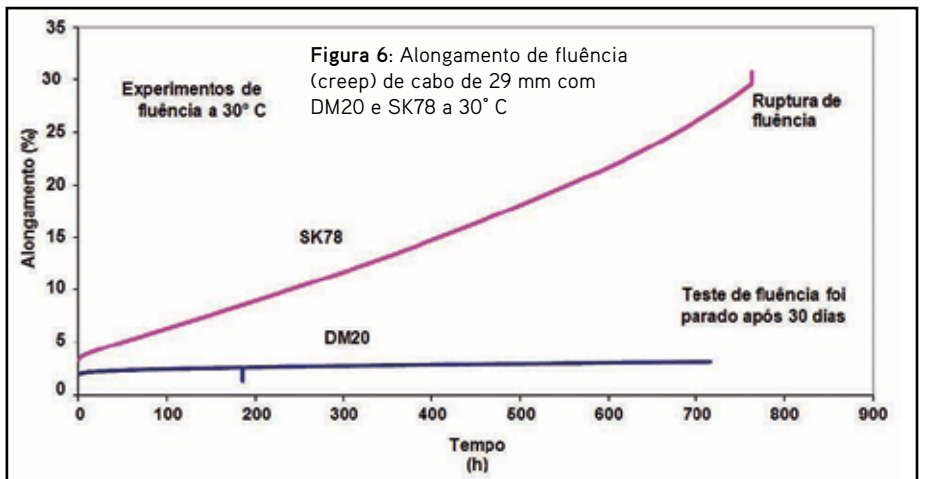
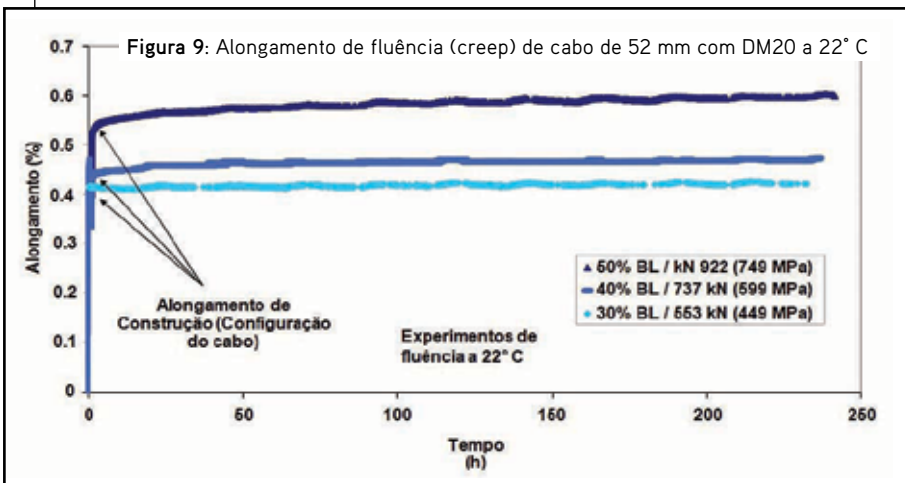
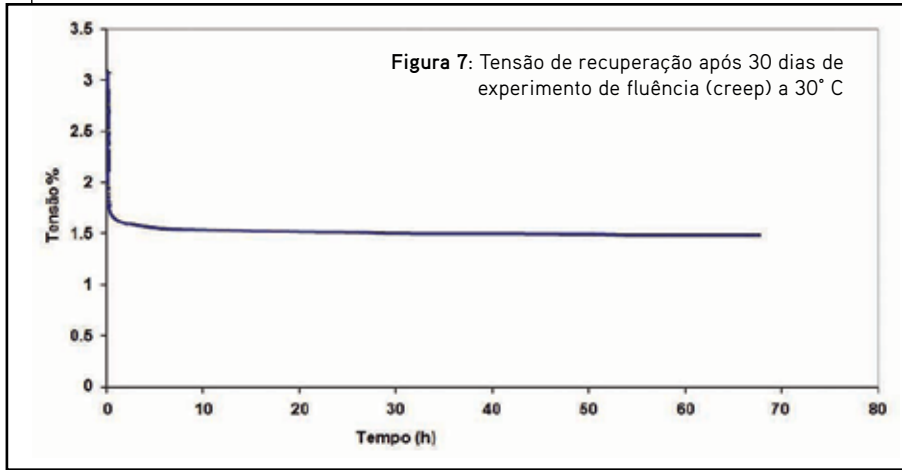


Figura 6: Alongamento de fluência (creep) de cabo de 29 mm com DM20 e SK78 a 30° C

mesma figura <sup>(15)</sup>. Enquanto o cabo feito com SK78 alcançou falha de fluência (creep) a 30% de alongamento, o cabo com DM20 mostrou apenas uma pequena quantidade de tensão.

Após 30 dias, a carga no cabo feito de DM20 foi removido e a tensão registrada durante a recupera-



ção por mais 68 horas a uma carga de 5,8 kN (1% de carga ruptura nominal). Uma tensão permanente de cerca de 1,5% foi registrada. A **Figura 7** mostra a tensão em função do tempo durante a recuperação.

No final do teste de recuperação a amostra foi completamente descarregada, um novo ciclo de assentamento foi aplicado, e o cabo acelerado para

uma falha a 839 kN e uma taxa de 120 kN / minuto.

**b.**

**Construção:** cabo trançado de 8 fios

**Diâmetro:** 52 mm

**Fabricante:** Lankhorst Ropes de Portugal

**Força de ruptura média:** 1843 kN (terminação de fim emendado)

**Local de teste:** Lankhorst Ropes, Portugal

**Condição de teste de fluência (creep):** 23° C, 30% BL / 40% BL / 50% BL, 10 dias

A Lankhorst Ropes realizou três testes de fluência (creep) em cabo de 52 mm de diâmetro ao longo de 10 dias a temperatura ambiente, o que confirma taxas extremamente baixas de fluência (creep) sob níveis de carga comparáveis às condições de tempestade no alto mar (**Figura 8** e **Figura 9**).

### Verificação de modelo de fluência (creep) da fibra

Conforme exigido por várias normas e diretrizes da indústria, as taxas de fluência (creep) de cabo DM20 foram comparadas com o modelo de previsões de fluência (creep) para verificar o modelo de fluência (creep) (**Tabela 5**).

A tabela mostra que as previsões do modelo de fluência (creep) são muito próximas para faixas de carga normais, e conservadoras para níveis de carga, que são significativamente acima das condições de funcionamento normais para as linhas de ancoragem no alto mar. Em todas as condições testadas, o cabo apresentou uma taxa de tensão inferior ao previsto. Embora as diferenças relativas entre taxas previstas e taxas de fluência (creep) medidas pareçam ser elevadas, uma margem de erro é inevitável em previsões de longo prazo de resistência.

DSM Dyneema garantiu que estimativas do modelo de taxa de fluência (creep) sempre erram no lado conservador da vida útil da fluência (creep) esperada.

Deve notar-se também que a precisão do modelo de fluência (creep) atual, com base na taxa de fluência (creep) limitada e dados à fluência (creep), irá melhorar ao longo do tempo.

## Ancoragem offshore: desenvolvimento de fibra HMPE para permanente ancoragem offshore em águas profundas

Local de teste	Ifremer, França		Lankhorst Ropes, Portugal	
Tamanho do cabo	29 mm	52 mm	52 mm	52 mm
Condições de teste Carga estática Duração Temperatura	30° C, Dia 30, Ruptura de carga de 45%	23° C, Dia 10, Ruptura de carga 30%	23° C, Dia 10, Ruptura de carga de 40%	23° C, Dia 10, Ruptura de carga de 50%
Previsão da taxa de fluência	1,3% / mês	0,2% / mês	0,3% / mês	0,7% / mês
Medição da taxa de fluência	0,6% / mês	0,2% / mês	0,2% / mês	0,3% / mês

Tabela 5: Taxa de fluência (creep) prevista e medida no final do teste de fluência (creep) de cabo

### Medidas de rigidez

Para verificar os deslocamentos sob condições de carga pesada, a fluência (creep) das fibras tem de ser levada em consideração. Del Vecchio e Monteiro <sup>(16)</sup> afirmaram que a rigidez secante equivalente, incorporando fluência (creep) das linhas mais tensionadas e mais folgadas para durações de tempestade de 24 a 72 horas, são relevantes para a análise de ancoragem e têm mostrado como resultados de fios pode ser utilizado para produzir estimativas de propriedades de cabos. O teste de rigidez dinâmica de fios envolve um ciclo preliminar seguido pela medição real do ciclo de rigidez. Desta fluência (creep) do fio é estimada com base nas alterações na elongação nas etapas predefinidas para períodos de até 72 horas.

Medições de rigidez foram efetuadas em tipo de fibra DM20 em relação à fibra SK78, que abrange:

- Rigidez dos fios com base em carga de ruptura do fio
- Rigidez do cabo
- Rigidez dos fios com base em fator de realização típico do cabo.

### Rigidez dos fios com base em Carga de Ruptura do Fio

Após este procedimento de teste, as medições foram realizadas na fibra DM20 e fibra SK78 para determinar a quasi-estática rigidez para linhas de vento e sotavento (**Figura 10, Figura 11 e Tabela 6**). Depois de um pré-carregamento inicial (10-30 YBL%), barlavento é definido a partir do alongamento delta entre YBL 20% (carga de ruptura do fio) e YBL 45% acima de 24 horas (incorporando fluência (creep)) e sotavento é definido a partir do alongamento delta entre YBL 20% e 5% YBL acima de 24 horas (incorporando recuperação lenta).

Os valores de rigidez foram calculados de acordo com a equação 2.

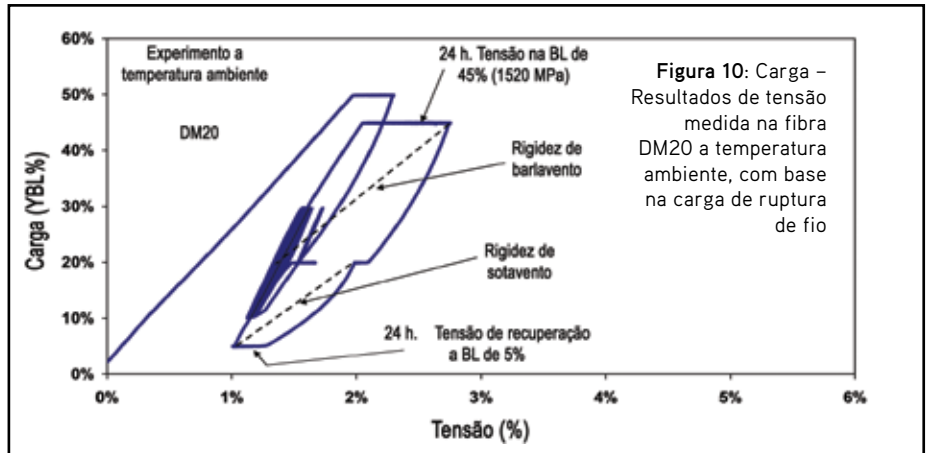


Figura 10: Carga - Resultados de tensão medida na fibra DM20 a temperatura ambiente, com base na carga de ruptura de fio

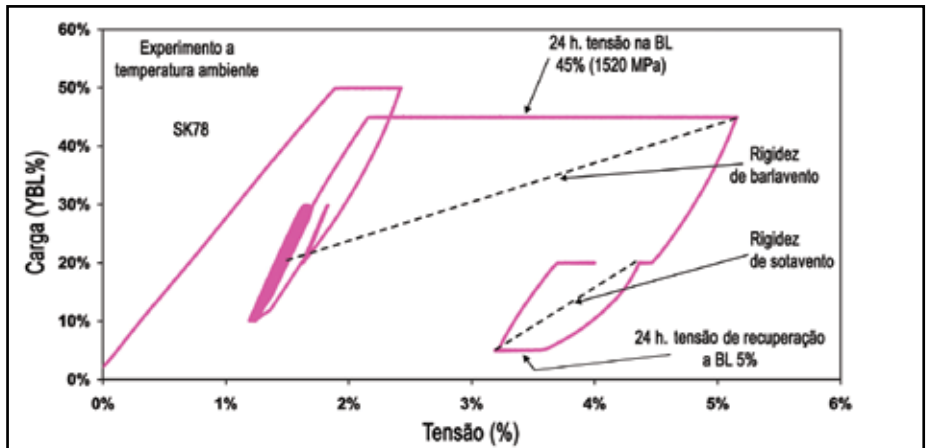


Figura 11: Carga - Resultados de tensão medida em fibra de SK78 a temperatura ambiente, com base na carga de ruptura de fio

$$Stiffness = \frac{\Delta F / YBL}{\Delta L / L_i} \quad (2)$$

Onde:

$\Delta F$  = força de gradiente de 20% a 45%, considerando fluência (creep) de alta carga e de 20% para 5%, considerando a recuperação da carga de baixa tensão;  
 $\Delta L$  = alongamento do fio correspondente ao  $\Delta F$ ;  $YBL$  = carga de ruptura do fio, e,  $L_i$  = Comprimento de medida de amostra no início do teste.



Rigidez dos fios com base em carga de ruptura	Fibra de SK78	Fibra DM20
Barlavento 24h	6,8 x YBL	17,9 x YBL
Sotavento 24h	13,0 x YBL	15,5 x YBL
Rigidez dinâmica (10-30% YBL)	43,7 x YBL	44,6 x YBL

Tabela 6: Rigidez secante equivalente e rigidez dinâmica de fibra SK78 e DM20 a temperatura ambiente, com base na carga de ruptura de fio

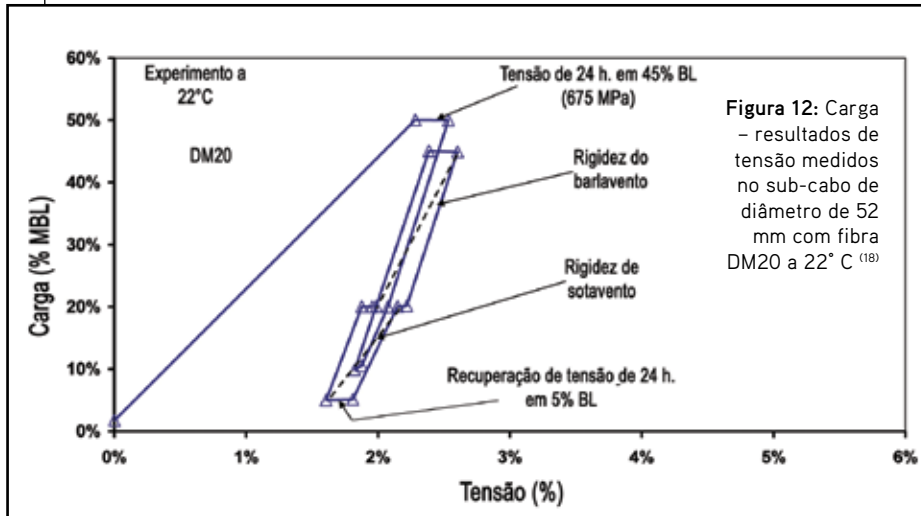


Figura 12: Carga – resultados de tensão medidos no sub-cabo de diâmetro de 52 mm com fibra DM20 a 22° C (18)

(tabela 7). A Figura 12 mostra o resultado do teste de rigidez. Para uma representação mais visual, apenas o ponto inicial e o ponto final de cada patamar de carga foram plotados.

### Rigidez do fio com base no fator típico de realização de cabo

Embora testado na mesma temperatura, os valores de rigidez secante equivalente dos experimentos de fio baseados no fio de carga de ruptura é muito menor que os valores derivados do experimento de cabo. Quando dados de rigidez têm que ser determinados em um fio, a carga deve ser selecionada tal que seja comparável à carga na aplicação do cabo. Isto significa que para comparar dados de rigidez de fibra e cabo em uma base de carga relativa, o fator de conversão de força de ruptura da fibra/cabo, ou fator de realização (ver equação 1), deve ser levado em consideração. Figura 13 e Figura 14 mostram a carga – resultados da tensão das fibras do mesmo com base em um fator de realização que é típico para aplicações de cabo de ancoragem no alto mar.

Em resumo, as medidas de rigidez de fibra e cabos ilustraram que:

- Rigidez secante de DM20 é superior a SK78 quando medida no nível de fibra ou de cabo,

- Rigidez dinâmica de DM20 está em linha com SK78 ao nível do cabo,
- De preferência os valores de rigidez deverão ser determinados a nível do (sub) cabo.

Assim como a fluência (creep) é uma função da temperatura, rigidez secante é uma função da temperatura também.

### Abrasão de fibra-a-fibra

O American Bureau of Shipping (10) especifica que a fibra HMPE deve passar o requisito mínimo do teste de abrasão de fibra-a-fibra, de acordo com

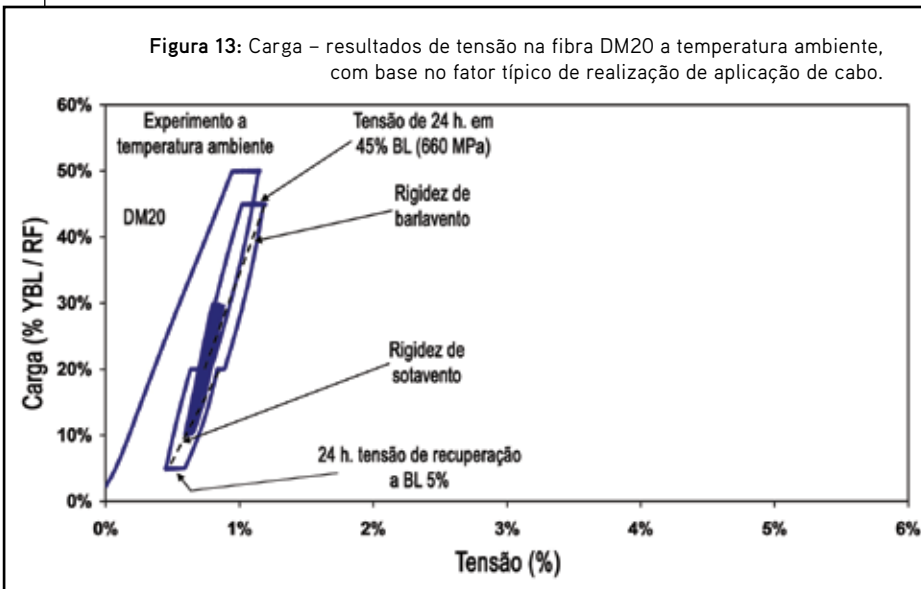


Figura 13: Carga – resultados de tensão na fibra DM20 a temperatura ambiente, com base no fator típico de realização de aplicação de cabo.

### Medições de rigidez de cabos

HMPE é um material visco-elástico e suas características de rigidez irão variar dependendo da intensidade da carga, duração do carregamento e número de ciclos. Durante os ciclos de carga precoce, o assentamento do cabo vai resultar em algum alongamento inicial. A rigidez secante equivalente e rigidez dinâmica do DM20 em uma construção de cabo foi medida no diâmetro de 52 mm do subcabo Gama98® de construção de cabos produzidos por Lankhorst Ropes e comparado com dados obtidos em um cabo MODU de tamanho feito de SK78

## Ancoragem offshore: desenvolvimento de fibra HMPE para permanente ancoragem offshore em águas profundas

Rigidez do cabo	Cabo com SK78 Fibra	Cabo com DM20 Fibra
Barlavento 24h.	-	40,3 x MBL
Sotaventos 24h.	-	27,8 x MBL
Rigidez dinâmica (10-30% YBL)	60 x MBL	60 x MBL

**Tabela 7:** Rigidez equivalente de secante e rigidez dinâmica de sub cabo com SK78 e fibra DM20 a 22° C <sup>(17), (18)</sup>

Rigidez do fio com base no fator de realização	Fibra de SK78	Fibra DM20
Barlavento 24h.	39,9 x YBL / RF	52,5 x YBL / RF
Sotaventos 24h.	43,3 x YBL / RF	38,9 x YBL / RF
Rigidez dinâmica (10-30% YBL)	101,6 x YBL / RF	96,6 x YBL / RF

**Tabela 8:** Rigidez secante equivalente e rigidez dinâmica de fibra SK78 e fibra de DM20 a temperatura ambiente, com base no fator típico de realização de aplicação de cabo

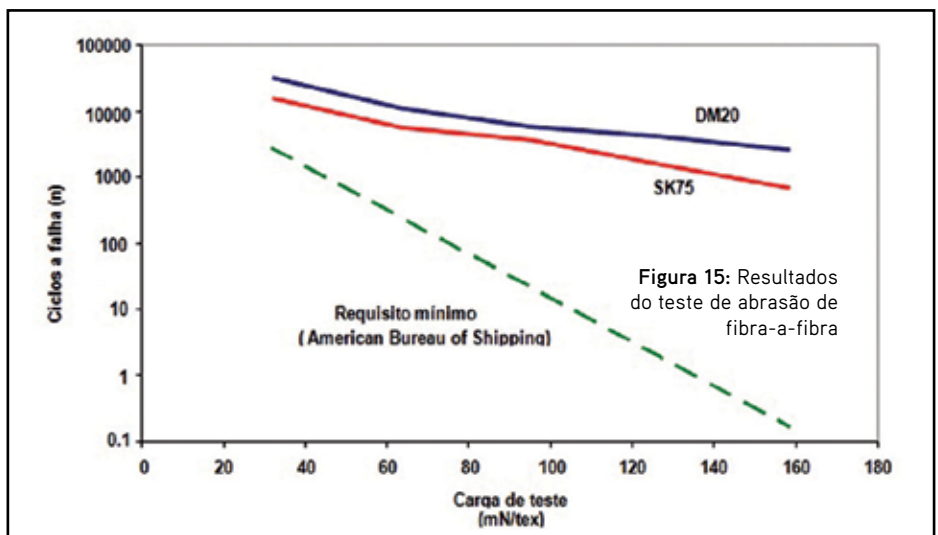
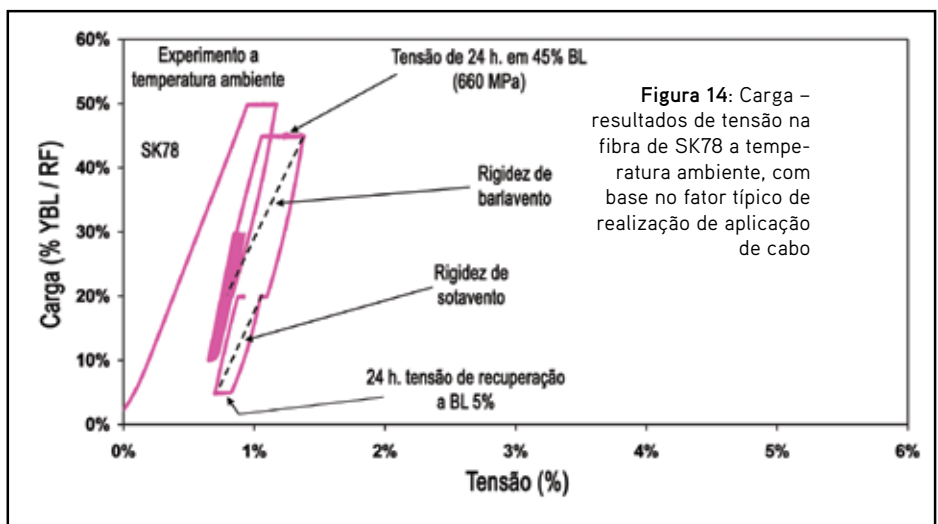
a CI-1503 <sup>(19)</sup>. No laboratório de testes da Tension Technology Internal (Arbroath, Reino Unido), a fibra DM20 foi testada em 1-5% BL e comparados com resultados de teste de fibra SK75 de 2009 <sup>(20)</sup>. Determinou-se que DM20 passará os requisitos mínimos e nenhuma diferença significativa foi detectada entre as fibras de DM20 e SK75 e indicou-se que uma fadiga de tensão comparável pode ser esperada (**Figura 15**).

### Trabalho adicional

Além de caracterização adicional de fluências (creep) da fibra DM20 para previsões mais precisas do modelo de fluência (creep), testes de laboratório em uma ampla variedade de fibra e testes de cabo incluindo testes de fadiga vão continuar a reforçar a confiabilidade sobre a adequação deste novo tipo de fibra HMPE para os mercados pretendidos.

### Conclusões

Polietileno de alto módulo de elasticidade é considerado o material mais adequado para linhas de ancoragem mais longas de águas ultra profundas além de 2.000 m. As fibras são caracterizadas por alta resistência e módulo de elasticidade elevado, produzindo cabos de rigidez elevados de diâmetros menores e mais leves, em comparação com as linhas de ancoragem de poliéster para o mesmo MBL. No entanto, o desempenho de fluência (creep) de HMPE impediu seu uso de



ancoragem em águas profundas a longo prazo. Melhorias sistemáticas no desempenho de fluência (creep) por DSM Dyneema levaram primeiro ao desenvolvimento da fibra SK78 para ancoragem semi-permanente de MODU e agora a fibra DM20 para ancoragens permanentes de produção no alto mar.

As propriedades de fluência (creep) a longo prazo do DM20 atendem as exigências da indústria para a duração de ancoragem permanente.

Conforme solicitado por várias normas e diretrizes, foi desenvolvido um modelo de estimativa de fluência (creep) baseado em dados de fibra para DM20 para demonstrar a capacidade da fibra para cumprir requisitos de desempenho de fluência (creep) e assim limitar a necessidade de testes completos de cabo. As propriedades de taxa de fluência (creep) de fibra foram confirmadas por testes de fluência (creep) em sub cabos.

Devido a seus extremos baixos alongamentos de fluência (creep), o critério de descarte de alongamento permanente de 10% – sugerido nas diretrizes da indústria e normas para os tipos gerais de HMPE e categoria SK78 de MODU – precisa ser reconsiderado para DM20.

Rigidez dinâmica de DM20 é igual a SK78, enquanto a rigidez secante de DM20 é superior a SK78, confirmando a fluência (creep) reduzida desta nova fibra. Recomenda-se determinar os valores de rigidez no nível de (sub)cabos. ■

## Referências

(1) **The manufacture, properties and applications of high strength, high modulus polyethylene fibers**, M. P. Vlasblom, J. L. J. van Dingenen, Chapter 13 in Handbook of tensile properties of textile and technical fibres, Woodhead Publishing, 2009

(2) **Enabling Ultra-Deepwater Mooring with Aramid Fiber Rope Technology**, C.H.Chi, E.M.Lundhild, T.Veselis, M.B.Huntley, OTC 20074, Offshore Technology Conference, May 2009

(3) **HMPE Mooring Lines for Deepwater MODUs**, S.Leite, J.Boesten, OTC 22486, Offshore Technology Conference, May 2011

(4) **The use of HMPE mooring lines in deepwater MODU mooring systems**, R.Garrity, W.Fronzaglia, Oceans, 2008

(5) **Mooring line, WO2007096121, World International Patent Organization**, 2007

(6) **Predicting the Creep Lifetime of HMPE Mooring Rope Applications**, M.P. Vlasblom, R.L.M. Bosman, Oceans, 2006

(7) **Certification Of Fibre Ropes For Deepwater Offshore Services**, Guidance Note, NI 432 DTO R01E, November 2007

(8) **Offshore Mooring Fibre Ropes, Offshore Standard DNV-OS-E303**, Det Norske Veritas, October 2010

(9) **Position Mooring, Offshore Standard DNV-OS-E301**, Det Norske Veritas, October 2010

(10) **Guidance Notes On The Application Of Fiber Rope For Offshore Mooring**, American Bureau of Shipping, August 2011

(11) **Recommended Practice 2SM**, March 2001, Addendum, May 2007

(11) **Recommended Practice for Design, Manufacture, Installation, and Maintenance of Synthetic Fiber Ropes for Offshore Mooring**, API Recommended Practice 2SM, DRAFT Second Edition, American Petroleum Institute, 2010-12-07

(12) **Fibre ropes for offshore stationkeeping – High modulus polyethylene (HMPE)**, ISO/PDTS 14909, ISO, 2011

(13) **Predicting the Creep Lifetime of HMPE Mooring Rope Applications**, M.P. Vlasblom, R.L.M. Bosman, Oceans, 2006

(14) **Creep test on improved HMPE ULC rope**, RDT/MS D11 022 YLG, P.Davies, N.Lacotte, Ifremer, 2011

(15) **Creep Rupture Testing of modified HMPE fibre rope**, TMSI-RED-MS-03-06, P.Davies, N.Lacotte, Ifremer, May 2003

(16) **Quasi-static properties of high stiffness fibre ropes for ultra-deep water moorings**, C.M.J. Del Vecchio, A.H.Monteiro, OIPEEC Conference, ODN 0872, March 2011

(17) **Testing Of Dyneema Modu Tethers**, Report No. BGN-R2303244, Det Norske Veritas, 2003

(18) **Internal report**, Lankhorst Ropes, 2011

(19) **Test Method for Yarn-on-Yarn Abrasion – Wet and Dry**, Cordage Institute, CI 1503-00, August 2001

(20) **Report on the testing of ULC HMPE yarn sample for abrasion resistance**, J.Nichols, Tension Technology International, 2011

**Dyneema®** e **Dyneema®**, a fibra mais forte do mundo™ são marcas registradas da Royal DSM. Uso destas marcas registradas é estritamente proibida, salvo autorização. **DSM Dyneema BV Gama98®** é uma marca registrada de Lankhorst Ropes. O uso desta marca registrada é estritamente proibido, a menos que autorizado.

**Aviso Legal** – Todas as informações, dados, recomendações, etc. relacionadas a produtos da DSM Dyneema (as informações) são apoiados por pesquisa. A DSM Dyneema não assume qualquer responsabilidade resultante de (i) a aplicação de processamento, ou utilização das informações ou produtos, (ii) violação dos direitos de propriedade intelectual ou industrial de terceiros devido a aplicação, processamento ou a utilização de informações ou produtos por parte do comprador. O Comprador deverá (i) assumir tal responsabilidade, e (ii) verificar as informações e os produtos Direitos Autorais 2012, Conferência de Tecnologia Offshore. Este documento foi preparado para apresentação na Conferência de Tecnologia Offshore realizada em Houston, Texas, EUA, 30 abril - 3 maio 2012.

Este trabalho foi selecionado para apresentação de um comitê de programa da CTO seguindo revisão de informação contida em um resumo apresentado pelo(s) autor(es). O conteúdo do trabalho não foi examinado pela Conferência de Tecnologia Offshore e está sujeito a correção pelo(s) autor(es). O material não reflete, necessariamente, qualquer postura da Conferência de Tecnologia Offshore, de seus executivos, ou membros. Reprodução eletrônica, distribuição ou armazenamento de qualquer parte deste documento sem autorização por escrito da Conferência de Tecnologia Offshore é proibida. Permissão para reproduzir em papel se restringe a um resumo de não mais de 300 palavras, as ilustrações não podem ser copiadas. O resumo deve conter o reconhecimento visível de direitos autorais da CTO.