



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) PI 0819166-2 B1**



**(22) Data do Depósito: 09/11/2008**

**(45) Data de Concessão: 06/03/2019**

**(54) Título:** FIBRA ÓPTICA, E CAIXA ÓPTICA

**(51) Int.Cl.:** G02B 1/04; G02B 6/02; C03C 25/10.

**(30) Prioridade Unionista:** 01/04/2008 US 61/041484; 07/11/2008 US 61/112595; 09/11/2007 US 60/986737.

**(73) Titular(es):** DRAKA COMTEQ, B.V..

**(72) Inventor(es):** BOB J. OVERTON; MARIANNE BIGOT-ASTRUC; PIERRE SILLARD; DAVID BOIVIN; IVO FLAMMER; PIETER MATTHIJSSE; FRANS GOOIJER; EMMANUEL PETITFRERE; YVES LUMINEAU; FRANCISCUS JOHANNES ACHTEN; PASCALE NOUCHI; LOUIS-ANNE DE MONTMORILLON; SIMON RICHARD; DENIS MOLIN.

**(86) Pedido PCT:** PCT US2008082927 de 09/11/2008

**(87) Publicação PCT:** WO 2009/062131 de 14/05/2009

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 07/05/2010

**(57) Resumo:** FIBRA ÓPTICA, TUBO TAMPÃO, CABO, CAIXA ÓPTICA, E, SISTEMA FTTx. É descrita urna fibra óptica de modo-único, aperfeiçoada, possuindo um novo sistema de revestimento. Quando combinada com uma fibra de vidro insensível a curva, o novo sistema de revestimento de acordo com a presente invenção produz uma fibra óptica tendo excepcionalmente baixas perdas. O sistema de revestimento caracteriza (i) um revestimento primário mais mole com excelentes características de baixa temperatura, para proteger contra microcurvas em qualquer ambiente e nas situações físicas mais árduas e, opcionalmente, (U) um revestimento secundário colorido possuindo aumentadas resistência de cor e vividez. O revestimento secundário provê melhoradas características de fita para estruturas que são robustas, embora facilmente penetradas (isto é, separadas e despojadas). O duplo revestimento opcional é especificamente equilibrado para superior despojamento térmico em fitas de fibra, com virtualmente nenhum resíduo deixado atrás sobre o vidro. Isto facilita a rápida união e terminações. O sistema de revestimento aperfeiçoado provê fibras ópticas que oferecem significativas vantagens para desdobramento na maioria dos, se não todos, 20 sistemas de fibra-para-os-estabelecimentos (FTTx).

## FIBRA ÓPTICA, E CAIXA ÓPTICA

### REFERÊNCIA A PEDIDOS DE PRIORIDADE

Este pedido internacional por meio deste reivindica o benefício do Pedido de Patente U.S. No. 60/986.737 para uma *Microbend-Resistant Optical Fiber* (Fibra Óptica Resistente a Microcurva) (depositado em 9 de 5 Novembro de 2007), Pedido de Patente U.S. No. 61/041.484 (depositado em 1 de Abril de 2008) para uma *Microbend-Resistant Optical Fiber* (Fibra Óptica Resistente a Microcurva) e Pedido de Patente U.S. No. 61/112,595 para uma *Microbend-Resistant Optical Fiber* (Fibra Óptica Resistente a Microcurva) 10 (depositado em 7 de Novembro de 2008), cada um dos quais é incorporado por referência em sua totalidade.

### CAMPO DA INVENÇÃO

A presente invenção abrange fibras ópticas possuindo um sistema de revestimento melhorado, que reduz a microcurvatura induzida por 15 tensão.

### FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

A fibra óptica para estabelecimentos/negócios/domicílio (isto é, FTTx) prove tecnologia de transferência de dados de banda larga para o usuário final individual. Instalações FTTx, que estão sendo crescentemente 20 empregadas por todo o mundo, fazem parte de projetos de sistema de custo reduzido, novos, para promover a dispersão da tecnologia. Por exemplo, a fibra óptica pode ser suprida na última ligação por meio de um micro cabo. As fibras sopradas por ar provêm outro modelo eficiente para fornecer a ligação para o término de uso final. Continua a haver largo foco da indústria sobre as 25 formas de desenvolvimento que superem obstáculos econômicos que impedem as soluções de banda larga com base na fibra para transmissão de dados para negócios e residências.

A eficácia de custo é importante, é claro, para obterem-se

sistemas FTTx bem-sucedidos. Tamanhos reduzidos para cabos, pingentes e estruturas para soprar são com frequência demasiado críticos. A instalação de condutos adequados para projetos de cabo tradicionais é com frequência proibitiva na infraestrutura existente. Assim, dutos pequenos ou trajetos estreitos existentes têm sido utilizados para novas instalações de fibra. As necessidades de baixo-custo e tamanho reduzido estão impulsionando em uma direção que reduz a proteção para as fibras ópticas (isto é, longe dos projetos de cabo convencionalmente robusto, mais volumoso).

Projetos vítreos são agora viáveis, os quais oferecem reduzida sensibilidade a pequeno raio de curvatura (isto é, atenuação adicionada diminuída, devido ao fenômeno conhecido como macrocurvatura). Estes incluem o projeto de núcleo assistido por vala ou fibras assistidas por vazio. Os projetos vítreos com diâmetro do campo de modo menor são menos sensíveis aos efeitos de macrocurvatura, porém não são compatíveis com a norma G.652 SMF. Fibras ópticas de modo único que são condescendentes com as necessidades ITU-T G.652.D são comercialmente disponíveis, por exemplo, pela Draka Comteq (Claremont, Carolina do Norte).

A microcurvatura é outro fenômeno que induz à perda adicionada na intensidade do sinal de fibra. A microcurvatura é induzida quando pequenas tensões são aplicadas ao longo do comprimento de uma fibra óptica, perturbando o trajeto óptico através de deflexões micronsopicamente pequenas no núcleo.

A este respeito, a Patente U.S. No. 7.272.289 (Bickham et al.), que é por meio deste incorporada por referência em sua totalidade, propõe uma fibra óptica tendo baixas perdas de macrocurvatura e microcurvatura. A Patente U.S. No. 7.272.289 amplamente descreve uma fibra óptica possuindo (i) um revestimento primário tendo um módulo de Young de menos do que 1,0 MPa e uma temperatura de transição vítrea de menos do que - 25°C e (ii) um revestimento secundário tendo um módulo de Young maior do que 1.200

MPa.

Contudo, a melhor proteção contra microcurvatura ainda é necessária para ajudar a garantir o desenvolvimento bem sucedido em mais aplicações FTTx. Para esse fim, é necessário descobrir e implementar novos sistemas de revestimento que tratem melhor as demandas de colocação das instalações FTTx nas estruturas de fibra e cabo, de um modo que seja comercialmente prático (isto é, custo-eficaz).

#### SUMÁRIO DA INVENÇÃO

Portanto, é um objetivo da presente invenção prover uma fibra óptica tendo um sistema de revestimento melhorado, que provê melhorada proteção contra microcurvatura induzida por tensão.

É outro objetivo prover um sistema de revestimento melhorado que possa ser prontamente unido com a fibra óptica insensível à curvatura, bem como com a fibra complacente-G.652.

É ainda outro objetivo prover um sistema de revestimento de fibra óptica melhorado, incluindo um revestimento primário que possua um baixo módulo para prover aumentado amortecimento contra tensões lateral e axial induzidas por forças externas.

É ainda outro objetivo prover um sistema de revestimento de fibra óptica melhorado, incluindo um revestimento primário que possua uma temperatura de transição vítrea excepcionalmente baixa ( $T_g$ ), que reduz as tensões induzidas por temperatura em ambientes raramente frios.

É ainda outro objetivo prover um sistema de revestimento de fibra óptica melhorado, incluindo um revestimento primário que possua uma taxa de cura melhorada.

É ainda outro objetivo prover um sistema de revestimento de fibra óptica melhorado, incluindo um revestimento secundário livre de tinta que tenha transparência e visibilidade melhoradas.

É ainda outro objetivo prover um sistema de revestimento de

fibra óptica que possa ser aplicado em velocidades de processamento comercial (por exemplo, formando o revestimento primário em taxas de pelo menos cerca de 20 metros por segundo).

5 É ainda outro objetivo prover uma fibra óptica possuindo revestimentos que são prontamente extraídos.

É ainda outro objetivo prover uma fibra óptica tendo aumentadas características de desempenho para uso em instalações FTTx, em que projetos de cabo convencional, robusto não são práticos.

10 É ainda outro objetivo prover uma fibra óptica que combine sinergicamente uma fibra de vidro insensível à curvatura (por exemplo, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq, disponíveis pelo nome comercial BendBright<sup>XS®</sup>) com o revestimento de acordo com a presente invenção (por exemplo, sistema de revestimento da marca registrada ColorLock<sup>XS</sup> da Draka Comteq).

15 É ainda outro objetivo prover uma fibra óptica que possa ser vantajosamente desenvolvida em tubos amortecedores e/ou cabos ópticos de fibra.

20 É ainda outro objetivo prover uma fibra óptica que requiera menos proteção externa (por exemplo, inclusa dentro de tubos amortecedores mais finos e/ou encamisamento de cabo)

É ainda outro objetivo prover uma fibra óptica insensível à curvatura possuindo um diâmetro reduzido (por exemplo, tendo camadas de revestimento mais finas).

25 É ainda outro objetivo prover uma fibra óptica que possa ser instalada de um modo que empregue curvaturas de pequeno raio.

É ainda outro objetivo prover uma fibra óptica que facilite a instalação direta na construção ou outras estruturas (por exemplo, grampeada ou de outro modo presa às superfícies estruturais).

O precedente, bem como outros objetivos e vantagens da

invenção e a maneira em que os mesmos são realizados, são ainda especificados dentro da seguinte descrição detalhada e seus desenhos anexos.

#### BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

5 A Figura 1 representa os resultados de teste de microcurvatura demonstrando que perdas de microcurvatura excepcionalmente baixas são obtidas, de acordo com a presente invenção, emparelhando-se uma fibra de vidro insensível à curvatura com um revestimento primário de baixo módulo.

10 A Figura 2 representa esquematicamente a relação entre o módulo *in situ* de um revestimento primário e a perda adicionada de uma fibra óptica de multimodo.

A Figura 3 representa as propriedades mecânicas dinâmicas de um revestimento primário comercial típico (isto é, um revestimento primário convencional).

15 A Figura 4 representa as propriedades mecânicas dinâmicas de um revestimento primário exemplar usado na produção de fibras ópticas de acordo com a presente invenção.

20 A Figura 5 representa os resultados de teste de microcurvatura para fibras ópticas que incluem um revestimento primário convencional e para fibras ópticas que incluem um revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção.

25 A Figura 6 representa os resultados de teste de microcurvatura (sob rigorosas condições de teste de ciclo de temperatura) para fibras ópticas que incluem um revestimento primário convencional e para fibras ópticas que incluem um revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção.

A Figura 7 representa os resultados de teste de microcurvatura (sob modificadas condições de teste de ciclo de temperatura) para fibras ópticas que incluem um revestimento primário convencional e para fibras ópticas que incluem um revestimento primário exemplar de acordo com a

presente invenção.

A Figura 8 representa os resultados de teste de microcurvatura demonstrando que perdas de microcurvatura excepcionalmente baixas são obtidas, de acordo com a presente invenção, emparelhando-se uma fibra de vidro insensível à curvatura com um revestimento primário de baixo módulo.

A Figura 9 representa os resultados de teste de microcurvatura (sob rigorosas condições de teste de ciclo de temperatura) para fibras ópticas convencionais e para fibras ópticas que, de acordo com a presente invenção, combinem uma fibra de vidro insensível à curvatura com um revestimento primário de baixo módulo.

A Figura 10 representa os resultados de teste de microcurvatura (sob modificadas condições de teste de ciclo de temperatura) para fibras ópticas convencionais e para fibras ópticas que, de acordo com a presente invenção, combinem uma fibra de vidro insensível à curvatura com um revestimento primário de baixo módulo.

A Figura 11 representa atenuação (perda adicionada) como uma função do número MAC (isto é, diâmetro do campo de modo dividido por comprimento de onda de corte) para várias fibras ópticas exemplares.

A Figura 12 representa, em uma escala logarítmica, a sensibilidade de microcurvatura como uma função do número MAC (isto é, diâmetro do campo de modo dividido por comprimento de onda de corte) para várias fibras ópticas exemplares.

A Figura 13 representa perdas de curvatura em um comprimento de onda de 1625 nanômetros com um raio de curvatura de 15 milímetros em uma fibra de modo único padrão (SSMF) versus o valor MAC do comprimento de onda de 1.550 nanômetros.

A Figura 14 representa o perfil do índice refrativo nominal de uma fibra de modo único exemplar.

As Figuras 15a, 15b e 15c são gráficos ilustrando, para

diferentes raios de curvatura, as perdas de curvatura em um comprimento de onda de 1625 nanômetros, em relação ao valor MAC em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, para diferentes fibras de modo único padrão (SSMF) e para diferentes fibras ópticas.

5 As Figuras 16a e 16b são gráficos ilustrando as perdas através de microcurvatura.

A Figura 17 representa a seção transversal (não em escala) de uma fibra óptica exemplar.

10 A Figura 18 representa o perfil estabelecido de uma fibra de índice escalonado.

A Figura 19 representa perdas de curvatura do comprimento de onda de 1625 nanômetros versus o raio de curvatura para fibras ópticas.

A Figura 20 representa esquematicamente uma seção transversal (não em escala) de uma fibra óptica exemplar.

15 A Figura 21a representa um perfil de índice refrativo de referência de uma fibra óptica exemplar.

A Figura 21b representa a concentração de dopante de germânio na fibra óptica exemplar da Figura 21a.

20 A Figura 21c representa a concentração de dopante de flúor na fibra óptica exemplar da Figura 21a.

A Figura 22 representa as características de dispersão para quatro tipos diferentes de fibras ópticas.

25 A Figura 23 representa uma seção transversal de uma fibra de modo único com camadas de cobertura em respectivos raios estendendo-se do centro.

A Figura 24 representa o perfil de índice refrativo nominal da fibra de modo único exemplar da Figura 23.

#### DESCRIÇÃO DETALHADA

Em um aspecto, a presente invenção abrange as fibras ópticas

possuindo um sistema de revestimento melhorado que reduz a microcurvatura induzida por tensão, mesmo em ambientes excepcionalmente frios necessários para desenvolvimentos de FTTx. O sistema de revestimento, de acordo com a presente invenção, inclui um revestimento primário que combina baixo módulo *in situ* (por exemplo, menor do que cerca de 0,5 MPa, quando medido sobre a fibra) e baixa temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) (por exemplo, menor do que cerca de  $-50^\circ\text{C}$ ), para reduzir as tensões causadas pela força e temperatura externas. Além disso, o sistema de revestimento pode ser processado em elevadas velocidades de produção (por exemplo, 15-20 m/s ou mais).

A presente invenção obtém uma fibra óptica resistente a microcurvatura, particularmente uma fibra óptica de modo único, empregando-se como seu revestimento primário uma composição de acrilato de uretano curável por UV. A este respeito, o revestimento primário inclui entre cerca de 40 e 80 % em peso de oligômero de acrilato de poliéter-uretano, bem como fotoiniciador, tal como LUCERIN TPO, que é comercialmente disponível pela BASF. Além disso, o revestimento primário inclui um ou mais oligômeros e um ou mais diluentes monoméricos (por exemplo, acrilato de isobornila), que podem ser incluídos, por exemplo, para reduzir a viscosidade e, portanto, promover o processamento. Uma composição adequada para o revestimento primário, de acordo com a presente invenção, é um produto de acrilato de uretano curável por UV provido pela DSM Desotech (Elgin, Illinois), sob o nome comercial DeSolite<sup>®</sup> DP 1011. A este respeito e como observado, o Pedido de Patente U.S. No. 60/986.737, para uma *Microbend-Resistant Optical Fiber* (Fibra Óptica Resistente a Microcurva) (Overton), o Pedido de Patente U.S. No. 61/041.484 (Overton), para uma *Microbend-Resistant Optical Fiber* (Fibra Óptica Resistente a Microcurva) e o Pedido de Patente U.S. No. 61/112.595, para uma *Microbend-Resistant Optical Fiber* (Fibra Óptica Resistente a

Microcurva)(Overton), são por meio deste incorporados aqui por referência em sua totalidade.

As fibras de vidro adequadas para uso na presente invenção incluem fibras de vidro tais como aquelas descritas na Patente U.S. No. 5 4.838.643, para uma *Single Mode Bend Insensitive Fiber for Use in Fiber Optic Guidance Applications* (Hodges et al); Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0127878 A1 e seu Pedido de Patente U.S. No. 11/556.895 relacionado para um *Single Mode Optical Fiber* (de Montmorillon et al); Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1 e seu Pedido 10 de Patente U.S. No. 11/697.994 relacionado para uma *Single-Mode Optical Fiber* (de Montmorillon et al); Patente U.S. No. 7.356.234 e seu Pedido de Patente U.S. No. 11/743.365 relacionado para *Chromatic Dispersion Compensating Fiber* (de Montmorillon et al); Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2008/0152288 A1 e seu Pedido de Patente U.S. No. 15 11/999.333 relacionado para uma *Optical Fiber* (Flammer et al); Pedido de Patente U.S. No. 61/101.337, para uma *Single Mode Optical Fiber* (de Montmorillon et al); Pedido de Patente U.S. No. 61/112.006, para uma *Bend-Insensitive Single-Mode Optical Fiber* (de Montmorillon et al); e Pedido de Patente U.S. No. 61/112.374, para uma *Bend-Insensitive Single Mode Optical 20 Fiber* (de Montmorillon et al). Cada um destes documentos de patente geralmente cedidos é por este meio incorporado por referência em sua totalidade. Uma fibra de vidro exemplar, por exemplo, possui um núcleo de índice escalonado, tendo um índice refrativo que é entre cerca de 0,003 e 0,006 mais baixo do que o índice refrativo de sua cobertura de sílica 25 adjacente.

As fibras de vidro de modo único exemplares, para uso na presente invenção, são comercialmente disponíveis pela Draka Comteq (Claremont, Carolina do Norte), sob o nome comercial BendBright®, que é condescendente com as exigências ITU-T G.652.D, e o nome comercial

BendBright<sup>xs®</sup>, que é condscendente com as exigências ITU-T G.657.A/B e ITU-T G.652.

Em particular e como fornecido aqui, foi inesperadamente descoberto que o emparelhamento de uma fibra de vidro insensível à curvatura (por exemplo, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq, disponíveis pelo nome comercial BendBright<sup>xs®</sup>) e um revestimento primário tendo módulo muito baixo (por exemplo, produto de acrilato de uretano curável por UV da DSM Desotech, provido pelo nome comercial DeSolite<sup>®</sup> DP 1011) obtém-se fibras ópticas tendo perdas excepcionalmente baixas (por exemplo, reduções na sensibilidade da microcurvatura de pelo menos 10X (por exemplo, 40X a 100X ou mais), quando comparadas com uma fibra de modo único, empregando-se um sistema de revestimento convencional). A fibra de vidro de modo único resistente à curvatura da Draka Comteq, disponível pelo nome comercial BendBright<sup>xs®</sup>, emprega um projeto assistido por vala que reduz as perdas de microcurvatura.

A Figura 1 representa este resultado destacado comparando-se a fibra de modo único exemplar acima mencionada, de acordo com a presente invenção, com várias fibras de modo único, empregando-se sistemas de revestimento convencionais. A este respeito, a Figura 1 apresenta dados de atenuação espectral, medindo-se a atenuação espectral inicial na fibra óptica do carretel de embarque, desse modo obtendo os picos e vales típicos da atenuação através do espectro total de comprimentos de onda entre os limites mostrados. A fibra óptica é então enrolada sobre um tambor de diâmetro fixo, coberto por lixa (isto é carretel de medição), como descrito pelo teste de tambor de lixa de diâmetro fixo IEC (isto é, IET TR62221, Método B) e outra curva de atenuação espectral é obtida.

O teste de tambor de lixa de diâmetro fixo IEC (isto é, IEC TR62221, Método B) provê uma situação de tensão de microcurvatura que afeta as fibras de modo único mesmo em temperatura ambiente. A lixa,

naturalmente, provê uma superfície áspera que submete a fibra óptica a centenas, se não milhões, de pontos de tensão. Com relação aos dados de teste apresentados na Figura 1, um carretel de fibra de 300 mm de diâmetro foi enrolado com lixa de grau de 40 microns de dorso adesivo (isto é, aproximadamente equivalente a lixa de granulação 300) para criar uma superfície áspera. Em seguida, amostras de fibra de 400-metros foram enroladas em cerca de 2,940 mN (isto é, uma tensão de 300 gf em um cilindro de 300 mm de diâmetro), e a atenuação espectral foi medida a 23°C.

As curvas apresentadas na Figura 1 representam a diferença entre a curva espectral inicial e a curva quando a fibra está no tambor de lixa, desse modo provendo a perda adicionada, devido à tensões de microcurvatura.

\* \* \*

Aqueles tendo habilidade comum na arte reconhecerão que os projetos de cabo estão agora empregando tubos amortecedores de diâmetro menor e menos materiais dispendiosos, em um esforço para reduzir custos. Conseqüentemente, quando desenvolvido em tais projetos de cabo, as fibras ópticas de modo único são menos protegidas e assim mais suscetíveis a microcurvatura induzida por tensão. Como observado, a presente invenção provê um sistema de revestimento melhorado, que protege melhor as fibras ópticas contra as tensões causadas por deformações mecânicas externas e por mudanças de propriedade mecânica induzida pela temperatura dos revestimentos.

Como citado, as soluções convencionais para proteger as fibras ópticas envolvidas usam tubos amortecedores de diâmetro grande, tubos amortecedores feitos de materiais de elevado módulo, que resistem à deformação e tensão sob a fibra, e camisas de cabo mais forte, mais espesso, para resistir às deformações que poderiam apertar ou de outro modo pressionar as fibras ópticas. Estas soluções, entretanto, não são somente custosas, porém também deixam de tratar as tensões induzidas por

temperatura causadas por mudanças nos revestimentos protetores. Em outras palavras, os revestimentos primários convencionais possuem elevado módulo em temperaturas abaixo de suas respectivas temperaturas de transição vítrea.

Como descrito aqui, a fibra óptica de acordo com a presente invenção, inclui um revestimento primário possuindo módulo mais baixo e temperatura de transição vítrea mais baixa do que a possuída pelos revestimentos primários da fibra de modo único convencional. Mesmo assim, a formulação de revestimento primário melhorada, contudo, facilita a produção comercial da presente fibra óptica em velocidades de processamento excelentes (por exemplo, 1.000 m/min ou mais). A este respeito, o revestimento primário empregado nas fibras ópticas da presente invenção possui taxas de cura rápidas - alcançando 50 % de cura total em uma dose UV de cerca de 0,3 J/cm<sup>2</sup>, 80 % de cura total em uma dose UV de cerca de 0,5 J/cm<sup>2</sup>, e 90 % de cura total em uma dose UV de cerca de 1,0 J/cm<sup>2</sup>, quando medida em uma película padrão de 75-mícrons a 20°C e pressão atmosférica (isto é, 760 torr) (isto é, temperatura e pressão padrão-STP).

\* \* \*

A Figura 2 representa esquematicamente a relação observada entre o módulo *in situ* de um revestimento primário e a atenuação (perda adicionada) da fibra óptica, aqui uma fibra de multimodo de índice-graduado de 50-mícrons. O módulo de revestimento primário é medido quando curado na fibra de vidro e a perda adicionada é medida empregando-se um procedimento de tambor de lixa de diâmetro-fixado de acordo com a especificação técnica sensível a microcurvatura IEC TR62221 e com os procedimentos de teste padrão (por exemplo, IEC TR62221, Método B, Ed. I), que são por este meio incorporados por referência em sua totalidade.

Como será observado por aqueles tendo habilidade comum na arte anterior, as fibras de modo único comercialmente disponíveis incluem um módulo de Young de 70,3 - 105,5 Kg/cm<sup>2</sup> medido *in situ* (isto é, sobre a

fibra). A fibra óptica de acordo com a presente invenção possui um revestimento primário tendo módulo reduzido quando comparado com tais revestimentos primários comercialmente disponíveis. O emprego de um revestimento primário de módulo mais baixo fornece melhor amortecimento em torno da fibra de vidro.

Embora o módulo mais baixo do revestimento primário *in situ* possa ser conseguido por cura insuficiente seletiva, a presente invenção obtém revestimento primário *in situ* tendo módulo mais baixo, mesmo aproximando-se da cura total (isto é, próximo da cura total). A este respeito, o módulo do revestimento primário *in situ* de acordo com a presente invenção é menor do que cerca de 0,65 MPa (por exemplo, menor do que cerca de 6,68 kg/cm<sup>2</sup>), tipicamente menor do que cerca de 0,5 MPa, e mais tipicamente menor do que 0,4 MPa (por exemplo, entre cerca de 0,3 MPa e 0,4 MPa ou entre cerca de 2,81 Kg/cm<sup>2</sup> e 4,22 kg/cm<sup>2</sup>). Foi determinado que um revestimento primário *in situ* tendo um módulo menor do que cerca de 0,5 MPa reduz significativamente a sensibilidade da curva da fibra de vidro. Por outro lado, o módulo do revestimento primário *in situ*, de acordo com a presente invenção, é tipicamente maior do que cerca de 0,2 MPa (por exemplo, 0,25 MPa ou mais).

Para obter seu módulo reduzido, quando comparado com os revestimentos de fibra óptica convencionais, o presente revestimento primário possui uma menor densidade de reticulação, especificamente uma concentração reduzida dos grupos acrilato reativos. Aqueles tendo habilidade comum na arte observarão que grupos acrilato reticulam-se via a polimerização de radical livre durante fotoiniciação (por exemplo, cura induzida por UV durante operações de estiramento). As cinéticas da reação ditam taxas de cura reduzidas durante o processamento. Isto é comercialmente indesejável, naturalmente, e assim a presente invenção implementa processar modificações para prover satisfatória taxa de cura para o revestimento

primário de baixo módulo.

Há pelo menos dois componentes do processo de cura que retardam a taxa de polimerização do revestimento primário. Primeiro, a combinação de (i) temperaturas de elevada cura induzidas por exposição a um ambiente UV de elevada intensidade e (ii) a reação de polimerização exotérmica diminuem a taxa de cura observada do revestimento primário. Segundo, a estreita proximidade de lâmpadas UV empilhadas, na realidade, cria períodos de fotoiniciação repetidos rapidamente sobrepostos. A taxa de reação de grupos acrilato nesta configuração é igualmente retardada - um resultado um tanto contra intuitivo. Com relação ao último, dispendo-se (isto é, posicionando-se) lâmpadas UV para aumentar o período entre consecutivas exposições UV, significativamente aumenta-se o grau de cura do revestimento, quando comparado com outros processos convencionais empregando a mesma velocidade de tração e dose UV. Deste modo, é possível processar o revestimento primário de módulo-reduzido, de acordo com a presente invenção, em um modo que alcance cura próxima da completa em velocidades de rápida tração da fibra, que são necessárias para um processo comercialmente viável. Um método e aparelho exemplares para curar uma fibra revestida são descritos na comumente cedida Patente U.S. No. 7.322.122, que é por meio deste incorporada por referência em sua totalidade.

A dependência da temperatura do módulo é uma importante consideração para garantir que o revestimento primário forneça aumentada proteção de microcurvatura nas aplicações FTTx. Um revestimento primário tendo baixo módulo somente à temperatura ambiente seria inadequado, devido ao desenvolvimento no campo que exporia a fibra óptica a tensões de indução de microcurvatura em temperaturas ambientais extremas (por exemplo, - 40°C e abaixo). Portanto, um revestimento primário adequado, de acordo com a presente invenção, possui uma temperatura de transição vítrea excepcionalmente baixa, de modo que o revestimento primário permaneça

mole e protetor em condições ambientais extremamente frias.

\* \* \*

#### Exemplo 1 (Comparação das Propriedades Mecânicas)

5 As Figuras 3 e 4, respectivamente, representam as propriedades mecânicas dinâmicas de um revestimento primário comercial típico (isto é, o revestimento primário convencional) e um revestimento primário exemplar usado na produção das fibras ópticas de acordo com a presente invenção. O revestimento primário convencional foi um acrilato de uretano curável por UV, provido por DSM Desotech (Elgin, Illinois) sob o nome comercial DeSolite® DP 1007. O revestimento primário exemplar de  
10 acordo com a presente invenção (isto é, empregado para formar fibras ópticas da presente invenção) foi um acrilato de uretano curável por UV provido por DSM Desotech (Elgin, Illinois) sob o nome comercial DeSolite® DP 1011.

Os dados para o revestimento primário convencional foram  
15 obtidos em um Analisador Mecânico Dinâmico (DMA) em uma taxa de tensão oscilatória de 1 Hz. Fazendo-se assim, a deformação foi mantida dentro da região linear do comportamento de tensão-deformação. A amostra de revestimento primário convencional foi curada em poliéster para formar uma película padrão de 75 microns. Uma dose UV de 1 J/cm<sup>2</sup> foi aplicada  
20 usando-se uma lâmpada de mercúrio-haleto operando em uma saída de 300 W/pl. Esta exposição UV foi suficiente para garantir que o revestimento estivesse sobre o platô da curva de dose-módulo.

Referindo-se à Figura 3, os dados mostram o módulo de equilíbrio sendo aproximadamente de 1,5 MPa, quando medido em uma  
25 película de 75-microns. Em uma fibra de vidro (isto é, *in situ*), este revestimento primário convencional tipicamente cura bem em um módulo de cerca de 0,8 MPa, um nível indicativo de muitos revestimentos primários de fibra de modo único na indústria. Aqueles tendo habilidade comum na arte observarão que as medições de módulo dos revestimentos primários mais

moles tendem a ser menores em uma fibra de vidro (isto é, *in situ*), quando comparadas com as de uma película de 75-mícrons.

A temperatura de transição vítrea do revestimento primário convencional é estimada pelo pico da  $\tan\delta$  sendo aproximadamente  $-30^{\circ}\text{C}$ . Assim, o revestimento primário convencional (e formulações similares) tornar-se-á como um polímero vítreo em temperaturas extremamente baixas (por exemplo, menores do que  $-40^{\circ}\text{C}$ , particularmente menores do que  $50^{\circ}\text{C}$ ). (Embora a tensão induzida por deformação seja dependente de tempo em baixas temperaturas, a temperatura de transição vítrea estimada é uma propriedade comparativa útil).

Uma amostra do revestimento primário exemplar, de acordo com a presente invenção, foi igualmente curada em poliéster para formar uma comparável película de 75-mícrons. Como antes, uma dose UV de  $1\text{ J/cm}^2$  foi aplicada no revestimento primário empregando-se uma lâmpada de mercúrio-haleta operando em uma saída de 300W/pl. Como observado, a Figura 4 representa as propriedades mecânicas dinâmicas do revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção.

O revestimento primário exemplar, de acordo com a presente invenção, exibiu um módulo de equilíbrio sob apenas 1MPa da película curada. O módulo *in situ* (isto é, medido sobre a fibra de vidro), era entre cerca de 0,3 MPa e 0,4 MPa. Isto é, significativamente menor do que as respectivas medições de módulo para o revestimento primário convencional.

A temperatura de transição vítrea do revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção é estimada pelo pico da  $\tan\delta$  em menos do que cerca de  $-50^{\circ}\text{C}$  (por exemplo, cerca de  $-60^{\circ}\text{C}$ ). Isto é, pelo menos cerca de  $20^{\circ}\text{C}$  abaixo da temperatura de transição vítrea do revestimento primário convencional comparativo. Portanto, os revestimentos primários de acordo com a presente invenção provêm o relaxamento de tensão muito mais rápido durante as excursões de temperatura.

Como fornecido nos Exemplos 2 e 3 (abaixo), dois métodos diferentes foram utilizados para avaliar as respectivas sensibilidades de microcurvatura das fibras de vidro revestidas com (i) um revestimento primário comercial típico (isto é, o revestimento primário convencional) e (ii) um revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção. Como no Exemplo 1 (acima), o revestimento primário convencional era um acrilato de uretano curável por UV provido por DSM Desotech (Elgin, Illinois), sob o nome comercial DeSolite<sup>®</sup> DP 1007, e o revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção (isto é, empregado para formar fibras ópticas da presente invenção) era um acrilato de uretano curável por UV provido por DSM Desotech (Elgin, Illinois), sob o nome comercial DeSolite<sup>®</sup> DP 1011.

Cada método de teste provido agravou as condições de tensão lateral. Além disso, após medir o efeito sobre a atenuação à temperatura ambiente, as estruturas de teste foram cicladas em temperatura para determinar a perda adicional induzida por tais excursões de temperatura.

#### Exemplo 2 (comparação de Sensibilidade de Microcurvatura)

O primeiro método de teste empregado foi um procedimento de ciclagem de temperatura de trançado de cesta, conhecido por aqueles tendo habilidade comum na arte. De acordo com este procedimento de teste, a fibra óptica foi enrolada em cerca de 490 mN (isto é, uma tensão de 50 gf em um cilindro de quartzo de 300 mm de diâmetro com uma “camada” de 9 mm). Cinquenta camadas foram enroladas no tambor de quartzo, para criar numerosos cruzamentos fibra-com-fibra. O procedimento de teste para o Exemplo 2 foi uma adaptação de IEC TR62221, Método D, que, como citado, é incorporado por referência em sua totalidade.

Aqueles tendo habilidade comum na arte observarão que, em temperatura ambiente, tais cruzamentos de fibra podem algumas vezes causar

perda adicionada (isto é, se a fibra óptica estiver muito sensível), porém esta perda adicionada tipicamente pequena ou não é observada. Consequentemente, o tambor (com fibra enrolada) foi ciclado duas vezes em temperatura de cerca da temperatura ambiente a (i)  $-40^{\circ}\text{C}$ , (ii)  $-60^{\circ}\text{C}$ , (iii) 5  $+70^{\circ}\text{C}$  e (iv)  $+23^{\circ}\text{C}$  (isto é, próximo da temperatura ambiente), enquanto fazendo-se as medições de perda a 1.550 nanômetros. Em ambos ciclos de temperatura, a atenuação de fibra foi medida após uma hora em cada temperatura de teste.

A Figura 5 representa os resultados exemplares para fibras de 10 vidro de modo único revestidas com, respectivamente, um revestimento primário convencional (isto é, DeSolite<sup>®</sup> DP 1007) e um revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção (isto é, DeSolite<sup>®</sup> DP 1011). Os respectivos espécimes de fibra foram escolhidos para corresponder com a geometria do revestimento, diâmetro do campo de modo e 15 comprimento de onda de corte. Portanto, as respectivas fibras ópticas empregaram diferentes formulações de revestimentos secundários coloridos.

Em resumo, o revestimento primário convencional e o revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção cada um proveu boa proteção contra tensões de microcurvatura a  $23^{\circ}\text{C}$ . Além disso, a - 20  $40^{\circ}\text{C}$ , a fibra óptica tendo o revestimento primário convencional demonstrou somente uma pequena perda adicionada. (Parecia que a  $-40^{\circ}\text{C}$  o revestimento primário convencional proveu adequada proteção contra microcurvatura por relaxamento de tensão em um quadro de tempo razoável, mesmo embora este estivesse próximo de sua temperatura de transição vítrea). Por meio de 25 comparação, a fibra óptica, de acordo com a presente invenção, demonstrou essencialmente nenhuma perda adicionada a  $-40^{\circ}\text{C}$  (isto é, melhor desempenho).

A  $-60^{\circ}\text{C}$ , entretanto, a fibra óptica tendo o revestimento primário convencional demonstrou significativa perda adicionada. (Esta

temperatura extrema estava bem abaixo da temperatura de transição vítrea do revestimento primário convencional). Por meio de comparação, a fibra óptica de acordo com a presente invenção demonstrou essencialmente nenhuma perda adicionada a  $-60^{\circ}\text{C}$ , que é próximo da temperatura de transição vítrea desta forma de realização do revestimento primário de acordo com a presente invenção.

### Exemplo 3 (Comparação de Sensibilidade de Microcurvatura)

O segundo método de teste empregou mais ambientes agressivos (isto é, condições), a fim de avaliar as respectivas sensibilidades de microcurvatura de (i) uma fibra óptica possuindo um revestimento primário comercial típico (isto é, o revestimento primário convencional) e (ii) uma fibra óptica possuindo um revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção.

Em particular, o segundo método modificou o teste de tambor de lixa de diâmetro fixo IEC (isto é, IEC TR62221, Método B), que, como citado, é incorporado por referência em sua totalidade, para prover uma situação de tensão de microcurvatura suficientemente severa para afetar as fibras de modo único mesmo em temperatura ambiente (isto é, uma superfície de tambor mais áspera do que aquela usada para medir os dados representados na Figura 1). Para isto, um tambor de quartzo de 300 mm de diâmetro foi enrolado com lixa de granulação de 220 de dorso adesivo (isto é, aproximadamente equivalente a lixa de grau de 66 microns) para criar uma superfície áspera.

Em uma condição de teste inicial, cada uma das respectivas amostras de fibra foi enrolada em uma camada única em cerca de 980 mN (isto é, uma tensão de 100 gf em um cilindro de quartzo de 300 mm de diâmetro). Em uma condição de teste modificada, três (3) de cada uma das respectivas amostras de fibra foram enroladas em uma camada única em cerca de 1.470 mN (isto é, uma tensão de 150 gf em um cilindro de quartzo de 300

mm de diâmetro). Assim, quando comparada com a primeira condição de teste, a segunda condição de teste aumentou a tensão de enrolamento de 50 %.

Usando-se amostras de fibra igualadas (como com o trançado de cesta/teste de ciclagem de temperatura do Exemplo 2) a atenuação de fibra foi medida após enrolamento à temperatura ambiente (isto é, 23°C) para cada condição de teste. Em seguida, o tambor (com cerca de 400 metros de fibra enrolada) foi ciclado em temperatura de cerca da temperatura ambiente a (i) -40°C, (ii) -60°C e (iii) +23°C (isto é, próximo da temperatura ambiente), enquanto fazendo-se as medições de perda a 1.550 nanômetros empregando-se um refletômetro óptico de domínio do tempo (OTDR).

As diversas amostras de cada tipo de fibra óptica foram inicialmente medidas a 23°C nos carretéis originais (isto é, antes do enrolamento da superfície do tambor tornada áspera para estabelecer a atenuação espectral na linha de referência), em seguida foram submetidas à condições de teste rigorosas precedentes de uma hora em cada temperatura. A atenuação de fibra foi medida após uma hora (como no Exemplo 2) em cada temperatura de teste.

A Figura 6, um diagrama em linha, e a Figura 7, uma plotagem de caixa, representam resultados exemplares sob estas mais rigorosas condições de teste para fibras ópticas de modo único que incluem um revestimento primário convencional (isto é, acrilato de uretano curável por UV DeSolite® DP 1007) e para fibras ópticas de modo único que incluem um revestimento primário exemplar de acordo com a presente invenção (isto é, acrilato de uretano curável por UV DeSolite® DP 1011).

A Figura 6, por exemplo, mostra que, quando comparada com as fibras ópticas convencionais, as fibras ópticas exemplares de acordo com a presente invenção possuem reduzida sensibilidade de microcurvatura (isto é, uma redução de cerca de 40-60 %).

Da mesma maneira, a Figura 7 mostra que, quando comparada

com as fibras ópticas convencionais, as fibras ópticas exemplares de acordo com a presente invenção possuem sensibilidade de microcurvatura substancialmente reduzida em uma tensão de enrolamento mais elevada (isto é, 150 gf em um cilindro de quartzo de 300 mm de diâmetro). A Figura 7 desse modo ilustra que o revestimento primário exemplar, de acordo com a presente invenção, (isto é, acrilato de uretano curável por UV DeSolite® DP 1011) promove o desempenho de microcurvatura tanto significativamente reduzido como significativamente mais uniforme.

\* \* \*

De acordo com o precedente, foi constatado que, quando comparado com um sistema de revestimento convencional, o presente sistema de revestimento provê significante melhora de microcurvatura, quando usado em combinação com uma fibra de vidro de modo único convencional.

Foi ainda constatado que o emparelhamento de uma fibra de vidro insensível à curvatura (por exemplo, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq disponíveis sob o nome comercial BendBright<sup>XS®</sup>) e um revestimento primário tendo módulo muito baixo (por exemplo, produto de acrilato de uretano curável por UV da DSM Desotech, provido pelo nome comercial DeSolite® DP 1011) obtém-se fibras ópticas tendo perdas excepcionalmente baixas. O teste adicional foi realizado, portanto, para demonstrar as reduções dramáticas e inesperadas na sensibilidade de microcurvatura providas de acordo com a presente invenção.

#### Exemplo 4 (Comparação de Sensibilidade de Microcurvatura)

As respectivas sensibilidades de microcurvatura foram medidas para fibras ópticas exemplares, incluindo (i) uma fibra de vidro de modo único convencional com um revestimento comercial convencional, (ii) uma fibra de vidro insensível à curvatura com um revestimento comercial convencional, e (iii) uma fibra de vidro insensível à curvatura (por exemplo, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq disponíveis sob o nome

comercial BendBright<sup>XS®</sup>) com o revestimento de acordo com a presente invenção (por exemplo, sistema de revestimento da marca registrada ColorLock<sup>XS</sup> da Draka Comteq).

A Figura 8 demonstra que a fibra óptica de acordo com a presente invenção, isto é, incluindo uma fibra de vidro insensível à curvatura (por exemplo, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq disponíveis pelo nome comercial BendBright<sup>XS®</sup>) e um revestimento primário tendo módulo muito baixo (por exemplo, produto de acrilato de uretano curável por UV da DSM Desotech, provido pelo nome comercial DeSolite<sup>®</sup> DP 1011), provê perdas de atenuação excepcionalmente baixas, quando comparada com outras fibras ópticas. Além disso, esta fibra óptica resistente à curvatura exibe pequena dependência de comprimento de onda, dentro da janela de transmissão entre 1400 nanômetros e 1700 nanômetros, e é essencialmente não afetada pelas condições de teste de indução de microcurvatura através do espectro de teste.

A Figura 8 apresenta dados de atenuação espectral exemplar obtidos aderindo-se ao IEC TR62221, Método B (tambor de diâmetro fixo). De acordo com IEC TR62221, Método B, a atenuação espectral inicial foi medida em uma amostra de 440-metros de fibra óptica enrolada em um carretel de embarque (isto é, obtendo-se os picos e vales típicos da atenuação através do espectro total de comprimentos de onda entre os limites mostrados). A fibra óptica foi então enrolada em cerca de 3 N sobre um carretel de medição de 300 mm de diâmetro, enrolado com lixa de grau de 40 microns de dorso adesivo (isto é, aproximadamente equivalente a lixa de granulação 300) e outra curva de atenuação espectral foi obtida.

Iguais às curvas apresentadas na Figura 1, as curvas representadas na Figura 8 representam, a 23°C, a diferença entre a curva espectral inicial e a curva quando a fibra está sobre o tambor de lixa de diâmetro fixo, desse modo provendo a perda adicionada devida às tensões de

microcurvatura (isto é, atenuação-delta através da faixa espectral).

Exemplo 5 (Comparação de Sensibilidade de Microcurvatura)

As respectivas sensibilidades de microcurvatura foram medidas sob rigorosas condições de teste para fibras ópticas exemplares, incluindo (i) uma fibra de vidro de modo único convencional com um revestimento comercial convencional e (ii) uma fibra de vidro insensível à curvatura (por exemplo, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq, disponíveis pelo nome comercial BendBright<sup>XS®</sup>) com o revestimento de acordo com a presente invenção (por exemplo, sistema de revestimento da marca registrada ColorLock<sup>XS</sup> da Draka Comteq).

A Figura 9 demonstra que, mesmo sob condições extremamente severas, a fibra óptica de acordo com a presente invenção, isto é, incluindo uma fibra de vidro insensível à curvatura (por exemplo, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq disponíveis pelo nome comercial BendBright<sup>XS®</sup>) e um revestimento primário tendo módulo muito baixo (por exemplo, produto de acrilato de uretano curável por UV da DSM Desotech, provido pelo nome comercial DeSolite<sup>®</sup> DP 1011), provê surpreendentemente baixas perdas de atenuação, quando comparada com outras fibras ópticas.

O procedimento de teste para o Exemplo 5 foi uma adaptação do IEC TR62221, Método B, que, como citado, é incorporado por referência em sua totalidade. Para este modificado teste de tambor de lixa de diâmetro fixo IEC, um tambor de quartzo de 300 mm de diâmetro foi enrolado com lixa de granulação 180 de dorso adesivo (isto é, aproximadamente o equivalente a lixa de grau de 78 microns) para criar uma superfície ainda mais áspera do que aquela descrita no Exemplo 3 (acima). Em seguida, amostras de fibra de 440 metros foram enroladas em uma camada única a cerca de 1.470 mN (isto é, uma tensão de retorno controlada de 150 gf no cilindro de quartzo de 300 mm de diâmetro, empregando-se um aparelho de enrolamento de fibra óptica Delachaux) e a atenuação espectral foi medida.

A Figura 9 apresenta dados do ciclo de temperatura exemplar para três espécimes de fibra de modo único padrão (isto é, uma fibra de vidro de modo único convencional com um revestimento comercial convencional) e três espécimes de fibra óptica de acordo com a presente invenção (isto é, uma fibra de vidro insensível à curvatura com revestimento melhorado de acordo com a presente invenção). Como citado, 440 metros de fibra óptica são enrolados sobre o tambor de diâmetro fixo, coberto por lixa, acima mencionado. Um hora após o enrolamento, a atenuação de fibra foi medida à temperatura ambiente (isto é, 23°C), empregando-se um refletômetro óptico de domínio do tempo (OTDR). Em seguida, o tambor (com 440 metros de fibra enrolada) foi ciclado em temperatura de cerca da temperatura ambiente a (i) -40°C e (ii) -60°C em uma câmara controlada por temperatura. A atenuação de fibra a 1.550 nanômetros foi medida por um OTDR, após uma hora de equilíbrio tanto a -40°C como a -60°C.

A sensibilidade de microcurvatura ( $S_m$ ) pode ser descrita como  $\alpha R/T$ , em que  $\alpha$  é o aumento de atenuação no tambor (dB/km),  $R$  é o raio do poço fixo (mm), e  $T$  é a tensão de enrolamento aplicada à fibra (N). Vide, por exemplo, IEC TR62221 Technical Report (Microbending Sensitivity). Além disso, para os parâmetros  $\alpha$ ,  $R$  e  $T$ , entretanto, a sensibilidade de microcurvatura métrica, obtida do teste de tambor de lixa de diâmetro fixo, é dependente da aspereza da lixa empregada no tambor de medição.

A Tabela 1 (abaixo) apresenta a sensibilidade de microcurvatura métrica obtida pelos dados de atenuação (em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros) representados na Figura 9 (isto é, empregando-se lixa de granulação 180). A Tabela 1 mostra que, quando comparada com uma fibra de modo único padrão convencional, a fibra óptica de acordo com a presente invenção provê sensibilidade de microcurvatura que é cerca de 2X-10X menor a 23°C e cerca de 2X-5X menor a -40°C:

TABELA 1 (Sensibilidade de Microcurvatura)

Fibra Óptica (Cor do Revestimento)	23°C (dB/km)/(N/mm)	-40°C (dB/km)/(N/mm)	-60°C (dB/km)/(N/mm)
SMF convencional (azul)	139,9	220,6	331,8
SMF convencional (vermelho)	261,0	329,7	417,9
SMF convencional (água)	104,3	161,9	228,0
BendBright <sup>XS®</sup> w/ ColorLock <sup>XS</sup> (cimento)	35,8	76,5	163,4
BendBright <sup>XS®</sup> w/ ColorLock <sup>XS</sup> (vermelho)	30,1	70,6	144,2
BendBright <sup>XS®</sup> w/ ColorLock <sup>XS</sup> (água)	42,7	84,7	166,4

**Exemplo 6 (Comparação de Sensibilidade de Microcurvatura)**

As respectivas sensibilidades de microcurvatura foram ainda medidas para fibras ópticas exemplares, incluindo (i) uma fibra de vidro de modo único convencional com um revestimento comercial convencional e (ii) uma fibra de vidro insensível à curvatura (por exemplo, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq disponíveis pelo nome comercial BendBright<sup>XS®</sup>) com o revestimento de acordo com a presente invenção (por exemplo, sistema de revestimento da marca registrada ColorLock<sup>XS</sup> da Draka Comteq).

O procedimento de teste para o Exemplo 6 foi uma adaptação do IEC TR62221, Método B, que, como citado, é incorporado por referência em sua totalidade. Para este teste de tambor de lixa de diâmetro fixo IEC modificado, um tambor de quartzo de 300 mm de diâmetro foi enrolado com lixa de granulação de 220 de dorso adesivo (isto é, aproximadamente o equivalente a lixa de grau de 66 microns) para criar uma superfície áspera como aquela descrita no Exemplo 3. Cada uma das amostras de fibra foi enrolada em uma única camada a cerca de 1.470 mN (isto é, uma tensão de 150 gf em um cilindro de quartzo de 300 mm de diâmetro). Quando comparada com as condições de teste do Exemplo 5, as condições de teste do Exemplo 6 empregou lixa de grau mais fino (isto é, granulação de 220 em vez de granulação 180).

Como no Exemplo 3, usando-se amostras de fibras correspondentes, a atenuação de fibra foi medida após enrolamento à temperatura ambiente (isto é, 23°C). Em seguida, o tambor (com cerca de 400 metros de fibra enrolada) foi ciclado em temperatura de cerca da temperatura ambiente a (i) -40°C, (ii) -60°C e (iii) +23°C (isto é, próximo da temperatura ambiente), enquanto fazendo-se as medições de perda a 1.550 nanômetros empregando-se um refletômetro óptico de domínio do tempo (OTDR).

Três (3) amostras de cada tipo de fibra óptica foram medidas inicialmente a 23°C nos carretéis originais (isto é, antes do enrolamento da superfície do tambor tornada áspera para estabelecer a atenuação espectral na linha de referência), e em seguida foram submetidas às condições de teste rigorosas precedentes de uma hora em cada temperatura. A atenuação de fibra foi medida após uma hora em cada temperatura de teste.

A Figura 10 representa os resultados exemplares para fibras ópticas de modo único que incluem um revestimento primário convencional (isto é, acrilato de uretano curável por UV DeSolite® DP 1007) e para fibras de vidro insensíveis à curvatura (por exemplo, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq disponíveis pelo nome comercial BendBright<sup>XS</sup>®), que inclui um revestimento primário tendo módulo muito baixo (isto é, produto de acrilato de uretano curável por UV da DSM Desotech, provido pelo nome comercial DeSolite® DP 1011).

A Figura 10 demonstra que a fibra óptica de acordo com a presente invenção, isto é, fibras de vidro de modo único da Draka Comteq disponíveis pelo nome comercial BendBright<sup>XS</sup>®, com um revestimento primário tendo módulo muito baixo (por exemplo, produto de acrilato de uretano curável por UV da DSM Desotech, provido pelo nome comercial DeSolite® DP 1011), provê perdas de atenuação excepcionalmente baixas quando comparada com as fibras ópticas de modo único padrão (SSMF).

Além disso, as Figuras 11 e 12 representam atenuação e

sensibilidade de microcurvatura, respectivamente, em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros como uma função do número MAC (isto é, diâmetro do campo de modo dividido por comprimento de onda de corte) para várias fibras ópticas exemplares de acordo com o teste de tambor de lixa de diâmetro fixo IEC padrão (isto é, IEC TR62221, Método B). Os respectivos dados de atenuação representados na Figura 11 (perda adicionada) e na Figura 12 (sensibilidade de microcurvatura) foram obtidos a 23°C sob as condições de teste previamente descritas com respeito à Figura 1 (isto é, amostras de fibra de 400 metros foram enroladas a cerca de 2.940 mN (isto é, uma tensão de 300 gf em um carretel de fibra de 300 mm de diâmetro enrolado com lixa de grau de 40 microns de dorso adesivo).

A Figura 11 mostra que a fibra de vidro de modo único resistente à microcurvatura da Draka Comteq disponível pelo nome comercial BendBright<sup>XS®</sup>, em combinação com o sistema de revestimento da marca registrada ColorLock<sup>XS</sup> da Draka Comteq, provê destacado desempenho com relação a perda adicionada.

A Figura 12 mostra que a fibra de vidro de modo único resistente à microcurvatura da Draka Comteq disponível pelo nome comercial BendBright<sup>XS®</sup>, em combinação com o sistema de revestimento da marca registrada ColorLock<sup>XS</sup> da Draka Comteq, provê superior sensibilidade de microcurvatura (isto é, sensibilidade de microcurvatura de 0,01 a 0,03 (dB/km)/(gf/mm)).

\* \* \*

As fibras ópticas, de acordo com a presente invenção, tipicamente ainda incluem um revestimento secundário rijo para proteger o revestimento primário e a fibra de vidro de avaria durante o manuseio e instalação. Por exemplo, o revestimento secundário poderia ter um módulo entre cerca de 800 e 1.000 MPa (por exemplo, cerca de 900 MPa), quando medido em uma película padrão de 75-microns. Como descrito aqui, este

revestimento secundário pode ser tingido como um código de cor ou, preferivelmente, pode ser inclusivo de cor, para prover identificação sem a necessidade de um processo de tintagem separado.

Em uma forma de realização de acordo com a presente invenção, o revestimento secundário que circunda o revestimento primário, para desse modo proteger a estrutura da fibra, caracteriza um sistema de colorir inclusivo (isto é, não requerendo uma camada extra de tinta para ser adicionada para codificação da cor). As cores, que conforme os padrões de Munsell para codificação de cor da fibra óptica, são aumentadas quanto à transparência e visibilidade sob iluminação sombria (por exemplo, em sombra profunda ou em espaços confinados, tais como entradas de inspeção) e são facilmente distinguidas contra ambientes tanto iluminados como escuros.

Além disso, o revestimento secundário caracteriza uma superfície que provê uma excelente interface com material de matriz de fita, de modo que a matriz separe-se facilmente da fibra colorida de um modo que não sacrifique a robustez. As propriedades mecânicas do revestimento secundário colorido são equilibradas com aquelas do revestimento primário, de modo que, no despojamento térmico, o compósito de revestimento/matriz separe-se limpamente das fibras de vidro.

\* \* \*

Empregando-se a fibra de vidro de modo único resistente à curvatura, da Draka Comteq sob o nome comercial BendBright<sup>xs®</sup>, com o presente sistema de revestimento-duplo, que inclui um revestimento primário de baixo módulo, foi constatado reduzir a sensibilidade de microcurvatura entre cerca de uma ou duas ordens de magnitude relativas a fibra de modo único padrão (SSMF) nas frequências de transmissão de chave de 1.550 nanômetros e 1625 nanômetros. Como citado, tal fibra óptica não somente provê resistência à microcurvatura e macrocurvatura destacadas, porém também está de acordo com as exigências ITU-T G.657.A/B e ITU-T

G.652.D.

Em particular, a fibra de vidro de modo único resistente à curvatura da Draka Comteq sob o nome comercial BendBright<sup>xs®</sup> (por exemplo, aumentada com o sistema de revestimento da marca registrada ColorLock<sup>xs</sup> da Draka Comteq), provê resistência à macrocurvatura necessária para curvaturas sustentadas tendo um raio tão pequeno quanto cinco (5) milímetros, com uma probabilidade de falha estimada de menos do que duas (2) fraturas por milhão de curvaturas de círculo total (isto é, 360°), durante 30 anos em um ambiente apropriadamente protegido. Estas fibras ópticas resistentes à curvatura facilitam o desenvolvimento rápido de cabos flexíveis, pequenos, para o suprimento da fibra para estabelecimentos/negócios/domicílio (isto é, FTTx), em virtude da capacidade da fibra óptica sustentar uma transmissão livre de perda através de curvaturas de pequeno raio. Os cabos empregando tais fibras ópticas resistentes à curvatura podem ser dirigidos em torno de curvaturas pronunciadas, grampeados em estrutura de construção, enrolados e de outro modo empregados nos ambientes de demanda, enquanto retendo a transmissão de sinal claro e forte.

\* \* \*

As fibras ópticas insensíveis à curvatura, de acordo com a presente invenção, facilitam a redução total do diâmetro da fibra óptica. Como será observado por aqueles tendo habilidade comum na arte, uma fibra óptica de diâmetro reduzido é custo-eficaz, requerendo menos material bruto. Além disso, uma fibra óptica de diâmetro reduzido requer menos espaço de desenvolvimento (por exemplo, dentro de um tubo amortecedor e/ou cabo de fibra óptica), desse modo facilitando a contagem de fibra aumentada e/ou tamanho de cabo reduzido.

Aqueles tendo habilidade comum na arte reconhecerão que uma fibra óptica com um revestimento primário (e um revestimento

secundário e/ou camada de tinta opcionais) tipicamente tem um diâmetro externo entre cerca de 235 microns e cerca de 265 microns ( $\mu\text{m}$ ). A própria fibra de vidro componente (isto é, o núcleo de vidro e camadas de cobertura circundantes) tipicamente tem um diâmetro de cerca de 125 microns, de modo que a espessura do revestimento total seja tipicamente entre cerca de 55 microns e 70 microns.

Com relação à fibra óptica, de acordo com a presente invenção, a fibra de vidro componente tipicamente tem um diâmetro externo de cerca de 125 microns. Com respeito às camadas de revestimento circundantes da fibra óptica, o revestimento primário tipicamente tem um diâmetro externo entre cerca de 175 microns e cerca de 195 microns (isto é, uma espessura de revestimento primário entre cerca de 25 microns e 35 microns) e o revestimento secundário tipicamente tem um diâmetro externo entre cerca de 235 microns e cerca de 265 microns (isto é, uma espessura de revestimento secundário entre cerca de 20 microns e 45 microns). Opcionalmente, a fibra óptica, de acordo com a presente invenção, pode incluir uma camada de tinta externa, que é tipicamente entre dois e dez microns.

Em uma forma de realização alternativa, uma fibra óptica de acordo com a presente invenção pode possuir um diâmetro reduzido (por exemplo, um diâmetro externo entre cerca de 150 microns e 230 microns). Nesta configuração de fibra óptica alternativa, a espessura do revestimento primário e/ou revestimento secundário é reduzida, enquanto o diâmetro da fibra de vidro componente é mantido em cerca de 125 microns. Por meio de exemplo, em tais formas de realização a camada de revestimento primário pode ter um diâmetro externo entre cerca de 135 microns e cerca de 175 microns (por exemplo, cerca de 160 microns), e a camada de revestimento secundário pode ter um diâmetro externo entre cerca de 150 microns e cerca de 230 microns (por exemplo, mais do que cerca de 165 microns, tais como

190-210 microns mais ou menos). Em outras palavras, o diâmetro total da fibra óptica é reduzido para menos do que cerca de 230 microns (por exemplo, cerca de 200 microns).

\* \* \*

5                    Como observado anteriormente, combinando-se (i) um sistema de revestimento de acordo com a presente invenção com (ii) uma fibra de vidro tendo um perfil de índice refrativo que provê própria resistência de curvatura (por exemplo, sensibilidade de baixa macrocurvatura), foi constatado prover inesperadamente reduções superiores na sensibilidade de  
10 microcurvatura. De fato, as fibras de vidro insensíveis à curvatura são especialmente adequadas para uso com o sistema de revestimento da presente invenção (sistema de revestimento da marca registrada ColorLock<sup>xs</sup> da Draka Comteq). Os respectivos perfis de índice refrativo das fibras de vidro insensíveis à curvatura exemplares (isto é, projetos de vidro insensível à  
15 curvatura exemplares) são ainda observados a seguir.

                    Como será entendido por aqueles tendo habilidade comum na arte, um perfil de índice refrativo de uma fibra óptica é uma representação gráfica do valor do índice refrativo como uma função de raio de fibra óptica. Convencionalmente, a distância  $r$  até o centro da fibra é mostrada ao longo da  
20 abscissa e a diferença entre o índice refrativo e o índice refrativo da cobertura da fibra é mostrado ao longo do eixo geométrico ordenado. O perfil do índice refrativo da fibra óptica é referido como um perfil “etapa”, um perfil “trapezoidal”, um perfil “parabólico” ou um perfil “triangular”, para gráficos tendo os respectivos formatos de uma etapa, um trapezoidal, uma parábola ou  
25 um triângulo. Estas curvas são geralmente representativas do perfil de índice teórico ou de referência (isto é, perfil estabelecido) da fibra. As restrições e tensões de manufatura da fibra podem resultar em um perfil ligeiramente diferente.

                    Uma fibra óptica convencionalmente inclui um núcleo óptico,

cuja função é para transmitir e, possivelmente, ampliar um sinal óptico, e uma cobertura óptica, cuja função é para confinar o sinal óptico dentro do núcleo. Para este fim, os índices refrativos do núcleo  $n_c$  e da cobertura externa  $n_g$  são de modo que  $n_c > n_g$ . Como é bem conhecido, a propagação de um sinal óptico em uma fibra óptica de modo único é dividida em um modo fundamental (isto é, modo dominante, conhecido como LP01), guiado dentro do núcleo, e nos modos secundários (isto é, modos de cobertura), guiados através de uma certa distância do conjunto núcleo-cobertura.

Convencionalmente, as fibras de índice-escalonado são usadas como fibras de linha para sistemas de transmissão de fibra óptica. Estas fibras ópticas exibem uma dispersão cromática e uma inclinação de dispersão cromática correspondendo às específicas recomendações de telecomunicação. Como citado, para compatibilidade entre os sistemas ópticos de diferentes manufaturas, a International Telecommunication Union (ITU) estabeleceu uma recomendação com uma norma referenciada ITU-T G.652, que deve ser satisfeita por uma Fibra de Modo Único Padrão (SSMF).

Este padrão G.652 para fibras de transmissão, recomenda, entre outros, uma faixa nominal de 8,6 microns a 9,5 microns para o Diâmetro do campo de modo (MFD) em um comprimento de onda de 1310 nanômetros, que pode variar de +/- 0,4 microns, devido às tolerâncias de manufatura; um máximo de 1260 nanômetros para o comprimento de onda de corte cabeado; uma faixa de 1.300 nanômetros a 1324 nanômetros para o comprimento de onda de cancelamento de dispersão (indicado  $\lambda_0$ ); e uma inclinação de dispersão cromática máxima de 0,092 ps/(nm<sup>2</sup>.km) (isto é, ps/nm<sup>2</sup>/km).

O comprimento de onda de corte cabeado é convencionalmente medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único após propagação através de 22 metros de fibra, tal como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44.

Na maioria dos casos, o modo secundário mais resistente para perdas de curvatura é o modo LP11. O comprimento de onda de corte do cabo é, portanto, o comprimento de onda além do qual o modo LP11 é suficientemente enfraquecido após a propagação através de 22 metros de fibra. O método proposto pelo padrão envolve considerar que o sinal óptico é de modo único, quando a atenuação do modo LP11 é maior do que ou igual a 19,3 dB.

Além disso, como previamente citado, é desejável reduzir a sensibilidade de curvatura das fibras ópticas para uso como fibras de terminação. As soluções típicas para reduzir perdas de curvatura são para influenciar o valor MAC. Para uma dada fibra, o chamado valor MAC é definido como a razão do diâmetro do campo de modo da fibra a 1.550 nanômetros para o comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$ . O comprimento de onda de corte eficaz é convencionalmente medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único, após propagação através de dois metros de fibra, tal como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44. O valor MAC é usado para avaliar o desempenho da fibra, particularmente, para obter-se um comprometimento entre o diâmetro do campo de modo, comprimento de onda de corte eficaz e perdas de curvatura.

A este respeito, a Figura 13 representa os resultados experimentais que ilustram as perdas de curvatura em um comprimento de onda de 1625 nanômetros com um raio de curvatura de 15 milímetros em uma fibra SSMF, em relação ao valor MAC de um comprimento de onda de 1.550 nanômetros. A Figura 13 mostra que o valor MAC influencia na curvatura da fibra e que estas perdas de curvatura podem ser reduzidas diminuindo-se o valor MAC.

\* \* \*

Uma fibra de vidro insensível à curvatura exemplar para uso

na presente invenção é descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0127878 A1 e seu Pedido de Patente U.S. No. 11/556.895 relacionado para uma *Single Mode Optical Fiber* (de Montmorillon et al). Combinando-se (i) uma fibra de vidro insensível à curvatura, tendo o perfil de índice refrativo como descrito na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. 5 US 2007/0127878 A1, e um revestimento de acordo com a presente invenção, podem ser obtidas fibras ópticas tendo excepcionais reduções na sensibilidade de microcurvatura.

A fibra de vidro insensível à curvatura descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0127878 A1 (isto é, a "fibra descrita") inclui um núcleo central, uma primeira cobertura interna, uma segunda cobertura interna enterrada profundamente, que contém germânio e uma cobertura externa. Mesmo o germânio é usado como um dopante para aumentar o índice de sílica, a presença de germânio na cobertura enterrada profundamente torna possível aumentar o coeficiente óptico-elástico da 15 cobertura enterrada. Portanto, quando tensões são aplicadas na fibra, em particular quando a fibra sofre curvatura ou microcurvatura, a presença da cobertura enterrada profundamente contendo germânio limita os efeitos das tensões nas mudanças do índice refrativo da fibra. As perdas ópticas são, 20 portanto, reduzidas, quando tais tensões são aplicadas a uma fibra tendo uma segunda cobertura interna enterrada profundamente contendo germânio.

Mais particularmente, a fibra de transmissão óptica possui (i) um núcleo central, tendo uma diferença de índice  $\Delta n_1$  com uma cobertura óptica externa; (ii) uma primeira cobertura interna, tendo uma diferença de 25 índice  $\Delta n_2$  com a cobertura externa; (iii) uma segunda cobertura interna enterrada, tendo uma diferença de índice  $\Delta n_3$  com a cobertura externa de menos do que  $-3 \cdot 10^{-3}$ , e (iv) contendo germânio em uma concentração de peso entre 0,5 % e 7 %.

De acordo com uma forma de realização da fibra, a diferença

de índice  $\Delta n_3$  da segunda cobertura interna com a cobertura externa é maior do que  $-15 \cdot 10^{-3}$ . A diferença de índice entre o núcleo central e a primeira cobertura interna ( $\Delta n_1 - \Delta n_2$ ) pode situar-se entre  $3,9 \times 10^{-3}$  e  $5,9 \times 10^{-3}$ . De acordo com outra forma de realização, a segunda cobertura enterrada tem um

5 raio entre 12 microns e 25 microns.

O núcleo central pode ter um raio entre 3,5 microns e 4,5 microns e apresenta uma diferença de índice com a cobertura externa entre  $4,2 \times 10^{-3}$  e  $6,1 \times 10^{-3}$ .

Em ainda outra forma de realização, a primeira cobertura

10 interna tem um raio entre 7,5 microns e 14,5 microns e apresenta uma diferença de índice com a cobertura externa entre  $-1,2 \times 10^{-3}$  e  $1,2 \times 10^{-3}$ .

A fibra descrita aqui pode ser descrita nos termos da integral  $I_1$  do núcleo central, que é definida como:

$$I_1 = \int_0^{r_1} Dn(r) dr \approx r_1 \times \Delta n_1$$

15 e, nas formas de realização preferidas, situa-se entre  $17 \times 10^{-3}$  microns e  $24 \times 10^{-3}$  microns.

Em termos de já outra característica, em um comprimento de onda de 1310 nanometros, a presente fibra apresenta uma inclinação de dispersão cromática de  $0,093 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$  ou menor. A presente fibra pode

20 também apresentar (i) cancelamento da dispersão cromática em um comprimento de onda entre 1.300 nanometros e 1324 nanometros e/ou (ii) um comprimento de onda de corte de cabo de 1260 nanometros ou menor.

A fibra óptica descrita pode ser ainda descrita em termos de suas perdas de curvatura sob várias condições de operação. Em um

25 comprimento de onda de 1625 nanometros, as perdas de curvatura para um enrolamento de 100 voltas em torno de um raio de curvatura de 15 milímetros são de 1dB ou menor. Em um comprimento de onda de 1625 nanometros, a presente fibra apresenta perdas de curvatura para um enrolamento de 1 volta

em torno de um raio de curvatura de 11 milímetros, de 0,5 dB ou menor. Ao longo destas linhas, novamente em um comprimento de onda de 1625 nanômetros, a presente fibra apresenta perdas de curvatura para um enrolamento de 1 volta em torno de um raio de curvatura de 5 milímetros, de 2 dB ou menor. Finalmente, para tratar ainda outra característica desta fibra óptica, até um comprimento de onda de 1625 nanômetros, a fibra óptica descrita mostra perdas de microcurvatura, medidas pelo chamado método de tambor de diâmetro fixo, de 0,8 dB/km ou menor.

Mais particularmente, a fibra de vidro insensível à curvatura descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0127878 A1 tem um núcleo central, uma primeira cobertura interna e uma segunda cobertura interna enterrada. Por cobertura enterrada queremos significar uma parte radial de uma fibra com um índice refrativo que é menor do que o índice da cobertura externa. A segunda cobertura interna enterrada tem uma diferença de índice com a cobertura externa que é menor do que  $-3 \times 10^{-3}$  e pode alcançar  $-15 \times 10^{-3}$ . Também, a cobertura enterrada contém germânio em uma concentração de peso entre 0,5 % e 7 %.

Como conhecido por si, uma fibra óptica é obtida pelo estiramento de uma preforma. Por exemplo, a preforma pode ser um tubo de vidro (sílica pura) de qualidade muito elevada, que forma parte da cobertura externa e circunda o núcleo central e as coberturas internas da fibra, este tubo pode então ser enluvadado ou recarregado para aumentar seu diâmetro antes de proceder com a operação de estiramento em uma torre de extração. Para manufacturar a preforma, o tubo é geralmente montado horizontalmente e mantido em posição em suas duas extremidades por hastes de vidro em um torno mecânico; o tubo é então girado e localmente aquecido, para depositar componentes, determinando a composição da preforma. Esta composição determina as características ópticas da futura fibra.

A deposição dos componentes dentro do tubo é comumente

chamada “dopagem”, isto é, “impurezas” são adicionadas à sílica para modificar seu índice refrativo. Portanto, germânio (Ge) ou Fósforo (P) aumenta o índice refrativo da sílica; eles são com frequência usados para dopar o núcleo central da fibra. Também, flúor (F) ou Boro (B) diminuem o índice refrativo da sílica; eles são com frequência usados para formar coberturas enterradas ou como co-dopantes com germânio, quando é desejado compensar quanto ao aumento do índice refrativo em uma cobertura fotossensível.

Uma preforma com uma cobertura enterrada é difícil de fabricar. O flúor não incorpora facilmente em sílica, quando aquecido além de uma certa temperatura, enquanto uma elevada temperatura é necessária para manufaturar o vidro. O compromisso entre a elevada temperatura requerida para fabricar vidro e a baixa temperatura que promove a incorporação própria do flúor torna praticamente impossível obter-se índices muito mais baixos do que aqueles da sílica.

É proposto aqui manufaturar a preforma da presente fibra empregando-se uma técnica PCVD (Deposição de Vapor Químico de Plasma), visto que permite reações em temperaturas mais baixas do que as técnicas convencionais (CVD, VAD, OVD) ionizando-se os componentes de reação. Esta técnica de manufatura é descrita na Patente U.S. Nos. RE 30.635 e 4.314.833; a técnica permite maior incorporação de flúor na sílica, a fim de formar coberturas enterradas profundamente.

O uso da técnica PCVC, para manufaturar a fibra descrita aqui, também torna possível adicionar germânio na cobertura enterrada. Como indicado previamente, o germânio aumenta o índice refrativo da sílica; é, portanto, em geral, altamente desaconselhável incorporar o mesmo em uma seção de fibra em que procura-se obter um índice refrativo mais baixo do que o da sílica. O PCVD torna possível, entretanto, produzir um alto número de íons de flúor elevadamente reativos; então, torna-se possível adicionar

germânio na reação e, contudo, obter uma cobertura interna enterrada.

Portanto, a presente fibra compreende germânio dentro do conjunto de coberturas internas, incluindo a cobertura com um índice de refração menor do que  $-3 \times 10^{-3}$ . A presença de germânio na cobertura enterrada modifica a viscosidade da sílica e o coeficiente óptico-elástico desta camada de cobertura.

A Figura 14 ilustra um perfil de índice para esta fibra de transmissão. O perfil ilustrado é um perfil estabelecido, isto é, representa o perfil teórico da fibra. A fibra realmente obtida após estiramento de uma preforma possivelmente tem um perfil substancialmente diferente.

A fibra de transmissão de modo único inclui (i) um núcleo central tendo uma diferença de índice  $\Delta n_1$  com uma cobertura externa que serve como uma cobertura óptica; (ii) uma primeira cobertura interna tendo uma diferença de índice  $\Delta n_2$  com a cobertura externa; e (iii) uma segunda cobertura interna, que é enterrada profundamente e tem uma diferença de índice  $\Delta n_3$  com a cobertura externa. Os índices refrativos do núcleo central, da primeira cobertura e da segunda cobertura interna, são substancialmente constantes através de sua largura inteira; o perfil estabelecido é, portanto, de fato, uma fibra de modo único. A largura do núcleo é definida por seu raio  $r_1$  e a largura das coberturas por seus respectivos raios externos  $r_2$  e  $r_3$ .

Para definir um perfil de índice estabelecido para uma fibra óptica, o índice da cobertura externa é geralmente tomado como referência. Os valores do índice do núcleo central, coberturas enterradas e do anel (isto é, a primeira cobertura interna) são então fornecidos como diferenças de índice  $\Delta n_{1,2,3}$ . Geralmente, a cobertura externa é formada de sílica, porém esta cobertura externa pode ser dopada para aumentar ou reduzir seu índice refrativo, por exemplo, para modificar as características de propagação de sinal.

Cada seção do perfil da fibra pode, portanto, ser definida

empregando-se integrais que associam as variações dos índices com o raio de cada seção de fibra.

Três integrais podem ser definidas para a presente fibra. Os valores da integral representam a superfície do núcleo  $I_1$ , a superfície da primeira cobertura interna  $I_2$  e a superfície da segunda cobertura interna enterrada  $I_3$ . A expressão “superfície” não deve ser interpretada geometricamente, porém corresponde a um valor considerando duas dimensões. Estas três integrais podem ser expressas como a seguir:

$$I_1 = \int_0^{r_1} Dn(r) \cdot dr = r \times Dn$$

$$I_2 = \int_{r_1}^{r_2} Dn(r) \cdot dr = (r_2 - r_1) \times Dn$$

$$I_3 = \int_{r_2}^{r_3} Dn(r) \cdot dr = (r_3 - r_2) \times Dn$$

A Tabela 2 abaixo fornece os valores limites dos raios e as diferenças de índice, e os valores limites da integral  $I_1$ , que são requeridos de modo que a fibra apresente reduzidas perdas de curvatura e perdas de microcurvatura, enquanto satisfazendo os critérios de propagação óptica da norma G.652 para fibras de transmissão. Os valores dados na tabela correspondem aos perfis estabelecidos das fibras.

**TABELA 2**

$r_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_3$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_1/r_2$	$\Delta n_1$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta n_2$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta n_3$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta n_1 - \Delta n_2$	$I_1$ ( $\mu\text{m} \times 10^3$ )
3,5	7,5	12,0	0,27	4,2	-1,2	-15	3,9	17
4,5	14,5	25,0	0,5	6,2	1,2	-3	5,9	24

O valor da integral  $I_1$  do núcleo central influencia o formato e o tamanho do modo de propagação fundamental do sinal da fibra. Um valor integral para o núcleo central entre  $17 \times 10^3$  microns e  $24 \times 10^3$  microns torna possível, em particular, manter um diâmetro do campo de modo que seja compatível com a norma G.652.

A tabela 3 abaixo fornece exemplos de perfis de índices possíveis para a fibra de transmissão descrita. A primeira coluna distribui uma

referência para cada perfil. As seguintes colunas fornecem os valores dos raios de cada seção ( $r_1$  a  $r_3$ ); e as seguintes colunas fornecem os valores das diferenças de índice de cada seção com a cobertura externa ( $\Delta n_1$  a  $\Delta n_3$ ). Os valores do índice são medidos do comprimento de onda de 633 nanômetros.

5

TABELA 3

Exemplo	$r_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_3$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta n_1$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta n_2$ ( $\times 10^3$ )	$\Delta n_3$ ( $\times 10^3$ )
1	2,86	6,90	13,24	5,41	2,00	-3,70
2	3,86	9,50	15	5,16	0,69	-5,0
3	4,02	9,55	15	5,31	0,45	-5,0
4	3,86	8,66	15	5,41	0,85	-5,0

A presente fibra de transmissão, tendo um perfil de índice tal como descrito previamente, apresenta reduzidas perdas de curvatura e perdas de microcurvatura em comprimentos de onda utilizáveis. Além disso, a presente fibra satisfaz os critérios da norma G.652. As tabelas III e IV abaixo  
10 ilustram as características ópticas simuladas para fibras de transmissão correspondendo aos perfis de índice da Tabela 3.

Na Tabela 4, a coluna um reproduz as referências da Tabela 3. As seguintes colunas, para cada perfil de fibra, fornecem os valores do comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$ , comprimento de onda de corte de  
15 cabo  $\lambda_{\text{cc}}$ , diâmetros de campo de modo 2W02 para os comprimentos de onda de 1310 nanômetros e 1.550 nanômetros, o comprimento de onda de cancelamento da dispersão cromática  $\lambda_0$ , a inclinação de dispersão  $P_0$  a  $\lambda_0$ , e as dispersões cromáticas  $C$  para os comprimentos de onda de 1.550 nanômetros e 1625 nanômetros.

20 Na Tabela 5, a coluna um reproduz as referências da Tabela 4. A seguinte coluna fornece os valores MAC em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros. As três colunas seguintes fornecem os valores para as perdas de curvatura BL, para os respectivos raios de curvatura de 5, 11 e 15 milímetros em um comprimento de onda de 1625 nanômetros. A seguinte  
25 coluna, para um raio de 15 milímetros, fornece as perdas de curvatura relativas normalizadas com relação às perdas de curvatura padrão de uma

fibra SSMF, tendo o mesmo valor MAC em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros. As segunda até a última colunas fornecem as perdas de microcurvatura, obtidas com o teste de formação de pinos (10 pinos de 1,5 milímetros) em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros.

5 O teste de formação de pinos usa uma formação de dez  
 10 agulhas polidas, de 1,5 milímetros de diâmetro e afastadas entre si de 1 cm. A  
 fibra é tecida, através da formação, ortogonalmente ao eixo geométrico das  
 agulhas. A fibra e a formação são pressionadas entre duas placas rígidas  
 revestidas com uma camada de aproximadamente 3 milímetros de espuma de  
 15 polietileno de elevada densidade. As camadas do conjunto (placas, formação,  
 fibra) são posicionadas horizontalmente e o conjunto é revestido com um peso  
 de 250 gramas. A última coluna indica as perdas de microcurvatura medidas  
 empregando-se o método de tambor de diâmetro fixo em um comprimento de  
 onda de 1625 nanômetros. Este método é descrito nas recomendações técnicas  
 da International Electrotechnical Commission, subcomitê 86A, sob referência  
 IEC TR-62221. O diâmetro do tambor usado é de 60 cm; o tambor é revestido  
 com lixa extra-fina. Os valores das perdas de curvatura (BL) são indicados em  
 um comprimento de onda de 1625 nanômetros.

TABELA 4

N	$\lambda_{\text{cut-off}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_{\text{cutoff}}$ ( $\mu\text{m}$ )	2W02 @1310nm ( $\mu\text{m}^2$ )	2W02 @1550nm ( $\mu\text{m}^2$ )	$\lambda_0$ (nm)	$P_0$ (ps/nm <sup>2</sup> /km)	C @ 1550nm (ps/nm/km)	C @ 1625nm (ps/nm/km)
1	1,13	<1,26	9,10	10,18	1308	0,097	19,2	23,9
2	1,23	<1,26	9,16	10,36	1312	0,091	18,1	22,9
3	1,25	<1,26	9,01	10,13	1318	0,089	17,3	22,0
4	1,25	<1,26	9,00	10,08	1318	0,091	17,8	22,5

20

TABELA 5

Nº	MAC @1550nm	BL R=5mm @1625nm (dB/turn)	BL R=11mm @1625nm (dB/turn)	BL R=15mm @1625nm (dB/100 turns)	BLrel R=15mm @1625nm	BL $\mu$ Teste de formação de pino @1550nm (dB)	BL $\mu$ Método de tambor. @1625nm (dB/km)
1	9,0	$\leq 5$	$\leq 2$		1/5		
2	8,4	2	$\leq 0,5$	$\leq 1$	1/5	0,025	$\leq 0,8$
3	8,1	1	$\leq 0,1$	$\leq 0,4$	1/5	$\leq 0,025$	$\leq 0,8$
4	8,1	1	$\leq 0,1$	$\leq 0,4$	1/5	$\leq 0,025$	$\leq 0,8$

Pode ser visto na Tabela 4 que os exemplos 2-4 de fato obedecem a norma G.652; o exemplo 1 mostra uma inclinação de dispersão  $P_0$  situando-se ligeiramente fora da norma G.652.

5 Em particular, a fibra dos exemplos 2 a 4 mostra cancelamento da dispersão cromática para um comprimento de onda entre 1.300 nanômetros e 1324 nanômetros; isto está de acordo com a norma G.652. A fibra dos exemplos 2 a 4 também mostram, para um comprimento de onda de 1310  
10 ps/nm<sup>2</sup>/km ou menor, que está de acordo com a norma G.652. Também a fibra dos exemplos 2 a 4 apresentam um comprimento de onda de corte de cabo que é de 1260 nanômetros ou menor, satisfazendo os critérios da norma G.652, que requer um comprimento de onda de corte cabeado de 1260 nanômetros ou menor.

15 Além disso, pode ser visto na Tabela 5 que os exemplos 2 a 4 exibem distintamente perdas de curvatura melhoradas com respeito às perdas da fibra de transmissão SSMF padrão. As perdas de microcurvatura também são melhoradas.

20 Os gráficos das Figuras 15a, 15b e 15c mostram medições de perdas de curvatura obtidas com as fibras ópticas descritas, bem como medições de perda de curvatura para fibras padrão. As medições correspondem aos raios de curvatura de R=5 mm, R=11 mm e R=15 mm em um comprimento de onda de 1625 nanômetros. As perdas de curvatura aqui são dadas na extremidade de um laço (para R=5 e R=11 mm) ou na  
25 extremidade de 100 laços (para R=15 mm).

A Figura 16a mostra perdas de microcurvatura para as fibras ópticas descritas e caracterizadas pelo teste de formação de pino, quando medidas em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros. Os valores da perda de microcurvatura são mostrados em relação ao valor MAC em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros para diferentes fibras SSMF e para a fibra de vidro descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0127878 A1.

A Figura 16b mostra perdas de microcurvatura, usando-se o teste de tambor de diâmetro fixo em relação ao comprimento de onda para uma fibra SSMF e para a fibra descrita tendo valores MAC em um comprimento de onda 1.550 nanômetros de 8,11 e 8,31, respectivamente.

Também, os gráficos das Figuras 16a e 16b claramente mostram que a sensibilidade da presente fibra à microcurvatura é notadamente reduzida, com respeito àquela de uma fibra SSMF. Pode ser visto na Figura 16a que as perdas de microcurvatura (teste de formação de pino) medidas para a fibra descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0127878 A1, tendo um valor MAC de 8,44 em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, equivalem a 0,025 dB, enquanto as perdas de microcurvatura são dez vezes mais elevadas para uma fibra SSMF tendo o mesmo valor MAC. Pode ser visto na Figura 16b, que as perdas de microcurvatura (método de tambor fixo) para a fibra descrita aumentam muito mais lentamente com o comprimento de onda do que para uma fibra SSMF que tem um valor MAC maior, entretanto, no comprimento de onda de 1.550 nanômetros. Neste gráfico, pode ser visto que a presente fibra garante uma sensibilidade à microcurvatura até longos comprimentos de onda, maiores do que 1650 nanômetros, que é equivalente à sensibilidade que pode ser garantida para uma fibra SSMF até um comprimento de onda de 1.550 nanômetros.

A presente fibra de transmissão pode ser fabricada por

estiramento de uma preforma tendo um dos perfis de índice descritos acima. Os perfis de preforma podem ser feitos, por exemplo, de uma luva de sílica em que camadas de sílica dopadas são depositadas. A deposição pode ser feita por uma Deposição de Vapor Químico de Plasma (PCVD), tipo o método de deposição mencionado anteriormente. Esta deposição química em forma de vapor ativado por plasma (PCVD) é particularmente adequada para obtenção de uma camada de cobertura interna enterrada para a presente fibra. Em formas de realização preferidas, esta camada de cobertura enterrada inclui germânio em uma concentração de peso entre 0,5 % e 7 %. A concentração em peso de germânio é preferivelmente entre 0,5 % e 1,5 %, visto que esta permite um ótimo equilíbrio entre custos mais baixos e mais fáceis de manufacturar por um lado e boas características da fibra por outro lado. Outra fibra de vidro insensível à curvatura exemplar para uso na presente invenção é descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1 e seu Pedido de Patente U.S. No. 11/697.994 relacionado para uma *Single Mode Optical Fiber* (de Montmorillon et al). Combinando-se (*i*) uma fibra de vidro insensível à curvatura, tendo o perfil de índice refrativo como descrito na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1, e um revestimento de acordo com a presente invenção, podem ser obtidas fibras ópticas tendo reduções excepcionais na sensibilidade de microcurvatura.

A fibra de vidro insensível à curvatura descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1 (isto é, a “fibra descrita”) abrange um perfil de índice escalonado particular com uma primeira seção elevadamente rebaixada e uma segunda seção fracamente rebaixada. Com uma tal estrutura, é possível efetivamente reduzir as perdas de curvatura da constante MAC, enquanto minimizando-se fortemente os modos de escapamento de uma ordem mais elevada. Assim, diferente das fibras da arte anterior, tendo uma estrutura de índice escalonado com uma seção rebaixada, esta fibra descrita tem um comprimento de onda de corte de cabo que

permanece menor do que 1260 nanômetros. Esta fibra descrita desta maneira obedece a norma G.652.

Mais particularmente e como esquematicamente representado na Figura 17, a fibra de transmissão óptica descrita 10 inclui: um núcleo central 11, tendo uma diferença de índice ( $Dn_1$ ) com uma cobertura óptica externa 16; uma primeira cobertura interna intermediária 12, tendo uma diferença de índice ( $Dn_2$ ) com a cobertura óptica externa 16; uma primeira cobertura interna rebaixada 13, tendo uma diferença de índice ( $Dn_3$ ) com a cobertura óptica externa 16 que é menor do que ou igual a  $-5 \times 10^{-3}$ ; uma segunda cobertura interna intermediária 14, tendo uma diferença de índice ( $Dn_4$ ) com a cobertura óptica externa 16; uma segunda cobertura interna rebaixada 15, tendo uma diferença de índice ( $Dn_5$ ) com a cobertura óptica externa 16 que é inferior, em valor absoluto, à diferença de índice  $Dn_3$  entre a primeira cobertura interna rebaixada 13 e a cobertura óptica externa 16; e em que, para um comprimento de onda de 1625 nanômetros, a fibra óptica 10 tem perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,1 dB/10 voltas, para um raio de curvatura de 15 milímetros, e perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,5 dB/volta, para um raio de curvatura de 7,5 milímetros.

A fibra de vidro descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1 pode incluir uma ou mais das seguintes características: a diferença de índice entre a segunda cobertura interna rebaixada e a cobertura óptica externa é entre  $-0,3 \times 10^{-3}$  e  $-3 \times 10^{-3}$ ; a diferença de índice entre o núcleo central e a primeira cobertura interna intermediária é entre  $4,5 \times 10^{-3}$  e  $6,0 \times 10^{-3}$ ; o núcleo central tem um raio entre 3,5 microns e 4,5 microns, para uma diferença de índice com a cobertura óptica externa entre  $5,0 \times 10^{-3}$  e  $5,6 \times 10^{-3}$ ; a primeira cobertura interna intermediária tem um raio entre 9 microns e 12  $\mu\text{m}$ ; a primeira cobertura interna rebaixada tem um raio entre 14 microns e 16  $\mu\text{m}$ ; a segunda cobertura interna intermediária tem uma diferença de índice de substancialmente zero

com a cobertura óptica externa; a segunda cobertura interna intermediária tem um raio entre 18 microns e 20  $\mu\text{m}$ ; a segunda cobertura interna rebaixada tem um raio entre 25 microns e 40  $\mu\text{m}$ ; perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,1 dB/100 voltas, para um raio de curvatura de 20 milímetros do comprimento de onda de 1625 nanômetros; perdas de curvatura menores do que ou iguais a 1 dB/volta, para um raio de curvatura de 5 milímetros do comprimento de onda de 1625 nanômetros; perdas de microcurvatura, de acordo com o chamado método do tambor de diâmetro fixo (“touret à diamètre fixe”), menores do que ou iguais a 0,8 dB/km até um comprimento de onda de 1625 nanômetros; um comprimento de onda de corte de cabo menor do que ou igual a 1260 nanômetros; um diâmetro do campo de modo entre 8,6 microns e 9,5 microns, para um comprimento de onda de 1310 nanômetros; uma razão (MAC) do diâmetro do campo de modo da fibra a 1.550 nanômetros sobre o comprimento de onda de corte eficaz ( $\lambda_{\text{ceff}}$ ), menor do que 8,2; um comprimento de onda de dispersão cromática ( $\lambda_0$ ), entre 1.300 nanômetros e 1324 nanômetros, com uma inclinação de dispersão cromática inferior ou igual a 0,092 ps/nm<sup>2</sup>/km deste comprimento de onda.

Em relação à fibra de vidro insensível à curvatura descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1 e com referência à Figura 17, a fibra óptica 10 tem um núcleo central 11, uma primeira cobertura interna intermediária 12 e uma primeira cobertura interna rebaixada 13. A fibra também tem uma segunda cobertura interna intermediária 14 e uma segunda cobertura interna rebaixada 15. Por cobertura interna rebaixada, significa que uma parte radial da fibra 10 tem um índice refrativo menor do que o índice da cobertura óptica externa 16. A primeira cobertura interna rebaixada 13 tem uma diferença de índice com a cobertura óptica externa 16 que é tipicamente menor do que  $-5 \times 10^{-3}$ , porém que pode alcançar  $-15 \times 10^{-3}$ . A segunda cobertura interna rebaixada 15 tem uma menor diferença de índice com a cobertura externa 16 do que com a primeira

cobertura interna rebaixada 13; esta diferença de índice é tipicamente entre  $-0,3 \times 10^{-3}$  e  $3 \times 10^{-3}$ .

Como será observado por aqueles tendo habilidade comum na arte, a Figura 17 é uma representação esquemática de uma fibra exemplar. A Figura 17 destina-se à representar as posições relativas do núcleo central 11 e as respectivas camadas de cobertura 11-16 dentro da fibra 10. Portanto, o núcleo central 11 e as camadas de cobertura 11-16 não são necessariamente desenhadas em escala (por exemplo, a cobertura externa 16).

A Figura 18 ilustra um perfil de índice para uma fibra de transmissão descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1. O perfil ilustrado é um perfil estabelecido (isto é, representativo do perfil teórico da fibra). A fibra realmente obtida, após retirar a fibra de uma preforma, pode ter um perfil ligeiramente diferente.

A fibra de transmissão do índice escalonado descrita inclui um núcleo central, tendo uma diferença de índice ( $Dn_1$ ) com uma cobertura óptica externa, que atua como uma cobertura óptica; uma primeira cobertura interna intermediária tendo uma diferença de índice ( $Dn_2$ ) com a cobertura óptica externa; uma primeira cobertura interna rebaixada, tendo uma diferença de índice ( $Dn_3$ ) com a cobertura óptica externa; uma segunda cobertura interna intermediária, tendo uma diferença de índice ( $Dn_4$ ) com a cobertura óptica externa e uma segunda cobertura interna rebaixada, tendo uma diferença de índice  $Dn_5$  com a cobertura óptica externa. A diferença de índice ( $Dn_5$ ) é, em valor absoluto, menor do que a diferença de índice ( $Dn_3$ ). Os índices refrativos do núcleo central, nas primeira e segunda camadas internas rebaixadas e nas primeira e segunda camadas internas intermediárias, são substancialmente constantes através da totalidade de suas larguras. O perfil estabelecido é uma fibra de índice escalonado. A largura do núcleo é definida por seu raio ( $r_1$ ) e a largura das coberturas é definida por seus respectivos raios externos, (isto é,  $r_2$ - $r_5$ ).

A fim de definir um perfil de índice estabelecido para uma fibra óptica, o valor do índice da cobertura externa é geralmente tomado como uma referência. A Figura 18 mostra somente uma pequena parte da cobertura óptica externa e destina-se a esquematicamente ilustrar as diferenças de índice no núcleo. A cobertura óptica externa, de índice substancialmente constante, estende-se até o exterior da fibra óptica. Em outras palavras, não há ainda cobertura óptica tendo diferentes índices refrativos fora da cobertura óptica externa. Os valores do índice para o núcleo central, as coberturas internas rebaixadas e as coberturas intermediárias, são então mostrados como diferenças de índice ( $Dn_{1,2,3,4,5}$ ). Geralmente, a cobertura óptica externa consiste de sílica, porém esta cobertura pode ser dopada, a fim de aumentar ou reduzir seu índice refrativo, (por exemplo, mudar as características de propagação do sinal).

A Tabela (abaixo) provê valores de limitação típicos para os raios e as diferenças de índice que permitem que um perfil de fibra seja obtido de modo que a fibra tenha reduzidas perdas de curvatura, enquanto satisfazendo os critérios para a propagação óptica pela norma G.652 para fibras de transmissão. Os valores r correspondem aos perfis da fibra estabelecidos:

20

TABELA 6

	$R_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_3$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_4$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_5$ ( $\mu\text{m}$ )	$Dn_1$ ( $10^{-3}$ )	$Dn_1 - Dn_2$ ( $10^{-3}$ )	$Dn_3$ ( $10^{-3}$ )	$Dn_5$ ( $10^{-3}$ )
min	35	9,0	14,0	18,0	25,0	5,0	4,5	-5	-0,3
max	4,5	12,0	16,0	20,0	40,0	5,6	6,0	-15	-3

A presença da segunda cobertura interna rebaixada ( $r_5$ ,  $Dn_5$ ), que é menos rebaixada do que a primeira cobertura interna rebaixada, provê uma limitação da presença de formas de evaporação capazes de propagação ao longo da fibra e indução de um aumento no comprimento de onda de corte eficaz. Pela presença da primeira cobertura interna intermediária ( $r_2$ ,  $Dn_2$ ), é possível garantir o próprio confinamento do sinal de modo único do núcleo central e reter um diâmetro do campo de modo compatível com a norma

25

G.652. Pela presença da primeira cobertura interna profundamente rebaixada ( $r_3$ ,  $Dn_3$ ), as perdas de curvatura podem ser ainda reduzidas.

A fibra de transmissão descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1, tendo um perfil de índice tal como descrito previamente, tem reduzidas perdas de curvatura nos comprimentos de onda de uso.

Em particular, para um comprimento de onda de 1625 nanômetros, a fibra descrita tem perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,1 dB, para um enrolamento de 100 voltas em torno de um carretel com um raio de curvatura de 20 milímetros; perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,1 dB, para um enrolamento de 10 voltas em torno de um carretel com um raio de curvatura de 15 milímetros; perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,2 dB, para um enrolamento de uma volta em torno de um carretel com um raio de curvatura de 10 milímetros; perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,5 dB, para um enrolamento de uma volta em torno de um carretel com um raio de curvatura de 7,5 milímetros; perdas de curvatura menores do que ou iguais a 1 dB, para um enrolamento de uma volta em torno de um carretel com um raio de curvatura de 5 milímetros.

A fibra descrita tem ainda menores perdas de curvatura no comprimento de onda de 1.550 nanômetros. Em particular, para um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, a fibra tem perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,02 dB, para um enrolamento de 10 voltas em torno de um carretel com um raio de curvatura de 15 milímetros; perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,05 dB, para um enrolamento de uma volta em torno de um carretel ou um raio de curvatura de 10 milímetros; perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,2 dB, para um enrolamento de uma volta em torno de um carretel com um raio de curvatura de 7,5 milímetros.

Além disso, a fibra descrita também tem perdas de

microcurvatura reduzidas, quando comparadas com um SSMF. As perdas de microcurvatura podem ser estimadas com um chamado teste de grade (10 agulhas de 1,5 milímetros) no comprimento de onda de 1.550 nanômetros. Este teste usa uma grade, formada com dez agulhas polidas com um diâmetro de 1,5 milímetros e afastadas entre si por 1 cm. A fibra passa através da grade, sobre as duas passagens, ortogonalmente ao eixo geométrico das agulhas. A fibra e a grade são pressionadas entre duas placas rígidas cobertas com uma camada de cerca de 3 milímetros de espuma de polietileno de elevada densidade. As camadas do conjunto (isto é, placas, grades, fibra) são posicionadas horizontalmente e o conjunto é coberto com uma massa de 250 gramas. Com este teste, a fibra tem perdas de microcurvatura menores do que ou iguais a 0,025 dB a 1.550 nanômetros.

As perdas de microcurvatura podem também ser estimadas pelo chamado método do tambor de diâmetro fixo em um comprimento de onda de 1625 nanômetros. Este método é descrito na recomendação técnica da International Electrotechnical Commission of subcomitê 86A sob referência IEC TR62221. O diâmetro do tambor usado é de 60 cm; o tambor é coberto com lixa extra fina. Com este método a fibra descrita tem perdas de microcurvatura menores do que ou iguais a 0,8 dB/km a 1625 nanômetros.

Além disso, a fibra descrita satisfaz os critérios da norma G.652.

Em particular, tem um comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$  menor do que 1330 nanômetros, de modo que o comprimento de onda de corte de cabo  $\lambda_{\text{cc}}$  seja menor do que 1260 nanômetros, em conformância com a norma G.652. A fibra descrita também tem um MFD entre 8,6 microns e 9,5 microns, para um comprimento de onda de 1310 nanômetros.

A fibra descrita pode também ter uma razão MAC de até cerca de 8,2. O produto para manufaturar esta fibra é, portanto, melhor, porque não há mais qualquer necessidade para selecionar exclusivamente fibras com um

MAC menor do que 7,9.

A Figura 19 ilustra graficamente as perdas de curvatura a 1625 nanômetros versus os raios de curvatura para um SSMF, para uma fibra idêntica com a fibra descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1, porém sem a segunda seção rebaixada e para duas fibras, como descrito na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. 2007/0280615 A1.

Uma primeira curva (3A) mostra as perdas de curvatura de um índice escalonado SSMF. Esta fibra tem um MAC de 8,1. Observa-se que para pequenos raios de curvatura, menores do que 7,5 milímetros, as perdas de curvatura aumentam consideravelmente e excedem o valor de 1dB para um enrolamento de uma volta. Uma tal fibra convencional, atualmente usada para transmissões de longa distância, não é, portanto, adequada para uma aplicação FFTH ou FTTC, visto que nenhuma pode ser enrolada em uma caixa miniatura de um módulo óptico, nem ser submetida a possíveis curvaturas acidentais relacionadas com a instalação sem induzir a fortes perdas ópticas.

Uma segunda curva (3B) mostra as perdas de curvatura de uma fibra sem qualquer segunda seção rebaixada. Esta fibra tem um MAC de 8,2 e satisfaz os critérios da norma G.652. Observa-se que para pequenos raios de curvatura, menores do que 7,5 milímetros, as perdas de curvatura são menores do que 1 dB/volta. Por outro lado, as perdas de curvatura permanecem relativamente significativas para maiores raios de curvatura. Assim, a fibra tem perdas de curvatura da ordem de 0,5 dB, para um enrolamento de 10 voltas em torno de um carretel com um raio igual a 20 milímetros, e da ordem de 0,4 dB, para um enrolamento de 100 voltas em torno de um carretel com um raio igual a 20 milímetros. Estes valores de perda de curvatura, para raios de curvatura de 15 milímetros e 20 milímetros, não permitem que esta fibra seja usada em caixas de armazenagem com tais raios de enrolamento.

Uma terceira curva (3C) mostra as perdas de curvatura de uma fibra como descrito. A fibra correspondendo a esta curva tem um MAC de 8,2 e satisfaz os critérios da norma G.652. Observa-se que para pequenos raios de curvatura, menores do que 7,5 milímetros, as perdas de curvatura são da ordem de 0,4 dB/volta, menores do que o valor máximo preferido de 0,5 dB/volta; e para um raio de curvatura de 10 milímetros, a fibra descrita tem perdas de curvatura da ordem de 0,2 dB/volta (isto é, o valor limitante superior alvejado). Também, para raios de curvatura maiores, as perdas de curvatura permanecem limitadas; assim, para um raio de curvatura de 15 milímetros, a fibra tem perdas de curvatura da ordem de 0,04 dB/10 voltas, menores do que o valor máximo preferido de 0,1 dB/10 voltas; e para um raio de curvatura de 20 milímetros, a fibra descrita tem perdas de curvatura da ordem de 0,03 dB/100 voltas, menores do que o valor máximo preferido de 0,1 dB/100 voltas.

Uma quarta curva (3D) mostra as perdas de curvatura de outra fibra de acordo com a Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0280615 A1. A fibra correspondendo a esta curva tem um MAC de 8,1 e satisfaz os critérios da norma G.652. Observa-se que para pequenos raios de curvatura, menores do que 7,5 milímetros, as perdas de curvatura são da ordem de 0,1 dB/volta, menores do que o valor máximo preferido de 0,5 dB/volta; e para um raio de curvatura de 10 milímetros, a fibra descrita tem perdas de curvatura da ordem de 0,07 dB/volta, menores do que o valor máximo preferido de 0,2 dB/volta. Também, para maiores raios de curvatura, as perdas de curvatura permanecem limitadas; assim, para um raio de curvatura de 15 milímetros, a fibra descrita tem perdas de curvatura da ordem de 0,04 dB/10 voltas, menores do que o valor máximo preferido de 0,1 dB/10 voltas; e para um raio de curvatura de 20 milímetros, a fibra descrita tem perdas de curvatura da ordem de 0,01 dB/100 voltas, menores do que o valor máximo preferido de 0,01 dB/100 voltas.

Já outra fibra de vidro insensível à curvatura exemplar para uso na presente invenção é descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2008/0152288 A1 e seu Pedido de Patente U.S. No. 11/999.333 relacionado para uma *Optical Fiber* (Flammer et al.). Combinando-se (i) uma  
5 fibra de vidro insensível à curvatura, tendo o perfil de índice refrativo como descrito na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2008/0152288 A1, e um revestimento de acordo com a presente invenção, podem ser obtidas fibras ópticas tendo reduções excepcionais na sensibilidade de microcurvatura.

A fibra de vidro insensível à curvatura da Publicação do  
10 Pedido de Patente U.S. No. US 2008/0152288 A1 (isto é, a "fibra descrita") possui (i) um núcleo tendo um raio  $r_1$  que inclui pelo menos dois dopantes de núcleo, em que o núcleo tem uma diferença de índice refrativo  $\Delta n_1$  com uma cobertura óptica externa (por exemplo, uma cobertura óptica exterior); (ii) uma primeira cobertura interna (isto é, uma cobertura intermediária) tendo um  
15 raio  $r_2$ , e uma diferença de índice refrativo  $\Delta n_2$  com a cobertura externa; e (iii) uma segunda cobertura interna rebaixada (isto é, uma vala rebaixada) tendo um raio  $r_3$ , e uma diferença de índice refrativo  $\Delta n_3$  com a cobertura externa de menos do que  $-3 \times 10^{-3}$ ; e em que a concentração radial de pelo menos um dos dopantes de núcleo varia substancial e continuamente através da região do  
20 núcleo.

De acordo com formas de realização exemplares, a fibra descrita pode incluir um ou mais dos seguintes aspectos adicionais:

- A concentração radial de pelo menos um dos dopantes de núcleo varia continuamente através da região inteira do núcleo;
- 25 - A concentração radial de cada um de pelo menos dois dopantes de núcleo varia continuamente através da região inteira do núcleo;
- A variação radial de pelo menos uma concentração de dopante de núcleo é de modo que seu primeiro derivativo seja proporcional à fração de potência radial  $P(r)$  do sinal óptico transmitido na fibra óptica;

- A fibra óptica tem, em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, uma largura de espectro Brillouin espontânea maior do que ou igual a 100 MHz;

5 - A variação de pelo menos uma concentração de dopante de núcleo corresponde a uma variação de índice refrativo maior do que ou igual a  $1 \times 10^{-3}$ ;

- Os dopantes de núcleo são selecionados de germânio (Ge), flúor (F), fósforo (P), alumínio (Al), cloro (Cl), boro (B), nitrogênio (N) e/ou metais alcalinos;

10 - Um dos dopantes de núcleo é o germânio (Ge), a concentração de germânio varia radialmente no núcleo entre cerca de 1 e 20 % em peso, com base na composição total do núcleo (isto é, massa). Em outras palavras, em qualquer posição dentro do núcleo, a concentração de germânio varia entre 1 e 20 % em peso (isto é, uma concentração radial de  
15 cerca de 1-20 % em peso de germânio).

- Um dos dopantes de núcleo é o flúor (F), a concentração de flúor varia radialmente no núcleo entre cerca de 0,3 e 8 % em peso, com base na composição total do núcleo (isto é, massa). Em outras palavras, em qualquer posição dentro do núcleo a concentração de flúor varia entre 0,3 e 8  
20 % em peso (isto é, uma concentração radial de cerca de 0,3-8 % em peso de flúor).

- Um dos dopantes de núcleo é o fósforo (P), a concentração de fósforo varia radialmente no núcleo entre cerca de 1 e 10 % em peso, com base na composição total do núcleo (isto é, massa). Em outras palavras, em qualquer posição dentro do núcleo a concentração de fósforo varia entre 1 e  
25 10 % em peso (isto é, uma concentração radial de cerca de 1-10 % em peso de fósforo).

- A segunda cobertura interna rebaixada inclui germânio em uma concentração radial entre 0,5 % em peso e 7 % em peso, com base na

composição total da segunda cobertura interna (isto é, massa). Diferentemente citado, em qualquer posição dentro da segunda cobertura interna a concentração de germânio é entre cerca de 0,5 e 7 % em peso.

5 - A diferença de índice refrativo  $\Delta n_3$  entre a segunda cobertura interna e a cobertura externa é maior do que cerca de  $-15 \times 10^{-3}$ ;

- A fibra óptica tem, em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, uma área eficaz maior do que ou igual a  $50 \mu\text{m}^2$ ;

- A fibra óptica tem, em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, uma atenuação menor do que ou igual a 0,3 dB/km;

10 - A fibra óptica tem, em um comprimento de onda de 1625 nanômetros, perdas de curvatura que são menores do que cerca de 0,1 dB para um enrolamento de dez voltas em torno de um raio de curvatura de 15 milímetros; menores do que cerca de 0,2 dB para um enrolamento de uma volta em torno de um raio de curvatura de 10 milímetros; e menores do que  
15 cerca de 0,5 dB para um enrolamento de uma volta em torno de um raio de curvatura de 7,5 milímetros;

- A fibra óptica tem, em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, perdas de curvatura que são menores do que cerca de 0,02 dB para um enrolamento de dez voltas em torno de um raio de curvatura de 15  
20 milímetros; menores do que cerca de 0,05 dB para um enrolamento de uma volta em torno de um raio de curvatura de 10 milímetros; e menores do que cerca de 0,2 dB para um enrolamento de uma volta em torno de um raio de curvatura de 7,5 milímetros;

25 - A fibra óptica tem, até um comprimento de onda de 1625 nanômetros, perdas de microcurvatura, medidas pelo chamado método de tambor de diâmetro fixo, de 0,8 dB/km ou menores.

Em um aspecto (e com referência à Figura 20), a fibra de vidro insensível à curvatura, descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2008/0152288 A1, inclui um núcleo 11 (isto é, a região do núcleo central

em que o sinal óptico a ser transmitido é guiado) e uma região de cobertura para confinamento do sinal óptico dentro do núcleo 11. A região de cobertura inclui uma primeira cobertura interna 12, uma vala rebaixada 13 (ou segunda cobertura interna rebaixada), e uma cobertura externa 14 (por exemplo, uma  
5 cobertura óptica externa). A vala rebaixada 13, tipicamente, tem uma diferença de índice refrativo com a cobertura externa 14 que é menor do que  $-3 \times 10^{-3}$  (por exemplo, menor do que cerca de  $-15 \times 10^{-3}$ ).

A região do núcleo da fibra descrita inclui pelo menos dois dopantes, cujas concentrações, de fato, variam continuamente através do raio  
10 inteiro da região do núcleo. Tipicamente, a variação substancialmente contínua da concentração dopante radial é progressiva (por exemplo, aumentando continuamente em uma direção radial) ou regressiva (por exemplo, diminuindo continuamente em uma direção radial). Como dito, a concentração dopante radial pode tanto aumentar como diminuir em uma  
15 direção radial.

A variação do primeiro dopante (por exemplo, germânio) é compensada pela variação do segundo dopante (por exemplo, flúor), para ser obtido um perfil de índice refrativo predeterminado da região do núcleo. A região do núcleo permanece longitudinalmente homogênea ao longo da fibra  
20 óptica (isto é, concentrações dos dopantes de núcleo são constantes ao longo do comprimento da fibra óptica).

Como será observado por aqueles tendo habilidade comum na arte, dependendo da aplicação, a fibra óptica tem um perfil de índice refrativo alvo que é definido de acordo com vários parâmetros (isto é, diâmetro do  
25 campo de modo, parâmetros de dispersão cromática, comprimento de onda de corte eficaz e área eficaz).

A variação de concentração de dopante na direção radial da fibra óptica, particularmente em seu núcleo, amplia o espectro Brillouin e, portanto, aumenta o limiar de Brillouin. Uma variação de dopante suave

garante a distribuição de potência de modo uniforme para as diferentes concentrações de dopantes e limita perdas de fibra. O uso de pelo menos dois dopantes na fibra óptica facilita a realização de um perfil de índice refrativo alvo e reduz o impacto da redução SBS nos outros parâmetros ópticos, particularmente, diâmetro do campo de modo e parâmetros de dispersão cromática. A fibra descrita possui um perfil de índice refrativo que satisfaz a norma G.652 acima mencionada.

A Figura 14 representa um perfil de índice refrativo nominal de uma fibra óptica de transmissão de modo único exemplar. Como esquematicamente representado na Figura 20, a fibra óptica exemplar inclui (i) um núcleo central 11, tendo diferença de índice refrativo  $\Delta n_1$  com uma cobertura externa 14; (ii) uma primeira cobertura interna 12 (isto é, uma cobertura intermediária), tendo uma diferença de índice refrativo  $\Delta n_2$  com a cobertura externa 14; e (iii) uma vala rebaixada 13, tendo uma diferença de índice refrativo  $\Delta n_3$  com a cobertura externa 14. A largura do núcleo 11 é definida por seu raio  $r_1$  e a largura das coberturas por seus respectivos raios externos  $r_2$  e  $r_3$ .

Para definir um perfil de índice refrativo nominal para uma fibra óptica, o índice da cobertura externa é geralmente tomado como uma referência. Os valores de índice do núcleo central e das coberturas são então providos como diferenças de índice (isto é,  $\Delta n_{1,2,3}$ ) com a cobertura externa. Geralmente, a cobertura externa é formada de sílica, porém pode ser dopada para aumentar ou reduzir seu índice refrativo, tal como para modificar as características de propagação de sinal.

Cada seção do perfil de índice refrativo da fibra óptica pode, portanto, ser definida empregando-se integrais que associam as variações dos índices refrativos com o raio de cada seção de fibra. Vide Figura 20.

Desta maneira, três integrais podem ser definidas para a fibra óptica, que representam a superfície de núcleo  $I_1$ , a superfície da primeira

cobertura interna  $I_2$  e a superfície da segunda cobertura interna rebaixada  $I_3$ . A este respeito, a expressão “superfície” não é para ser interpretada geometricamente (isto é, estruturalmente), porém deve ser entendida, em vez disso, descrever a área sob a curva (isto é,  $r-\Delta n$ ), tal como representado na

5 Figura 14.

Estas três integrais podem ser expressas como a seguir:

$$I_1 = \int_0^{r_1} \Delta n(r) \cdot dr \approx r_1 \times \Delta n_1$$

$$I_2 = \int_{r_1}^{r_2} \Delta n(r) \cdot dr \approx (r_2 - r_1) \times \Delta n_2$$

$$I_3 = \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot dr \approx (r_3 - r_2) \times \Delta n_3$$

A Tabela 7 (abaixo) fornece os valores de limite dos raios e as diferenças de índice refrativo, e os valores de limite da integral  $I_1$ , que são necessários de modo que a fibra óptica mostre reduzidas perdas de curvatura e perdas de microcurvatura, enquanto satisfazendo os critérios de propagação óptica da norma G.652 para fibras de transmissão. Os valores providos na Tabela 7 são os perfis nominais das fibras ópticas exemplares.

TABELA 7

	$r_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_3$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_1/r_2$	$\Delta n_1$ ( $10^{-3}$ )	$\Delta n_2$ ( $10^{-3}$ )	$\Delta n_3$ ( $10^{-3}$ )	$\Delta n_1 - \Delta n_2$ ( $10^{-3}$ )	$I_1$ ( $\mu\text{m} \times 10^{-3}$ )
Min	3,5	7,5	12,0	0,27	4,2	-1,2	-15	3,9	17
Max	4,5	14,5	25,0	0,5	6,2	1,2	-3	5,9	24

15 A integral  $I_1$  do núcleo central influencia o formato e o tamanho do modo de propagação fundamental do sinal da fibra óptica. Um valor integral para o núcleo central entre  $17 \times 10^{-3}$  microns e  $24 \times 10^{-3}$  microns torna possível, em particular, manter um diâmetro do campo de modo que é compatível com a norma G.652. Além disso, a vala rebaixada  $\Delta n_3$  torna possível melhorar perdas de curvatura e perdas de microcurvatura em SSMF.

20

A região do núcleo da fibra descrita inclui pelo menos dois dopantes cujas respectivas concentrações variam substancial e continuamente através de essencialmente a região inteira do núcleo, enquanto mantendo-se

pré-determinado o perfil de índice refrativo da região do núcleo. Aqueles tendo habilidade comum na arte observarão que a concentração do dopante radial poderia ser inalterada através de pequenos incrementos (isto é, segmentos radiais). Isto dito, como um assunto prático, a concentração do dopante radial tipicamente varia continuamente através do raio do núcleo. Vide Figuras 21b-21c.

Como observado, isto permite a ampliação do espectro Brillouin e, portanto, aumenta o limiar de Brillouin. Devido à variação da concentração do dopante ser compensada, a fim de conservar um pré-determinado perfil de índice refrativo, notavelmente, na região do núcleo, os critérios de propagação óptica da norma G.652 não são arriscados pela presença de pelo menos dois dopantes no núcleo. Além disso, a primeira cobertura interna ( $\Delta n_2, r_2$ ) garante que a potência óptica permaneça na região do núcleo sem a vala rebaixada ( $\Delta n_3, r_3$ ) adversamente impactar a produção da potência óptica.

Para uma propagação de sinal em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, a fibra descrita tem uma largura de espectro Brillouin espontânea, que é pelo menos cerca de 100 MHz. Um tal espectro Brillouin ampliado aumenta eficazmente o limiar de Brillouin de pelo menos um fator de dois (ou por cerca de três dB na escala logarítmica), quando em comparação com uma fibra de modo único padrão (SSMF). A fibra descrita obtém um limiar de Brillouin muito mais elevado, em comparação com as fibras de transmissão de padrão com perda de fibra limitada (por exemplo, menos do que 0,3 dB/km em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros), sem mudança significativa nos parâmetros de transmissão óptica.

O primeiro núcleo dopante (por exemplo, germânio) é escolhido para obter-se variações fortes e contínuas em densidade e elasticidade no material da fibra. De acordo com uma forma de realização, a distribuição radial da primeira concentração do dopante  $C_d(r)$  é de modo que

seu primeiro derivativo seja proporcional à fração de potência radial  $P(r)$  do sinal óptico transmitido na fibra de acordo com a seguinte equação (em que  $\alpha$  é uma constante):

$$\frac{dC_d(r)}{dr} = \alpha \cdot P(r)$$

5                    Esta fração de potência radial  $P(r)$  é expressa em watt por metros, cuja integral é igual a potência  $P$  total transmitida de acordo com a seguinte relação:

$$\int P(r) dr = P$$

10                    De acordo com outra forma de realização, a vala rebaixada (isto é, a segunda cobertura interna) pode incluir germânio em uma concentração entre cerca de 0,5 e 7 % em peso, tipicamente, em uma concentração de menos do que cerca de 1,5 % em peso (por exemplo, entre cerca de 0,5 e 1,5 % em peso), mesmo se o índice precisar ser menor do que  $3 \times 10^{-3}$ . A presença de germânio na vala rebaixada modifica a viscosidade da  
15                    sílica e o coeficiente óptico-elástico da vala rebaixada, desse modo melhorando a sensibilidade de microcurvatura. As Figuras 21a, 21b e 21c referem-se a uma fibra óptica exemplar como descrito. A fibra óptica das Figuras 21a-21c possui um perfil de núcleo escalonado. O núcleo tem um dado valor de índice refrativo constante; a vala rebaixada é separada do  
20                    núcleo por uma camada interna intermediária (isto é, a primeira camada interna). A Figura 21a ilustra o perfil de índice refrativo da fibra óptica exemplar usando unidades arbitrárias.

                      Voltando à Figura 21b e à Figura 21c, a região do núcleo da fibra inclui um primeiro dopante, germânio (Ge), que é sabido aumentar o  
25                    valor do índice refrativo da sílica, e um segundo dopante, flúor (F), que é sabido diminuir o valor do índice refrativo da sílica. A Figura 21b e a Figura 21c ilustram concentrações de dopante em peso percentual. A concentração de pelo menos um dos dopantes do núcleo varia essencial e continuamente

através da região inteira do núcleo.

Com respeito à fibra óptica exemplar, representada nas Figuras 21a, 21b e 21c, ambos dopantes variam continuamente (e progressivamente) através da região inteira do núcleo. O uso de pelo menos dois dopantes garante que o perfil de índice refrativo do núcleo seja mantido em um perfil nominal, a fim de serem obtidas características de transmissão óptica desejáveis. De fato, devido ao segundo dopante poder compensar quanto à variação de índice refrativo introduzido pela variação da concentração do primeiro dopante, um perfil de índice refrativo alvo pode ser obtido.

A variação de pelo menos uma concentração do dopante de núcleo introduz variação de densidade e elasticidade na seção de fibra óptica que amplia o espectro Brillouin e, desse modo, aumenta o limiar de Brillouin. A variação da concentração de dopante de núcleo deve ser grande o bastante para introduzir suficiente variação de densidade e elasticidade a fim de reduzir SBS.

A invenção alcançou resultados satisfatórios, se pelo menos um dos dopantes de núcleo tem uma variação de concentração através da região inteira do núcleo que corresponda a uma variação de índice refrativo, que é pelo menos cerca de  $1 \times 10^{-3}$  (isto é, variação da concentração de dopante de núcleo suficiente para obter esta variação de índice refrativo, se não compensada por outro dopante de núcleo). Em outras palavras, a variação da primeira concentração de dopante (isto é, entre as concentrações de dopante radiais máxima e mínima) deve ser de modo que, sem a compensação de um segundo dopante, uma variação de índice refrativo de pelo menos  $1 \times 10^{-3}$  seria obtida no núcleo.

Como esquematicamente representado nas Figuras 21b-21c, a concentração de germânio varia progressivamente de 5,8 % em peso a 12 % em peso, e a concentração de flúor varia progressivamente de 0,1 % em peso a 1,7 % em peso.

A variação suave e regular de concentração de dopante garante a distribuição de potência de modo uniforme para a diferente concentração de dopante e limita perdas de fibra. As simulações realizadas em uma fibra óptica exemplificada nas Figuras 21a, 21b e 21c fornecem, em um comprimento de onda de sinal de 1.550 nanômetros, uma largura de espectro Brillouin espontânea maior do que 100 MHz e uma potência limiar SBS aumentada (isto é, aumentada por pelo menos um fator de dois em comparação com quando comparada com uma fibra de modo único padrão), e uma perda de Rayleigh limitada de cerca de 0,013 dB/km. Apesar deste aumento de perda de Rayleigh, a fibra descrita mantém complacência com a norma G.652, tendo perdas de atenuação de menos do que cerca de 0,3 dB/km a 1.550 nanômetros.

Como observado, as Figuras 21a, 21b e 21c representam um exemplo da fibra descrita. Outros dopantes, que não o germânio (Ge) e o flúor (F), podem ser usados para obter-se uma fibra óptica com SBS reduzido. A este respeito, a região do núcleo inclui pelo menos dois dopantes que podem ser selecionados de germânio (Ge), flúor (F), fósforo (P), alumínio (Al), cloro (Cl), boro (B), nitrogênio (N) e/ou metais alcalinos. Na medida em que um dos dopantes de núcleo é o germânio (Ge), a concentração tipicamente cai entre cerca de 1 e 20 % em peso; na medida em que um dos dopantes de núcleo é o flúor (F), a concentração é tipicamente menor do que 10 % em peso (por exemplo, entre cerca de 0,3 e 8 % em peso); na medida em que um dos dopantes de núcleo é o fósforo (P), a concentração tipicamente cai entre cerca de 1 e 10 % em peso.

A fibra óptica exemplar, representada nas Figuras 21a-21c, possui uma vala rebaixada para reduzir sua sensibilidade a perdas de curvatura. A fibra descrita, portanto, combina baixas perdas de curvatura e elevado limiar de Brillouin.

Convencionalmente, partindo-se do ensinamento de J.

Botineau et al. em "Effective Stimulated Brillouin Gain in Single Mode Optical Fibers," Electronics Letters, Vol. 31, No. 23 (1995), uma pessoa tendo habilidade comum na arte escolheria um perfil de índice refrativo com formato triangular ou formato parabólico para aumentar o limiar de Brillouin e poderia empregar uma vala externa para reduzir perdas de curvatura. Esta abordagem convencional, entretanto, apresenta complacência com as difíceis especificações G.652.

A Figura 22 compara quatro diferentes tipos de formatos de perfil de índice refrativo: um típico perfil de índice refrativo escalonado sem vala (isto é, SSMF); um perfil de índice refrativo de núcleo escalonado com uma vala na cobertura (por exemplo, a fibra óptica das Figuras 21a-21c); um perfil de índice refrativo de núcleo triangular com uma vala na cobertura; e um perfil de núcleo parabólico com uma vala na cobertura. Para cada um, numerosos perfis de índice refrativo com diferentes diâmetros de núcleo e nível de dopante máximo, foram simulados.

A Figura 22 representa o comprimento de onda de dispersão zero  $\lambda_0$  e a inclinação da dispersão do comprimento de onda de dispersão zero. A área retangular indica os parâmetros das especificações G.652 para aquelas características ópticas. Os perfis de fibra tendo comprimentos de onda de corte demasiadamente elevados e não se conformando com o diâmetro do campo de modo nominal a 1310 nanômetros, a fim de não serem complacentes com as especificações G.652, foram omitidos.

A Figura 22 mostra que adicionando-se uma vala rebaixada a um perfil SSMF, restringe-se a flexibilidade do perfil para produção e, assim, aumenta-se a taxa de rejeição de fibra. Empregando-se um perfil de índice refrativo de núcleo triangular com uma vala na cobertura, resulta em fibras ópticas que não satisfazem as necessidades G.652. Um perfil de índice refrativo de núcleo parabólico com uma vala na cobertura produz algumas fibras ópticas dentro das especificações G.652, porém a zona de tolerância é

estreita e muitos refugos seriam esperados.

A fibra de vidro insensível à curvatura descrita na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2008/0152288 A1 alcança reduzidas perdas de curvatura e microcurvatura, bem como um limiar de Brillouin muito mais elevado, em comparação com as fibras ópticas de transmissão padrão. A fibra descrita pode ser usada em um módulo receptor de um sistema FTTH ou em um módulo transmissor para entrada de sinais de elevada potência em um sistema de telecomunicação, ou em um cabo de transmissão óptica de longo arrasto de elevada taxa de bits, com perdas ópticas reduzidas. Além disso, a fibra descrita é compatível com os sistemas comercializados, visto que satisfaz a norma G.652.

Em uma forma de realização, a fibra descrita exibe, em um comprimento de onda de 1310 nanômetros, uma inclinação de dispersão cromática de 0,092 ps/(nm<sup>2</sup>.km) ou menor; um cancelamento de dispersão cromática em um comprimento de onda entre 1.300 e 1324 nanômetros; e um comprimento de onda de corte cabeado de 1260 nanômetros ou menor.

Em outra forma de realização, a fibra descrita tem, em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, uma área superior eficaz superior ou igual a 50 μm<sup>2</sup>, tipicamente 80 μm<sup>2</sup>, e atenuação a 1.550 nanômetros de menos do que ou igual a 0,3 dB/km. Tal fibra óptica de acordo com esta forma de realização é adequada para uso na transmissão de dados nos sistemas de telecomunicação.

A este respeito, um sistema de transmissão óptica exemplar pode incluir um transmissor óptico emitindo sinais ópticos em uma faixa pré-determinada de comprimento de onda, uma fibra óptica de transmissão e um receptor óptico recebendo o sinal óptico com melhorada relação sinal-ruído (SNR) devido à reduzida SBS e limitado aumento nas perdas de fibra (por exemplo, atenuação). Quando comparado com sistemas convencionais, o transmissor óptico pode introduzir na fibra óptica um sinal óptico com mais

elevada potência, a potência do limiar de Brillouin para a fibra óptica de transmissão sendo aumentada por pelo menos um fator de dois, em comparação com um SMF convencional.

5 Em outra forma de realização, a fibra descrita tem, em um comprimento de onda de 1625 nanômetros, melhoradas perdas de curvatura como a seguir: menores do que cerca de 0,1 dB, para um enrolamento de dez voltas em torno de um raio de curvatura de 15 milímetros; menores do que cerca de 0,2 dB, para um enrolamento de uma volta em torno de um raio de curvatura de dez milímetros; e menores do que cerca de 0,5 dB, para um  
10 enrolamento de uma volta em torno de um raio de curvatura de 7,5 milímetros.

Da mesma maneira, a fibra descrita tem, em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, perdas de curvatura melhoradas como a seguir: menores do que cerca de 0,02 dB, para um enrolamento de dez voltas em  
15 torno de um raio de curvatura de 15 milímetros; menores do que cerca de 0,05 dB, para um enrolamento de uma volta em torno de um raio de curvatura de dez milímetros; e menores do que cerca de 0,2 dB, para um enrolamento de uma volta em torno de um raio de curvatura de 7,5 milímetros.

Além disso, para comprimentos de onda de até 1625  
20 nanômetros, a fibra descrita demonstra perdas de microcurvatura de menos do que 0,8 dB/km, medidas pelo chamado método de tambor de diâmetro fixo. Portanto, tal fibra óptica é adequada para implementação em módulos ópticos ou caixas de armazenagem para uso em sistemas FTTH ou FTTC.

\* \* \*

25 Já outra fibra de vidro insensível à curvatura exemplar para uso na presente invenção é descrita no Pedido de Patente U.S. No. 61/112.006 para uma *Bend-Insensitive Single-Mode Optical Fiber* (de Montmorillon et al). Combinando-se (i) uma fibra de vidro insensível à curvatura, tendo o perfil de índice refrativo como descrito no Pedido de Patente U.S. No.

61/112.006, e o revestimento de acordo com a presente invenção, podem ser obtidas fibras ópticas tendo virtualmente insignificante sensibilidade à tensões induzidas por microcurvatura.

5 A fibra de vidro insensível à curvatura descrita no Pedido de Patente U.S. No. 61/112.006 (isto é, a “fibra descrita”) inclui um núcleo central, uma cobertura intermediária e uma vala rebaixada. O perfil de índice refrativo é otimizado, para melhorar as perdas de curvatura por um fator de dez em relação às restrições impostas pela norma G.652, enquanto mantendo-se um diâmetro do campo de modo compatível com a norma G.652 e  
10 garantindo-se uma atenuação suficiente do modo LP11.

Em particular, a superfície do núcleo, bem como a superfície e o volume da vala rebaixada, são otimizados para melhorar as consideráveis perdas de curvatura. A superfície do núcleo ou a superfície da vala rebaixada não deve estender-se geometricamente, porém deve corresponder aos valores  
15 considerando-se duas dimensões - o produto do raio e a diferença de índice. Similarmente, o volume da vala rebaixada corresponde a um valor considerando-se três dimensões - o produto do quadrado do raio e a diferença de índice.

A fibra descrita inclui, de seu centro para sua periferia, um  
20 núcleo central, uma cobertura intermediária, uma vala rebaixada e uma cobertura óptica externa. O núcleo central tem um raio  $r_1$  e uma diferença de índice positiva  $\Delta n_1$  com a cobertura óptica externa. A cobertura intermediária tem um raio  $r_2$  e uma diferença de índice positiva  $\Delta n_2$  com a cobertura óptica externa. A diferença  $\Delta n_2$  é menor do que a diferença de índice  $\Delta n_1$  do núcleo.  
25 A vala rebaixada tem um raio  $r_3$  e uma diferença de índice negativa  $\Delta n_3$  com a cobertura óptica externa. A fibra descrita é ainda caracterizada pelo fato de ter (i) um diâmetro do campo de modo (MDF) entre 8,6 microns e 9,5 microns em um comprimento de onda de 1310 nanômetros e (ii) perdas de curvatura menores do que  $0,25 \times 10^{-3}$  dB/voltas para um raio de curvatura de 15

milímetros e um comprimento de onda de 1.550 nanômetros. O comprimento da fibra requerido para a atenuação do modo LP11, para 19,3 dB de alcance em um comprimento de onda de 1260 nanômetros, é menor do que 90 metros.

De acordo com uma forma de realização da fibra, a superfície integral do núcleo central ( $V_{01}$ ), definida como

$$V_{01} = \int_0^{r_1} \Delta n(r) \cdot dr \approx r_1 \times \Delta n_1 ,$$

é entre  $20,0 \times 10^{-3}$  microns e  $23,0 \times 10^{-3}$  microns. A superfície integral da vala rebaixada ( $V_{03}$ ), definida como

$$V_{03} = \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot dr \approx (r_3 - r_2) \times \Delta n_3 ,$$

é entre  $-55,0 \times 10^{-3}$  microns e  $-30,0 \times 10^{-3}$  microns. A integral volumétrica da vala rebaixada ( $V_{13}$ ), definida como,

$$V_{13} = 2 \cdot \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot r \cdot dr \approx (r_3^2 - r_2^2) \times \Delta n_3 ,$$

é entre  $-1200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  e  $-750 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

Em formas de realização preferidas, a fibra tem propriedades físicas e parâmetros operacionais com melhorada resistência à perdas de curvatura. Por exemplo, a fibra tem um comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$  maior do que 1350 nanômetros, o comprimento de onda de corte eficaz sendo medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico torna-se de modo único, após propagação através de dois metros de fibra. A fibra tem, para um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, perdas de curvatura menores do que ou iguais a  $7,5 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 10 milímetros, perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,05 dB/volta, para um raio de curvatura de 7,5 milímetros, e perdas de curvatura menores do que 0,15 dB/volta, para um raio de curvatura de 5 milímetros.

A fibra descrita aqui também apresenta reduzidas perdas de curvatura em comprimentos de onda mais elevados. Por exemplo, em um

comprimento de onda de 1625 nanômetros a fibra tem perdas de curvatura menores do que  $1,5 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 15 milímetros, perdas de curvatura menores do que ou iguais a  $25 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 10 milímetros, perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,08 dB/volta, para um raio de curvatura de 7,5 milímetros, e perdas de curvatura menores do que 0,25 dB/volta, para um raio de curvatura de 5 milímetros. Portanto, em uma forma de realização preferida, a fibra tem um comprimento de onda de corte de 1.300 nanômetros e 1400 nanômetros, com o comprimento de onda de corte medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico não mais é de modo único após propagação através de 5 metros de fibra. O comprimento de onda de corte é distinguido do corte de cabo, medido como o comprimento de onda em que a atenuação do modo LP11 é maior do que ou igual a 19,3 dB após propagação através de 22 metros de fibra. A fibra tem um comprimento de onda de corte de cabo entre 1.250 nanômetros e 1.300 nanômetros.

Uma terceira medição em debate aqui é o comprimento de onda de corte teórico, medido como o comprimento de onda em que o modo LP11 é propagado em modo de vazamento. Em uma forma de realização, a fibra tem um comprimento de onda de corte teórico menor do que ou igual a 1.250 nanômetros. A fibra tem uma atenuação do modo LP11 maior do que 5 dB, após propagação através de 22 metros de fibra em um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

Os parâmetros operacionais descritos acima resultam das propriedades físicas preferidas da fibra. Em uma forma de realização, o núcleo central da fibra tem um raio entre 3,8 microns e 4,35  $\mu\text{m}$ ; a cobertura intermediária tem um raio entre 8,5 microns e 9,7  $\mu\text{m}$ ; a vala rebaixada tem um raio entre 13,5 microns e 16  $\mu\text{m}$ , que pode ser menor do que ou igual a 15  $\mu\text{m}$ , e o núcleo central tem uma diferença de índice com a cobertura óptica externa entre  $5,3 \times 10^{-3}$  e  $5,7 \times 10^{-3}$ .

Como citado acima, o perfil de índice refrativo de uma fibra é plotado em termos da diferença entre os valores do índice refrativo em pontos do raio da fibra e a cobertura óptica externa. A cobertura intermediária tem uma diferença de índice com a cobertura óptica entre  $0,1 \times 10^{-3}$  e  $0,6 \times 10^{-3}$ . A vala rebaixada tem uma diferença de índice com a cobertura óptica entre  $-10,0 \times 10^{-3}$  e  $-5,0 \times 10^{-3}$ . A fibra tem um comprimento de onda de dispersão cromática zero entre 1.300 nanômetros e 1324 nanômetros; a fibra tem um valor de inclinação de dispersão cromática no comprimento de onda de dispersão cromática zero de menos do que  $0,092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ .

Como representado na Figura 23, a fibra de vidro insensível à curvatura (10), descrita no Pedido de Patente U.S. No. 61/112.006, tem um núcleo central (11), uma cobertura intermediária (12) e uma cobertura rebaixada (13). Para fins aqui, cobertura rebaixada significa uma parte radial da fibra (10) tendo um índice refrativo menor do que o índice da cobertura óptica externa (14). Tipicamente, o núcleo central (11), a cobertura intermediária (12) e a cobertura rebaixada (13) são obtidos por deposição de vapor químico em um tubo de sílica. A cobertura óptica externa (14) inclui o tubo de sílica e a sobrecoertura do tubo. Em formas de realização preferidas, a sobrecoertura é geralmente natural ou sílica dopada, porém pode também ser obtida por qualquer outra técnica de deposição (deposição axial de vapor (“VAD”) ou deposição de vapor externo (“OVD”)).

A Figura 24 ilustra um perfil de índice refrativo para a fibra de transmissão (10) da Figura 23. O perfil da Figura 24 é um perfil estabelecido, isto é, representativo do perfil teórico da fibra, porém a fibra realmente obtida após estiramento da fibra de uma preforma tem um perfil ligeiramente diferente.

De uma maneira conhecida na arte por si, uma fibra óptica (10) é obtida por estiramento da preforma. Por meio de exemplo, a preforma pode ser um tubo de vidro de elevada qualidade (sílica pura), que

eventualmente forma parte da cobertura óptica externa (14). A cobertura óptica externa (14) circunda o núcleo central (11) e as coberturas internas (12, 13) da fibra (10). Este tubo pode então ser sobre coberto para aumentar seu diâmetro antes de passar através da operação de estiramento de fibra em uma torre de estiramento de fibra. Para a produção da preforma, o tubo é geralmente montado horizontalmente e mantido em ambas extremidades por barras de vidro em um torno mecânico; em seguida o tubo é girado e localmente aquecido para o processo de deposição determinar a composição da preforma. Esta composição determina as características ópticas da futura fibra.

A fibra inclui um núcleo central (11), tendo uma diferença de índice  $\Delta n_1$  com uma cobertura externa (14), funcionando como uma cobertura óptica. A fibra (10) ainda inclui uma cobertura intermediária (12), tendo uma diferença de índice  $\Delta n_2$  com a cobertura óptica externa (14) e uma cobertura de vala rebaixada (13) tendo uma diferença de índice  $\Delta n_3$  com a cobertura óptica externa (14). Os índices refrativos do núcleo central (11), a cobertura intermediária (12) e a vala rebaixada (13) são substancialmente constantes através de suas respectivas larguras, como apresentado na Figura 24. A Figura 23 ilustra que a largura do núcleo (11) é definida por seu raio  $r_1$  e a largura das coberturas por seus respectivos raios externos  $r_2$  e  $r_3$ . A cobertura óptica externa é indicada como  $r_4$ .

A fim de definir um determinado perfil de índice refrativo para uma fibra óptica, o valor do índice da cobertura óptica externa é geralmente tomado como uma referência ( $n_g$ ). Os valores do índice do núcleo central (11), da cobertura intermediária (12) e da cobertura de vala rebaixada (13) são então apresentados na Figura 24 como diferenças de índice  $\Delta n_{1,2,3}$ . Geralmente a cobertura óptica externa (14) é composta de sílica, porém esta cobertura pode ser dopada para aumentar ou reduzir seu índice refrativo - por exemplo, para modificar as características de propagação do sinal.

Cada seção de perfil de fibra mostrado na Figura 24 (21-24) pode também ser definida com base nas integrais que ligam as variações de índice com o raio de cada seção da fibra (10). É assim possível definir três integrais de superfície para a fibra descrita (10), representativas da superfície do núcleo  $V_{01}$ , da superfície da cobertura intermediária  $V_{02}$  e da superfície da vala rebaixada  $V_{03}$ . A expressão “superfície” não deve ser entendida geometricamente, porém corresponde a um valor considerando-se duas dimensões.

Estas três superfícies integrais podem ser expressas como a seguir:

$$V_{01} = \int_0^{r_1} \Delta n(r) \cdot dr \approx r_1 \times \Delta n_1$$

$$V_{02} = \int_{r_1}^{r_2} \Delta n(r) \cdot dr \approx (r_2 - r_1) \times \Delta n_2$$

$$V_{03} = \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot dr \approx (r_3 - r_2) \times \Delta n_3 .$$

Similarmente, é possível definir três integrais volumétricas para a fibra descrita (10), representativas do volume do núcleo  $V_{11}$ , do volume da cobertura intermediária  $V_{12}$  e do volume da vala rebaixada  $V_{13}$ . A expressão “volume” não deve ser entendida geometricamente, porém corresponde a um valor considerando-se três dimensões. Estas três integrais volumétricas podem ser expressas como a seguir:

$$V_{11} = 2 \cdot \int_0^{r_1} \Delta n(r) \cdot r \cdot dr \approx r_1^2 \times \Delta n_1$$

$$V_{12} = 2 \cdot \int_{r_1}^{r_2} \Delta n(r) \cdot r \cdot dr \approx (r_2^2 - r_1^2) \times \Delta n_2$$

$$V_{13} = 2 \cdot \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot r \cdot dr \approx (r_3^2 - r_2^2) \times \Delta n_3 .$$

A Tabela 8 (abaixo) mostra 30 exemplos de perfis de fibra, de acordo com as formas de realização preferidas, em comparação com três perfis de fibra SSMF, e um perfil de fibra correspondendo às normas G.657A e G.657B (mencionado como “BIF” para Fibra Insensível à curvatura). Como observado, Draka Comteq comercializa fibras ópticas insensíveis à curvatura, tendo excelente resistência à perdas de curvatura sob o nome comercial BendBright<sup>xs®</sup>. Os valores nas tabelas correspondem aos perfis estabelecidos para cada fibra.

A primeira coluna da Tabela 8 designa uma referência para cada exemplo; as três colunas seguintes fornecem os valores dos raios do núcleo (11), da cobertura intermediária (12) e da vala rebaixada (13), respectivamente. As três colunas seguintes fornecem os correspondentes valores das diferenças de índice com a cobertura óptica externa (14). Os valores de índice são medidos em um comprimento de onda de 633 nanômetros. A Tabela 8 também mostra os valores da superfície integral e da integral volumétrica do núcleo (11), da cobertura intermediária (12) e da vala rebaixada (13), como definido acima.

TABELA 8

	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$\Delta n_1$	$\Delta n_2$	$\Delta n_3$	$V_{01}$	$V_{02}$	$V_{03}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$
	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	[ $10^{-3}$ ]	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}^2$ )	( $\mu\text{m}^2$ )	( $\mu\text{m}^2$ )
				[ $10^{-3}$ ]	[ $10^{-3}$ ]	[ $10^{-3}$ ]	[ $10^{-3}$ ]	[ $10^{-3}$ ]	[ $10^{-3}$ ]	[ $10^{-3}$ ]	[ $10^{-3}$ ]	[ $10^{-3}$ ]
<b>BIF</b>	3,93	9,38	14,72	5,26	0,13	-5,01	20,7	0,7	-26,8	81,1	9,4	-645
<b>SSMF</b> 1	4,35	13,92		5,00	-0,20		21,8	-1,9	0,0	94,6	-35,0	0
<b>SSMF</b> 2	4,51	13,92		5,00	-0,20		22,5	-1,9	0,0	101,5	-34,7	0
<b>SSMF</b> 3	4,55	13,92		5,24	-0,20		23,8	-1,9	0,0	108,4	-34,6	0

Ex1	3,97	9,38	14,25	5,56	0,11	-9,74	22,1	0,6	-47,4	87,7	8,3	-1120
Ex2	3,98	8,65	13,83	5,52	0,21	-9,56	22,0	1,0	-49,5	87,3	12,6	-1113
Ex3	4,01	8,95	14,39	5,38	0,20	-9,27	21,6	1,0	-50,4	86,5	13,1	-1177
Ex4	3,98	8,77	13,79	5,56	0,33	-9,25	22,1	1,6	-46,5	87,9	19,9	-1049
Ex5	3,90	8,70	14,31	5,58	0,44	-7,93	21,8	2,1	-44,5	84,8	26,6	-1024
Ex6	4,03	9,17	14,04	5,45	0,21	-9,62	21,9	1,1	-46,8	88,3	14,0	-1087
Ex7	4,04	8,61	14,39	5,56	0,15	-7,05	22,4	0,7	-40,7	90,5	8,7	-937
Ex8	3,83	8,94	13,92	5,69	0,52	-8,51	21,8	2,6	-42,4	83,7	33,8	-969
Ex9	4,01	8,97	14,39	5,38	0,39	-8,45	21,6	1,9	-45,8	86,4	25,1	-1071
Ex10	3,84	9,30	14,38	5,49	0,48	-9,38	21,1	2,6	-47,7	81,0	34,2	-1129
Ex11	3,82	9,01	13,55	5,67	0,57	-9,63	21,7	2,9	-43,7	82,8	37,7	-986
Ex12	4,03	8,84	14,28	5,30	0,11	-9,52	21,3	0,5	-51,8	85,9	6,6	-1197
Ex13	3,96	8,61	13,86	5,58	0,31	-7,87	22,1	1,4	-41,3	87,6	17,9	-928
Ex14	3,92	8,78	13,84	5,55	0,32	-8,75	21,7	1,5	-44,3	85,2	19,7	-1002
Ex15	3,88	9,09	14,35	5,62	0,34	-7,84	21,8	1,8	-41,2	84,5	23,1	-965
Ex16	4,02	9,65	14,35	5,37	0,14	-9,72	21,6	0,8	-45,7	86,7	10,6	-1097
Ex17	4,01	9,19	14,39	5,32	0,36	-8,74	21,3	1,9	-45,4	85,6	24,9	-1072
Ex18	3,93	9,30	14,48	5,30	0,51	-7,76	20,8	2,7	-40,1	81,7	36,0	-955
Ex19	3,93	9,26	13,53	5,34	0,51	-9,74	21,0	2,7	-41,6	82,3	36,0	-949
Ex20	3,93	9,25	13,53	5,31	0,50	-9,93	20,8	2,7	-42,5	81,9	35,3	-967
Ex21	3,93	9,28	14,47	5,31	0,53	-7,51	20,9	2,8	-39,0	82,0	37,5	-926
Ex22	3,93	8,50	15,00	5,48	0,50	-5,00	21,5	2,3	-32,5	84,6	28,4	-764
Ex23	3,93	9,25	13,65	5,37	0,50	-9,90	21,1	2,7	-43,5	83,0	35,1	-997
Ex24	3,93	8,50	15,50	5,33	0,51	-5,00	21,0	2,3	-35,0	82,4	28,8	-840
Ex25	3,93	9,27	13,65	5,31	0,52	-9,80	20,9	2,8	-42,9	82,1	36,9	-983
Ex26	3,94	8,50	15,00	5,43	0,50	-5,00	21,4	2,3	-32,5	84,3	28,6	-764
Ex27	3,94	9,25	13,54	5,30	0,56	-9,87	20,9	3,0	-42,3	82,3	39,2	-964
Ex28	3,94	9,26	13,50	5,33	0,51	-9,88	21,0	2,7	-41,9	82,8	35,5	-954
Ex29	3,95	9,29	13,91	5,30	0,50	-8,93	20,9	2,7	-41,2	82,6	35,4	-957
Ex30	3,93	8,50	15,50	5,32	0,57	-5,00	20,9	2,6	-35,0	82,1	32,2	-840

A fibra descrita (10) é uma fibra de índice escalonado compreendendo um núcleo central (11), uma cobertura intermediária (12) e uma vala rebaixada (13). Observa-se pela Tabela 8 que o núcleo central (11) tem um raio  $r_1$  entre 3,8 microns e 4,35 microns e, preferivelmente, entre 3,8 5 microns e 4,05  $\mu\text{m}$ , isto é, mais estreito do que o núcleo de uma fibra SSMF. A fibra (10) tem uma diferença de índice  $\Delta n_1$  (21) com a cobertura óptica externa (14) entre  $5,3 \times 10^{-3}$  e  $5,7 \times 10^{-3}$ , isto é, maior do que uma fibra SSMF. A superfície integral do núcleo  $V_{01}$  é entre  $20,0 \times 10^{-3}$  microns e  $23,0 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$ , e a integral volumétrica do núcleo  $V_{11}$  é entre  $81 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}^2$  e  $91 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}^2$ .

Observa-se também na Tabela 8 que a fibra descrita tem uma vala rebaixada (13). A vala rebaixada (13) tem um grande volume e torna possível limitar muito as perdas de curvatura. A Tabela 8, mostra assim que a vala rebaixada (13) tem um raio  $r_3$  entre 13,5 microns e 16 microns e uma

diferença de índice  $\Delta_{n3}$  (23) com a cobertura óptica externa (14) entre  $-10,0 \times 10^{-3}$  e  $5,0 \times 10^{-3}$ . A tabela 8 também mostra que a superfície integral da vala rebaixada  $V_{03}$ , como definido acima, é entre  $-55,0 \times 10^{-3}$  microns e  $30,0 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$  e a integral volumétrica da vala rebaixada  $V_{13}$ , como definido acima, é  
5 entre  $-1200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  e  $-750 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

De acordo com uma forma de realização preferida, o raio da cobertura rebaixada  $r_3$  pode ser limitado a 15 microns, para reduzir mais o custo de produção da fibra (somente os exemplos 24 e 30 têm uma cobertura rebaixada com um raio maior do que 15  $\mu\text{m}$ ). De fato, a vala rebaixada (13)  
10 pode ser produzida por deposição de vapor químico de plasma (PCVD), tornando possível incorporar uma grande quantidade de flúor na sílica, para formar coberturas profundamente rebaixadas. A parte da fibra (10) correspondendo ao tubo e à deposição PCVD é, entretanto, a mais dispendiosa; é, portanto, procurado limitar esta parte tanto quanto possível. É  
15 também possível considerar a produção de valas rebaixadas (13) pela incorporação de microfuros ou microbolhas em vez de dopagem com flúor. A dopagem com flúor, entretanto, fica mais fácil de controlar por produção industrial do que a incorporação de microbolhas.

Uma vala rebaixada (13), correspondendo aos critérios de  
20 superfície e volume definidos acima, torna possível obter-se um bom comprometimento entre perdas de curvatura muito reduzidas em relação às fibras existentes e um regime de vazamento suficientemente consistente do modo LP11 em um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

Como está claro na Tabela 11, que é observada em detalhes  
25 mais adiante, a fibra descrita tem perdas de curvatura que são dez vezes (10x) menores do que os limites impostos pela norma G.657B. Por outro lado, a fibra descrita não está de acordo rigorosamente com a norma G.657, em termos de comprimento de onda de corte. Como está claro na Tabela 10, que é também observada em detalhes mais adiante, a fibra descrita tem um

comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$  maior do que 1350 nanômetros e um comprimento de onda de corte de cabo  $\lambda_{\text{cc}}$  entre 1.250 nanômetros e 1.300 nanômetros. Contudo, a fibra descrita aqui garante que os modos LP11 de mais elevada ordem são propagados no regime de modo de vazamento de 5 1260 nanômetros.

É também observado na Tabela 8 que uma forma de realização preferida da fibra tem uma cobertura intermediária (12) entre o núcleo central (11) e a vala rebaixada (13). Esta cobertura intermediária (12) torna possível limitar os efeitos da vala rebaixada (13) sobre a propagação do sinal óptico no 10 núcleo. A Tabela 8 mostra que a cobertura intermediária (12) tem um raio  $r_2$  entre 8,5 microns e 9,7 microns e uma diferença de índice  $\Delta n_2$  (22) com a cobertura óptica entre  $0,1 \times 10^{-3}$  e  $0,6 \times 10^{-3}$ . A tabela 8 mostra que a superfície integral da cobertura intermediária  $V_{02}$ , como definido acima, é entre  $0,5 \times 10^{-3}$  microns e  $3,0 \times 10^{-3}$  microns. A integral volumétrica da 15 cobertura intermediária  $V_{12}$ , como definido acima, é entre  $6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  e  $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

O núcleo central (11) da fibra descrita (10) é otimizado, em combinação com a cobertura intermediária (12), para garantir parâmetros de transmissão óptica na fibra em conformidade com as normas G.652 e G657A, 20 particularmente em termos de diâmetro do campo de modo e dispersão cromática. Isto também ajuda a garantir compatibilidade com as fibras de outros sistemas ópticos.

A tabela 9 (abaixo) mostra as características de transmissão óptica para fibras exemplares. A primeira coluna repete as referências da 25 Tabela 8. As seguintes colunas provêm, para cada perfil de fibra, os valores do diâmetro do campo de modo (MFD) para comprimentos de onda de 1310 nanômetros e 1.550 nanômetros, comprimento de onda de dispersão zero (ZDW) e inclinação de dispersão zero (ZDS).

**TABELA 9**

	MFD1310	MFD1.550	ZDW	ZDS
--	---------	----------	-----	-----

	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	ps/( $\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ )
BIF	8,80	9,90	1320	0,0878
SSMF1	9,14	10,31	1314	0,0855
SSMF2	9,27	10,39	1309	0,0871
SSMF3	9,18	10,25	1306	0,088
Ex1	8,63	9,62	1314	0,0899
Ex2	8,64	9,56	1308	0,0924
Ex3	8,76	9,71	1310	0,0918
Ex4	8,69	9,63	1309	0,0921
Ex5	8,68	9,66	1313	0,0914
Ex6	8,76	9,73	1310	0,0913
Ex7	8,66	9,58	1307	0,0916
Ex8	8,64	9,65	1317	0,0904
Ex9	8,86	9,84	1311	0,0918
Ex10	8,76	9,81	1319	0,0901
Ex11	8,67	9,68	1317	0,0908
Ex12	8,75	9,69	1308	0,0923
Ex13	8,65	9,59	1310	0,0917
Ex14	8,66	9,62	1312	0,0914
Ex15	8,64	9,65	1317	0,0897
Ex16	8,79	9,81	1314	0,0898
Ex17	8,89	9,90	1312	0,0913
Ex18	8,95	10,01	1317	0,0905
Ex19	8,91	9,94	1315	0,0913
Ex20	8,92	9,95	1315	0,0914
Ex21	8,96	10,02	1317	0,0905
Ex22	8,80	9,81	1314	0,0906
Ex23	8,89	9,91	1315	0,0913
Ex24	8,88	9,91	1314	0,0909
Ex25	8,94	9,97	1315	0,0914
Ex26	8,83	9,84	1313	0,0908
Ex27	8,97	10,00	1314	0,0917
Ex28	8,93	9,95	1314	0,0915
Ex29	8,95	9,99	1315	0,0911
Ex30	8,92	9,95	1314	0,0911

Observa-se na Tabela 9 que a fibra descrita (10) é compatível com as fibras correspondendo com os critérios da norma G.652. Em particular, a fibra descrita aqui tem um diâmetro do campo de modo MFD na faixa de valores padronizada de 8,6 microns a 9,5 microns em 1310 nanômetros, um comprimento de onda de dispersão zero entre 1.300 nanômetros e 1324 nanômetros, e uma inclinação de dispersão zero de menos do que 0,092 ps/( $\text{nm}^2 \cdot \text{km}$ ). Cada um destes valores está de acordo com a norma G.652.

Por outro lado, como mostrado pela Tabela 10 (abaixo), a fibra tem um comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$  maior do que 1350

nanômetros. Como observado acima, o comprimento de onda de corte é medido como sendo o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único após a propagação através de dois metros de fibra, como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-44. Este aumentado valor de comprimento de onda de corte eficaz resulta em um valor de comprimento de onda de corte de cabo  $\lambda_{cc}$  entre 1.250 nanômetros e 1.300 nanômetros. O comprimento de onda de corte de cabo é medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único após propagação através de 22 metros de fibra, como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-44. O sinal óptico é de modo único, quando a atenuação do modo LP11 é maior do que ou igual a 19,3 dB. Ambas as normas G.652 e G.657 impõem um valor máximo de 1260 nanômetros para o comprimento de onda de corte.

Um objetivo dos desenvolvimentos descritos aqui é produzir fibras que possam ser usadas em todas as larguras de banda de transmissão exploradas pelos sistemas ópticos, isto é, fibras que possam ser usadas na propagação de modo único da largura de banda original (OB), que estende-se de 1260 nanômetros a 1360 nanômetros, e até a largura de banda ultra-longa (UL), além de 1625 nanômetros. Um comprimento de onda de corte baixo torna possível garantir a possibilidade de usar a fibra através de todas as larguras de banda disponíveis.

As simulações da Tabela 10 (abaixo), entretanto, mostram que o modo LP11 de ordem diretamente mais elevada é propagado de acordo com um modo de vazamento de um comprimento de onda de 1260 nanômetros. A fibra descrita aqui pode, portanto, ser usada em transmissão de modo único através da largura de banda original (OB: 1260 nanômetros a 1360 nanômetros).

A Tabela 10 (abaixo) mostra diversos valores do comprimento

de onda de corte para as fibras descritas. A primeira coluna da Tabela 10 repete as referências da Tabela 8.

A coluna “Corte de Fibra Teórico” provê um valor de comprimento de onda de corte teórico, que corresponde ao comprimento de onda de transição entre uma propagação guiada do modo LP11 e uma propagação de modo de vazamento deste modo LP11. Para trabalhar comprimentos de onda além deste comprimento de onda de corte eficaz, o modo LP11 é propagado em modo de vazamento.

A coluna “Corte de Fibra Padrão” corresponde ao comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$ , como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44.

A coluna “Corte de Fibra de 5m” corresponde ao comprimento de onda de corte medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único após a propagação através de 5 metros de fibra. Este valor, portanto, corresponde ao comprimento de onda de corte eficaz medido após a propagação através de 5 metros de fibra em vez de 2 metros de fibra.

A coluna “Corte de Cabo Padrão” corresponde ao comprimento de onda de corte de cabo  $\lambda_{\text{cc}}$ , como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44. De acordo com a recomendação do subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44, o comprimento de onda de corte de cabo  $\lambda_{\text{cc}}$  é determinado posicionando-se a fibra em dois laços de raio de 40 milímetros e dispondo-se o resto da fibra (isto é, 21,5 metros de fibra) em um mandril com um raio de 140 milímetros.

A coluna “Corte de Cabo Reto” corresponde ao comprimento de onda de corte de cabo posicionando-se a fibra em dois laços, cada um tendo um raio de 40 milímetros e dispondo-se o resto da fibra (isto é, 21,5 metros de fibra) virtualmente reto.

A Coluna “LP11 LL @1260 após 22 m” indica as perdas de vazamento do modo LP11, após a propagação através de 22 metros de fibra virtualmente reta.

5 A coluna “Comprimento - 19,3dB LP11 LL @1260 nanômetros” indica o comprimento da fibra necessário para obter-se perdas de vazamento do modo LP11 iguais a 19,3dB com a fibra sendo mantida virtualmente reta. Isto indica em que distância a fibra, disposta virtualmente reta, é de modo único dentro do significado das normas G.652 e G.657.

**TABELA 10**

	Corte da Fibra (teórico)	Corte de Fibra Padrão	Corte de Fibra de 5m	Corte de Cabo Padrão	Corte de Cabo Reto	LP11 LL @1260 após 22 m	19,3dB LP11 LL @1260 Nanômetros
	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(dB)	(m)
BIF	1197	1270	1234	1196	1208	180	2
SSMF 1	1287	1226	1226	1151	1151	2	212
SSMF2	1334	1267	1267	1188	1188	0	>1000
SSMF3	1381	1311	1311	1231	1231	0	>1000
Ex I	1235	1437	1366	1290	1284	9	48
Ex2	1231	1438	1368	1287	1284	9	45
Ex3	1228	1466	1392	1297	1301	7	61
Ex4	1.250	1420	1354	1290	1283	6	69
Ex5	1243	1419	1353	1287	1280	10	44
Ex6	1246	1430	1361	1292	1285	8	56
Ex7	1248	1403	1343	1284	1278	8	52
Ex8	1249	1386	1326	1274	1270	11	40
Ex9	1.250	1436	1367	1297	1291	5	89
Ex10	1233	1435	1362	1287	1280	10	42
Ex1 1	1.250	1379	1321	1271	1268	10	41
Ex12	1213	1467	1393	1.300	1298	9	48
Ex13	1243	1383	1323	1271	1266	16	27
Ex14	1232	1397	1333	1271	1265	16	26
Ex15	1239	1392	1331	1272	1267	15	28
Ex16	1234	1424	1354	1283	1277	11	39
Ex17	1244	1429	1360	1291	1284	9	49
Ex18	1242	1382	1322	1268	1264	18	24
Ex19	1243	1360	1304	1257	1258	26	16
Ex20	1238	1362	1305	1256	1255	24	17
Ex21	1247	1376	1319	1267	1266	15	28
Ex22	1249	1351	1302	1259	1262	18	23
Ex23	1246	1378	1319	1268	1264	17	25
Ex24	1235	1373	1317	1264	1260	18	24
Ex25	1243	1371	1313	1263	1260	22	20
Ex26	1247	1350	1.300	1257	1260	22	19
Ex27	1248	1367	1310	1263	1263	17	25
Ex28	1245	1362	1306	1259	1259	24	18
Ex29	1244	1371	1314	1264	1260	20	21
Ex30	1240	1375	1319	1267	1263	17	24

10

Observa-se pela Tabela 10 que o comprimento de onda de

corte eficaz padrão  $\lambda_{\text{ceff}}$ , isto é, quando medido de acordo com as recomendações do subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44, é maior do que 1350 nanômetros. Similarmente, observa-se pela Tabela 10 que o comprimento de onda de corte de cabo padrão  $\lambda_{\text{cc}}$ , isto é, quando medido de acordo com as recomendações do subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44, é entre 1.250 nanômetros e 1.300 nanômetros, isto é, frequentemente maior do que o limite de 1260 nanômetros imposto pelas normas G.652 e G.657.

É, entretanto, observado pela Tabela 10 que o modo LP11 é, contudo, elevadamente atenuado por um comprimento de onda de 1260 nanômetros. De fato, o comprimento de onda de corte “teórico” é menor do que ou igual a 1.250 nanômetros. Assim, o modo LP11 de mais elevada ordem é propagado em um regime de modo de vazamento na largura de banda original e somente o modo fundamental permanece guiado na fibra descrita como de um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

Similarmente, observa-se pela Tabela 10 que o comprimento de onda de corte da fibra é significativamente reduzido após somente 5 metros de propagação da fibra. Assim, o comprimento de onda de corte, medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único, após a propagação através de 5 metros de fibra, é entre 1.300 nanômetros e 1400 nanômetros para a fibra descrita.

Além disso, a Tabela 10 mostra claramente que o modo LP11 é prontamente bem atenuado após 22 metros de propagação. Observa-se, em particular, que a atenuação do modo LP11 em uma fibra descrita exemplar (10) é maior do que a atenuação do modo LP11 em uma fibra SSMF, quando a fibra é disposta virtualmente reta. De fato, em uma fibra SSMF, são as curvaturas que tornam possível elevadamente atenuar o modo LP11. Assim, a fibra tem uma atenuação do modo LP11 maior do que 5 dB, após 22 metros

de propagação em fibra reta em um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

Além disso, a Tabela 10 também mostra que a atenuação de pelo menos 19,3 dB do modo LP11 é alcançada relativamente rápido, após 5 menos do que 90 metros, em vez dos 22 metros impostos pelos padrões.

Assim, a avaria para estar de acordo, no sentido mais rigoroso, com as normas G.652 e G.657, em termos de comprimento de onda de corte, é minimizada pelo fato que o modo LP11 de mais elevada ordem é suficientemente atenuado por um comprimento de onda de 1260 nanômetros, 10 a fim de não prejudicar a qualidade da propagação do modo fundamental.

Além disso, o aumento do comprimento de onda de corte eficaz torna possível aumentar o valor do MAC, como definido acima, e conseqüentemente reduzir as perdas de curvatura.

A Tabela 11 (abaixo) relata os valores de perdas de curvatura 15 para formas de realização preferidas das fibras, como descrito aqui. A primeira coluna da Tabela 11 repete as referências da Tabela 8. As quatro colunas seguintes mostram valores das perdas de curvatura PPC para respectivos raios de curvatura de 15 milímetros, 10 milímetros, 7,5 milímetros, e 5 milímetros em um comprimento de onda de 1.550 20 nanômetros. As quatro colunas seguintes fornecem os valores das perdas de curvatura PPC para os respectivos raios de curvatura de 15 milímetros, 10 milímetros, 7,5 milímetros, e 5 milímetros em um comprimento de onda de 1625 nanômetros.

A última coluna tem um fator de Figura de mérito 25 representando a ordem de magnitude do melhoramento nas perdas de curvatura das fibras descritas em relação aos limites impostos pela norma G.657B. A Figura de mérito da Tabela 11 é assim definida como uma média das razões entre os limites superior, imposto pela norma G.657B, e as perdas de curvatura das fibras descritas para cada raio de curvatura medido.

A Tabela 11 relata, na primeira linha, os valores de limite da perda de curvatura, impostos pela norma G.657B, para cada raio de curvatura e para os comprimentos de onda de 1.550 nanômetros e 1625 nanômetros.

TABELA 11

	R=15mm	R=10mm	R=7,5mm	R=5mm	R=15mm	R=10mm	R=7,5mm	R=5mm	FOM
	PPC @1.550nm (dB/volta)				PPC @1625nm (dB/volta)				
G657B	0,003	0,1	0,5		0,01	0,2	1		1,00
BIF	1,3E-03	2,9E-02	1,0E-01	3,3E-01	7,0E-03	8,4E-02	2,3E-01	6,3E-01	0,70
SSMF 1	1,5E-02	6,0E-01	3,4E+00	1,7E+01	7,5E-02	1,7E+00	6,9E+00	2,7E+01	8,44
SSMF 2	6,3E-03	3,6E-01	2,4E+00	1,4E+01	3,4E-02	1,0E+00	5,0E+00	2,3E+01	5,21
SSMF 3	9,6E-04	1,1E-01	1,0E+00	8,9E+00	6,5E-03	3,6E-01	2,5E+00	1,4E+01	2,45
Ex1	4,3E-05	2,0E-03	9,7E-03	3,6E-02	3,3E-04	7,3E-03	2,5E-02	7,0E-02	0,04
Ex2	4,4E-05	2,0E-03	9,2E-03	3,5E-02	3,4E-04	7,2E-03	2,4E-02	7,1E-02	0,04
Ex3	6,4E-05	2,2E-03	9,0E-03	3,2E-02	4,4E-04	7,6E-03	2,3E-02	6,4E-02	0,04
Ex4	3,6E-05	2,0E-03	1,1E-02	4,5E-02	2,9E-04	7,6E-03	2,8E-02	8,8E-02	0,04
Ex5	4,7E-05	2,4E-03	1,2E-02	4,6E-02	3,6E-04	8,6E-03	3,1E-02	9,2E-02	0,04
Ex6	5,3E-05	2,4E-03	1,2E-02	4,4E-02	3,9E-04	8,6E-03	3,0E-02	8,4E-02	0,04
Ex7	4,2E-05	2,4E-03	1,3E-02	5,1E-02	3,4E-04	8,9E-03	3,3E-02	1,0E-01	0,04
Ex8	4,5E-05	2,6E-03	1,5E-02	6,3E-02	3,6E-04	9,9E-03	3,8E-02	1,2E-01	0,05
Ex9	6,9E-05	2,8E-03	1,3E-02	4,8E-02	4,8E-04	9,7E-03	3,2E-02	9,1E-02	0,05
Ex10	8,3E-05	3,0E-03	1,3E-02	4,7E-02	5,6E-04	1,0E-02	3,2E-02	8,8E-02	0,06
Ex11	4,9E-05	2,9E-03	1,6E-02	7,1E-02	3,9E-04	1,1E-02	4,2E-02	1,3E-01	0,05
Ex12	9,1E-05	2,6E-03	9,5E-03	3,0E-02	6,1E-04	8,6E-03	2,3E-02	6,1E-02	0,06
Ex13	5,4E-05	2,9E-03	1,6E-02	6,5E-02	4,3E-04	1,1E-02	4,1E-02	1,3E-01	0,05
Ex14	6,6E-05	3,0E-03	1,5E-02	5,6E-02	5,0E-04	1,1E-02	3,8E-02	1,1E-01	0,05
Ex15	6,2E-05	3,1E-03	1,5E-02	6,3E-02	4,7E-04	1,1E-02	3,9E-02	1,2E-01	0,06
Ex16	9,8E-05	3,5E-03	1,4E-02	5,3E-02	6,5E-04	1,2E-02	3,5E-02	1,0E-01	0,07
Ex17	1,0E-04	3,6E-03	1,5E-02	5,6E-02	6,7E-04	1,2E-02	3,7E-02	1,0E-01	0,07
Ex18	2,2E-04	6,9E-03	2,7E-02	1,0E-01	1,3E-03	2,1E-02	6,4E-02	1,8E-01	0,13
Ex19	2,0E-04	7,1E-03	3,1E-02	1,1E-01	1,2E-03	2,3E-02	7,2E-02	2,1E-01	0,12
Ex20	2,2E-04	7,4E-03	3,1E-02	1,1E-01	1,4E-03	2,4E-02	7,2E-02	2,1E-01	0,14
Ex21	2,1E-04	7,1E-03	2,9E-02	1,1E-01	1,3E-03	2,2E-02	6,9E-02	2,0E-01	0,13
Ex22	1,4E-04	6,5E-03	3,1E-02	1,3E-01	1,0E-03	2,2E-02	7,7E-02	2,4E-01	0,11
Ex23	1,4E-04	5,4E-03	2,4E-02	9,0E-02	9,2E-04	1,8E-02	5,8E-02	1,7E-01	0,09
Ex24	2,3E-04	7,3E-03	2,8E-02	1,0E-01	1,4E-03	2,3E-02	6,8E-02	2,0E-01	0,14
Ex25	2,0E-04	6,8E-03	2,9E-02	1,0E-01	1,2E-03	2,2E-02	6,8E-02	2,0E-01	0,12
Ex26	1,7E-04	7,4E-03	3,4E-02	1,3E-01	1,2E-03	2,4E-02	8,2E-02	2,5E-01	0,12
Ex27	2,0E-04	7,1E-03	3,0E-02	1,1E-01	1,2E-03	2,3E-02	7,1E-02	2,1E-01	0,12
Ex28	1,9E-04	7,0E-03	3,0E-02	1,1E-01	1,2E-03	2,3E-02	7,2E-02	2,1E-01	0,12
Ex29	2,0E-04	7,0E-03	2,9E-02	1,0E-01	1,3E-03	2,2E-02	6,8E-02	2,0E-01	0,13
Ex30	2,3E-04	7,4E-03	2,9E-02	1,1E-01	1,4E-03	2,3E-02	7,0E-02	2,1E-01	0,14

5 Observa-se pela Tabela 11 que as perdas de curvatura das fibras descritas são claramente menores do que os limites impostos pela norma G.657B.

10 Assim, a fibra descrita acima tem, para um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, perdas de curvatura menores do que  $0,25 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 15 milímetros, quando comparadas com um limite de  $3 \times 10^{-3}$  dB/volta imposto pela norma G.657. A fibra ainda tem perdas de curvatura menores do que ou iguais a  $7,5 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 10 milímetros, quando comparadas com um limite de

0,1 dB/volta imposto pela norma G.657B. As perdas de curvatura são menores do que ou iguais a 0,05 dB/volta, para um raio de curvatura de 7,5 milímetros, quando comparadas com um limite de 0,5 dB/volta imposto pela norma G.657B, e perdas de curvatura menores do que 0,15 dB/volta, para um raio de curvatura de 5 milímetros.

As perdas de curvatura, em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros na fibra descrita, foram melhoradas por um fator maior do que 10x em relação aos limites da norma G.657B.

Similarmente, a fibra descrita exibe, para um comprimento de onda de 1625 nanômetros, perdas de curvatura menores do que  $1,5 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 15 milímetros, quando comparadas com um limite de  $10 \times 10^{-3}$  dB/volta imposto pela norma G.657B. As perdas de curvatura são menores do que ou iguais a  $25 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 10 milímetros, quando comparadas com um limite de 0,2 dB/volta imposto pela norma G.657B. A fibra exibe perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,08 dB/volta, para um raio de curvatura de 7,5 milímetros, quando comparadas com um limite de 1 dB/volta imposto pela norma G.657B, e perdas de curvatura menores do que 0,25 dB/volta, para um raio de curvatura de 5 milímetros.

As perdas de curvatura, em um comprimento de onda de 1625 nanômetros na fibra descrita, foram melhoradas por um fator de 10 em relação aos limites da norma G.657B.

Deve-se observar que, dentro da estrutura de uma produção industrial de preformas de fibra óptica, os testes de conformidade, em relação às normas, são realizados considerando-se somente as figuras significativas indicadas na norma. Assim, quando a norma G.657B impõe o valor limite de 0,01 dB/volta em um comprimento de onda de 1625 nanômetros, para um raio de curvatura de 15 milímetros, o fabricante tolerará perdas de curvatura variando de até 0,014 dB/volta deste comprimento de onda para este raio de

curvatura. As perdas de curvatura menores do que  $1,5 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 15 milímetros em um comprimento de onda de 1625 nanômetros, são, portanto, pelo menos dez vezes melhores do que os limites impostos pela norma.

5 A coluna da Figura de mérito da Tabela 11 mostra que as fibras descritas têm, claramente, melhoradas perdas de curvatura em relação às fibras BIF existentes, que correspondem às necessidades da norma G.657B.

As fibras descritas aqui são bem adequadas para uso em sistemas ópticos instalados no domicílio do assinante do tipo FTTH, em que a  
10 fibra é submetida à tensões de curvatura significativas, devidas à miniaturização da caixa óptica ou retenção da fibra em posição com grampos. A fibra pode ser colocada em caixas ópticas particularmente compactas. De fato, a fibra óptica pode ser disposta com um raio de curvatura de menos do que 15 milímetros, por exemplo, um raio de curvatura de cerca de 5  
15 milímetros. A fibra permanece compatível com as fibras dos sistemas existentes, em particular, nos termos de diâmetro do campo de modo, para bom acoplamento de fibra-com-fibra. O aumento do comprimento de onda de corte não é prejudicial, devido a uma atenuação significativa do modo LP11 de um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

20

\* \* \*

Ainda outra fibra de vidro insensível à curvatura exemplar para uso na presente invenção é descrita no Pedido de Patente U.S. No. 61/112.374, para uma *Bend-Insensitive Single Mode Optical Fiber* (de Montmorillon et al.). Combinando-se (i) uma fibra de vidro insensível à  
25 curvatura, tendo o perfil de índice refrativo como descrito no Pedido de Patente U.S. No. 61/112.374, e o revestimento de acordo com a presente invenção, podem ser obtidas fibras ópticas tendo virtualmente insignificante sensibilidade a tensões induzidas por microcurvatura.

A fibra de vidro insensível à curvatura descrita no Pedido de

Patente U.S. No. 61/112.374 (a “fibra descrita”) inclui um núcleo central, uma cobertura intermediária e uma vala rebaixada que é circundada por uma cobertura óptica externa. O perfil de índice refrativo é otimizado para melhorar as perdas de curvatura por um fator de dez, em relação às restrições impostas pela recomendação G.657B, enquanto mantendo-se um diâmetro do campo de modo compatível com a recomendação G.652 e garantindo-se uma atenuação suficiente do modo LP11.

Em particular, a superfície do núcleo, bem como a superfície e o volume da vala rebaixada, são otimizados para melhorar as perdas de curvatura consideravelmente. A superfície do núcleo ou a superfície da vala rebaixada não deve estender-se geometricamente, porém deve corresponder a valores considerando-se duas dimensões - o produto do raio e a diferença de índice. Similarmente, o volume da vala rebaixada corresponde a um valor considerando-se três dimensões - o produto do quadrado do raio e a diferença de índice.

A fibra descrita inclui, de seu centro para sua periferia, um núcleo central, uma cobertura intermediária, uma vala rebaixada e uma cobertura óptica externa. O núcleo central tem um raio  $r_1$  e uma diferença de índice positiva  $\Delta n_1$  com a cobertura óptica externa. A cobertura intermediária tem um raio  $r_2$  e uma diferença de índice positiva  $\Delta n_2$  com a cobertura óptica externa. A diferença  $\Delta n_2$  é menor do que a diferença de índice  $\Delta n_1$  do núcleo. A vala rebaixada tem um raio  $r_3$  e uma diferença de índice negativa  $\Delta n_3$  com a cobertura óptica externa. A fibra descrita é ainda caracterizada pelo fato de ter (i) um diâmetro do campo de modo (MDF) entre 8,6 microns e 9,5 microns, em um comprimento de onda de 1310 nanômetros, e (ii) perdas de curvatura menores do que 0,15 dB/voltas, para um raio de curvatura de 5 milímetros, e um comprimento de onda de 1.550 nanômetros e um comprimento de onda de corte de cabo de menos do que ou igual a 1260 nanômetros, medido como o comprimento de onda em que a atenuação do modo LP11 é maior do que ou

igual a 19,3 dB, após propagação através de 22 metros de fibra, a fibra sendo condicionada reta ou condicionada em torno de um mandril de raio de curvatura de 140 milímetros.

De acordo com uma forma de realização da fibra, a superfície integral do núcleo central ( $V_{01}$ ), definida como

$$V_{01} = \int_0^{r_1} \Delta n(r) \cdot dr \approx r_1 \times \Delta n_1 ,$$

é entre  $19,0 \times 10^{-3}$  microns e  $23,0 \times 10^{-3}$  microns e preferivelmente entre  $20,0 \times 10^{-3}$  microns e  $23,0 \times 10^{-3}$  microns. Em uma outra forma de realização preferida, a superfície integral do núcleo central ( $V_{01}$ ) é entre  $-20,0 \times 10^{-3}$  microns e  $-21,5 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$ , que dá origem à propriedades ópticas importantes.

De acordo com uma forma de realização da fibra, a superfície integral da vala rebaixada ( $V_{03}$ ), definida como

$$V_{03} = \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot dr \approx (r_3 - r_2) \times \Delta n_3 ,$$

é entre  $-55,0 \times 10^{-3}$  microns e  $-30,0 \times 10^{-3}$  microns. Em uma outra forma de realização preferida, a superfície integral da vala rebaixada ( $V_{03}$ ) é entre  $-42,5 \times 10^{-3}$  microns e  $32,5 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}$ , que dá origem à propriedades ópticas importantes.

De acordo com uma forma de realização da fibra, a integral volumétrica da vala rebaixada ( $V_{13}$ ), definida como,

$$V_{13} = 2 \cdot \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot r \cdot dr \approx (r_3^2 - r_2^2) \times \Delta n_3 ,$$

é entre  $-1200 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}^2$  e  $-750 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}^2$ . Em uma outra forma de realização preferida, a integral volumétrica da vala rebaixada ( $V_{13}$ ) é entre  $-100 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}^2$  e  $-750 \times 10^{-3}$   $\mu\text{m}^2$ , que dá origem à propriedades ópticas importantes da presente fibra.

Em formas de realização preferidas, a fibra tem propriedades físicas e parâmetros operacionais com melhorada resistência à perdas de

curvatura. Por exemplo, a fibra tem um comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$  maior do que 1.300 nanômetros, o comprimento de onda de corte eficaz sendo medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico torna-se de modo único, após propagação através de dois metros de fibra. A fibra tem, para um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,003 dB/volta, para um raio de curvatura de 15 milímetros, perdas de curvatura menores do que ou iguais a  $3 \times 10^{-2}$  dB/volta, preferivelmente  $7,5 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 10 milímetros, perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,05 dB/volta, para um raio de curvatura de 7,5 milímetros, e perdas de curvatura menores do que 0,15 dB/volta, preferivelmente menores do que 0,10 dB/volta para um raio de curvatura de 5 milímetros.

Portanto, em uma forma de realização preferida, a fibra tem um comprimento de onda de corte entre 1240 nanômetros e 1310 nanômetros, com o comprimento de onda de corte medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único, após propagação através de cinco metros de fibra. O comprimento de onda de corte distingui-se do de corte de cabo, medido como o comprimento de onda em que a atenuação do modo LP11 é maior do que ou igual a 19,3 dB, após propagação através de 22 metros de fibra. A fibra tem um comprimento de onda de corte de cabo menor do que ou igual a 1260 nanômetros.

Uma quarta definição de corte em debate aqui é o comprimento de onda de corte teórico, definido como o comprimento de onda do qual o modo LP11 é propagado em modo de vazamento. Em uma forma de realização, a fibra tem um comprimento de onda de corte teórico menor do que ou igual a 1.250 nanômetros. A fibra tem uma atenuação do modo LP11 maior do que 5 Db, após propagação através de 22 metros de fibra em um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

Os parâmetros operacionais descritos acima resultam das

propriedades físicas preferidas da fibra. Em uma forma de realização, o núcleo central da fibra tem um raio entre 3,8 microns e 4,35  $\mu\text{m}$ ; a cobertura intermediária tem um raio entre 8,5 microns e 9,7  $\mu\text{m}$ ; a vala rebaixada tem um raio entre 13,5 microns e 16  $\mu\text{m}$ , que pode ser menor do que ou igual a 15 microns. O núcleo central tipicamente tem uma diferença de índice refrativo positiva ( $\Delta n_1$ ) com a cobertura óptica externa entre  $4,9 \times 10^{-3}$  e  $5,7 \times 10^{-3}$ .

Como observado, o perfil de índice refrativo de uma fibra é plotado em termos da diferença entre os valores do índice refrativo em pontos do raio da fibra e a cobertura óptica externa. A cobertura intermediária tem uma diferença de índice com a cobertura óptica entre  $0,1 \times 10^{-3}$  e  $0,6 \times 10^{-3}$ . A vala rebaixada tem uma diferença de índice com a cobertura óptica entre  $-10,0 \times 10^{-3}$  e  $5,0 \times 10^{-3}$ . A fibra tem um comprimento de onda de dispersão cromática zero entre 1.300 nanômetros e 1324 nanômetros; a fibra tem um valor de inclinação de dispersão cromática no comprimento de onda de dispersão cromática zero de menos do que  $0,092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ .

Como representado na Figura 23, a fibra de vidro insensível à curvatura (10), descrita no Pedido de Patente U.S. No. 61/112.374 tem um núcleo central (11), uma cobertura intermediária (12) e uma cobertura rebaixada (13). Para fins aqui, cobertura rebaixada significa uma parte radial da fibra (10), tendo um índice refrativo menor do que o índice refrativo da cobertura óptica externa (14). Tipicamente, o núcleo central (11), a cobertura intermediária (12) e a cobertura rebaixada (13) são obtidos por deposição de vapor químico em um tubo de sílica. A cobertura óptica externa (14) inclui o tubo de sílica e a sobrecobertura do tubo. Em formas de realização preferidas, a sobrecobertura é geralmente natural ou sílica dopada, porém também pode ser obtida por qualquer outra técnica de deposição (deposição axial de vapor (“VAD”) ou deposição de vapor externo (“OVD”)).

A Figura 24 ilustra um perfil de índice refrativo para a fibra de transmissão (10) da Figura 23. O perfil da Figura 24 é um perfil estabelecido,

isto é, representativo do perfil teórico da fibra, porém a fibra realmente obtida após estiramento da fibra de uma preforma tem um perfil ligeiramente diferente.

De uma maneira conhecida na arte por si, uma fibra óptica (10) é obtida por estiramento da preforma. Por meio de exemplo, a preforma pode ser um tubo de vidro de elevada qualidade (sílica pura), que eventualmente forme parte da cobertura óptica externa (14). A cobertura óptica externa (14) circunda o núcleo central (11) e as coberturas internas (12, 13) da fibra (10). Este tubo pode então ser sobrecoberto para aumentar seu diâmetro antes de passar através da operação de estiramento de fibra em uma torre de estiramento de fibra. Para a produção da preforma, o tubo é geralmente montado horizontalmente e mantido em ambas extremidades por barras de vidro em um torno mecânico; em seguida o tubo é girado e localmente aquecido para o processo de deposição determinar a composição da preforma. Esta composição determina as características ópticas da futura fibra.

A fibra inclui um núcleo central (11), tendo uma diferença de índice  $\Delta n_1$  com uma cobertura externa (14), funcionando como uma cobertura óptica. A fibra (10) ainda inclui uma cobertura intermediária (12), tendo uma diferença de índice  $\Delta n_2$  com a cobertura óptica externa (14) e uma cobertura de vala rebaixada (13) tendo uma diferença de índice  $\Delta n_3$  com a cobertura óptica externa (14). Os índices refrativos do núcleo central (11), a cobertura intermediária (12) e a vala rebaixada (13) são substancialmente constantes através de suas respectivas larguras, como apresentado na Figura 24. A Figura 23 ilustra que a largura do núcleo (11) é definida por seu raio  $r_1$  e a largura das coberturas por seus respectivos raios externos  $r_2$  e  $r_3$ . A cobertura óptica externa é indicada como  $r_4$ .

A fim de definir um determinado perfil de índice refrativo para uma fibra óptica, o valor do índice da cobertura óptica externa é geralmente

tomado como uma referência ( $n_g$ ). Os valores do índice do núcleo central (11), da cobertura intermediária (12) e da cobertura de vala rebaixada (13) são então apresentados na Figura 24 como diferenças de índice  $\Delta n_{1,2,3}$ . Geralmente a cobertura óptica externa (14) é composta de sílica, porém esta  
 5 cobertura pode ser dopada para aumentar ou reduzir seu índice refrativo - por exemplo, para modificar as características de propagação do sinal.

Cada seção de perfil de fibra mostrado na Figura 24 (21-24) pode também ser definida com base nas integrais que ligam as variações de índice com o raio de cada seção da fibra (10). Assim é possível definir três  
 10 integrais de superfície para a fibra descrita (10), representativas da superfície do núcleo  $V_{01}$ , da superfície da cobertura intermediária  $V_{02}$  e da superfície da vala rebaixada  $V_{03}$ . A expressão “superfície” não deve ser entendida geometricamente, porém corresponde a um valor considerando-se duas dimensões.

15 Estas três superfícies integrais podem ser expressas como a seguir:

$$V_{01} = \int_0^{r_1} \Delta n(r) . dr \approx r_1 \times \Delta n_1$$

$$V_{02} = \int_{r_1}^{r_2} \Delta n(r) . dr \approx (r_2 - r_1) \times \Delta n_2$$

$$V_{03} = \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) . dr \approx (r_3 - r_2) \times \Delta n_3 .$$

Similarmente, é possível definir três integrais volumétricas para a fibra descrita (10), representativas do volume do núcleo  $V_{11}$ , do volume  
 20 da cobertura intermediária  $V_{12}$  e do volume da vala rebaixada  $V_{13}$ . A expressão “volume” não deve ser entendida geometricamente, porém corresponde a um valor considerando-se três dimensões. Estas três integrais volumétricas podem ser expressas como a seguir:

$$V_{11} = 2 \cdot \int_0^{r_1} \Delta n(r) \cdot r \cdot dr \approx r_1^2 \times \Delta n_1$$

$$V_{12} = 2 \cdot \int_{r_1}^{r_2} \Delta n(r) \cdot r \cdot dr \approx (r_2^2 - r_1^2) \times \Delta n_2$$

$$V_{13} = 2 \cdot \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot r \cdot dr \approx (r_3^2 - r_2^2) \times \Delta n_3.$$

A Tabela 12 (abaixo) mostra 9 exemplos de perfis de fibra, de acordo com as formas de realização preferidas, em comparação com três perfis de fibra SSMF, e um perfil de fibra correspondendo às recomendações G.657A e G.657B (mencionado como “BIF” para Fibra Insensível à curvatura), bem como 13 exemplos comparativos. Draka Comteq comercializa fibras ópticas insensíveis à curvatura, tendo excelente resistência à perdas de curvatura sob o nome comercial BendBright<sup>xs®</sup>. Os valores nas tabelas correspondem aos perfis estabelecidos para cada fibra.

Todos os perfis foram também designados para assegurar um nível de interferência de Multi-Trajeto (MPI) menor do que -30 dB, que assegure total compatibilidade com quaisquer redes de sistema apropriadamente instaladas, incluída Rede de Acesso e Fibra-para-residência. MPI é definido em W. Zheng et al, "Measurement and System Impact of Multipath Interference From Dispersion Compensating Fiber Modules", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (2004, 53, pp. 15-23) e suas considerações detalhadas de medição particular em S. Ramachandran et al., "Measurement of Multipath Interference in the Coherent Crosstalk Regime", IEEE Photonics Technology Letters (2003, 15, pp. 1171-1173).

A primeira coluna da Tabela 12 designa uma referência para cada exemplo (isto é, “Ex” para exemplos de acordo com a descrição e “C.Ex” para exemplos comparativos); as três colunas seguintes fornecem os valores dos raios do núcleo (11), da cobertura intermediária (12) e da vala rebaixada (13), respectivamente. As três colunas seguintes fornecem os

correspondentes valores das diferenças de índice refrativo com a cobertura óptica externa (14). Os valores do índice refrativo são medidos em um comprimento de onda de 633 nanômetros. A Tabela 12 também mostra os valores da superfície integral e da integral volumétrica do núcleo (11), da cobertura intermediária (12) e da vala rebaixada (13), como definido acima.

TABELA 12

	$R_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$C_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_3$ ( $\mu\text{m}$ )	$Dn_1$ [ $10^{-3}$ ]	$Dn_2$ [ $10^{-3}$ ]	$Dn_3$ [ $10^{-3}$ ]	$V_{01}$ ( $\mu\text{m}^2$ ) [ $10^{-3}$ ]	$V_{02}$ ( $\mu\text{m}^2$ ) [ $10^{-3}$ ]	$V_{03}$ ( $\mu\text{m}^2$ ) [ $10^{-3}$ ]	$V_{11}$ ( $\mu\text{m}^2$ ) [ $10^{-3}$ ]	$V_{12}$ ( $\mu\text{m}^2$ ) [ $10^{-3}$ ]	$V_{13}$ ( $\mu\text{m}^2$ ) [ $10^{-3}$ ]
BIF	3,93	9,38	14,72	5,26	0,13	-5,01	20,7	0,7	-26,8	81,1	9,4	-645
SSMF1	4,35	13,92		5,00	-0,20		21,8	-1,9	0,0	94,6	-35,0	0
SSMF2	4,51	13,92		5,00	-0,20		22,5	-1,9	0,0	101,5	-34,7	0
SSMF3	4,55	13,92		5,24	-0,20		23,8	-1,9	0,0	108,4	-34,6	0
C,Ex1	3,82	9,01	13,55	5,67	0,57	-9,63	21,7	2,9	-43,7	82,8	37,7	-986
C,Ex2	3,96	8,61	13,86	5,58	0,31	-7,87	22,1	1,4	-41,3	87,6	17,9	-928
C,Ex3	3,92	8,78	13,84	5,55	0,32	-8,75	21,7	1,5	-44,3	85,2	19,7	-1002
C,Ex4	3,88	9,09	14,35	5,62	0,34	-7,84	21,8	1,8	-41,2	84,5	23,1	-965
C,Ex5	3,93	9,30	14,48	5,30	0,51	-7,76	20,8	2,7	-40,1	81,7	36,0	-955
C,Ex6	3,93	9,28	14,47	5,31	0,53	-7,51	20,9	2,8	-39,0	82,0	37,5	-926
C,Ex7	3,93	8,50	15,00	5,48	0,50	-5,00	21,5	2,3	-32,5	84,6	28,4	-764
C,Ex8	3,93	9,25	13,65	5,37	0,50	-9,90	21,1	2,7	-43,5	83,0	35,1	-997
C,Ex9	3,93	8,50	15,50	5,33	0,51	-5,00	21,0	2,3	-35,0	82,4	28,8	-840
C,Ex10	3,93	9,27	13,65	5,31	0,52	-9,80	20,9	2,8	-42,9	82,1	36,9	-983
C,Ex11	3,94	9,25	13,54	5,30	0,56	-9,87	20,9	3,0	-42,3	82,3	39,2	-964
C,Ex12	3,95	9,29	13,91	5,30	0,50	-8,93	20,9	2,7	-41,2	82,6	35,4	-957
C,Ex13	3,93	8,50	15,50	5,32	0,57	-5,00	20,9	2,6	-35,0	82,1	32,2	-840
Ex1	3,90	9,23	14,34	4,94	0,35	-7,15	19,3	1,9	-36,5	75,1	24,5	-861
Ex2	3,91	9,23	14,34	5,14	0,10	-7,15	20,1	0,5	-36,5	78,6	7,0	-861
Ex3	3,91	9,23	14,81	5,14	0,10	-7,15	20,1	0,5	-39,9	78,6	7,0	-959
Ex4	3,91	9,23	14,34	5,29	-0,06	-7,15	20,7	-0,3	-36,5	80,9	-4,2	-861
Ex5	3,91	9,23	14,81	5,29	-0,06	-7,15	20,7	-0,3	-39,9	80,9	-4,2	-959
Ex6	3,93	9,26	13,53	5,34	0,51	-9,74	21,0	2,7	-41,6	82,3	36,0	-949
Ex7	3,93	9,25	13,53	5,31	0,50	-9,93	20,8	2,7	-42,5	81,9	35,3	-967
Ex8	3,94	8,50	15,00	5,43	0,50	-5,00	21,4	2,3	-32,5	84,3	28,6	-764
Ex9	3,94	9,26	13,50	5,33	0,51	-9,88	21,0	2,7	-41,9	82,8	35,5	-954

A fibra descrita (10), de acordo com a forma de realização representada nas Figuras 23 e 24, é uma fibra de índice escalonado compreendendo um núcleo central (11), uma cobertura intermediária (12) e uma vala rebaixada (13). Observa-se pela Tabela 12 que o núcleo central (11) tem um raio  $r_1$ , entre 3,8 microns e 4,35 microns e, preferivelmente, entre 3,8 microns e 4,05  $\mu\text{m}$ , isto é, mais estreito do que o núcleo de uma fibra SSMF. A fibra (10) tem uma diferença de índice  $\Delta n_1$  (21) com a cobertura óptica externa (14) entre  $4,9 \times 10^{-3}$  e  $5,7 \times 10^{-3}$  (isto é, na ordem de ou maior do que uma fibra SSMF). A superfície integral do núcleo  $V_{01}$  é entre  $19,0 \times 10^{-3}$

mícrons e  $23,0 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ , e a integral volumétrica do núcleo  $V_{11}$  é entre  $75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  e  $91 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

Observa-se também na Tabela 12 que a fibra descrita tem uma vala rebaixada (13). A vala rebaixada (13) tem um grande volume e torna possível limitar muito as perdas de curvatura. A Tabela 12, mostra assim que a vala rebaixada (13) tem um raio  $r_3$  entre 13,5 mícrons e 16 mícrons e uma diferença de índice  $\Delta_{n3}$  (23) com a cobertura óptica externa (14) entre  $-10,0 \times 10^{-3}$  e  $5,0 \times 10^{-3}$ . A tabela 12 também mostra que a superfície integral da vala rebaixada  $V_{03}$ , como definido acima, é entre  $-55,0 \times 10^{-3}$  mícrons e  $30,0 \times 10^{-3} \mu\text{m}$  e a integral volumétrica da vala rebaixada  $V_{13}$ , como definido acima, é entre  $-1200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  e  $-750 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

De acordo com uma forma de realização preferida, o raio da cobertura rebaixada  $r_3$  pode ser limitado a 15 mícrons, para reduzir mais o custo de produção da fibra, e todas as fibras de acordo com os exemplos estão de acordo com isto. De fato, a vala rebaixada (13) pode ser produzida por deposição de vapor químico de plasma (PCVD), tornando possível incorporar uma grande quantidade de flúor na sílica, para formar coberturas profundamente rebaixadas. A parte da fibra (10) correspondendo ao tubo e à deposição PCVD é, entretanto, a mais dispendiosa; é, portanto, procurado limitar esta parte tanto quanto possível. É também possível considerar a produção de valas rebaixadas (13) pela incorporação de microfuros ou microbolhas em vez de dopagem com flúor. A dopagem com flúor, entretanto, fica mais fácil de controlar por produção industrial do que a incorporação de microbolhas.

Uma vala rebaixada (13), correspondendo aos critérios de superfície e volume definidos acima, torna possível obter-se um bom comprometimento entre perdas de curvatura muito reduzidas em relação às fibras existentes e um regime de vazamento suficientemente consistente do modo LP11 em um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

É também observado na Tabela 12 que uma forma de realização preferida da fibra tem uma cobertura intermediária (12) entre o núcleo central (11) e a vala rebaixada (13). Esta cobertura intermediária (12) torna possível limitar os efeitos da vala rebaixada (13) sobre a propagação do sinal óptico no núcleo. A Tabela 8 mostra que a cobertura intermediária (12) tem um raio  $r_2$  entre 8,5 microns e 9,7 microns e uma diferença de índice  $\Delta n_2$  (22) com a cobertura óptica entre  $0,1 \times 10^{-3}$  e  $0,6 \times 10^{-3}$ . A tabela 12 mostra que a superfície integral da cobertura intermediária  $V_{02}$ , como definido acima, é entre  $0,5 \times 10^{-3}$  microns e  $3,0 \times 10^{-3}$  microns. A integral volumétrica da cobertura intermediária  $V_{12}$ , como definido acima, é entre  $6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  e  $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

O núcleo central (11) da fibra descrita (10) é otimizado, em combinação com a cobertura intermediária (12), para garantir parâmetros de transmissão óptica na fibra em conformidade com as recomendações G.652 e G657A, particularmente em termos de diâmetro do campo de modo e dispersão cromática. Isto também ajuda a garantir compatibilidade com as fibras de outros sistemas ópticos.

A tabela 13 (abaixo) mostra as características de transmissão óptica para fibras exemplares. A primeira coluna repete as referências da Tabela 12. As seguintes colunas provêm, para cada perfil de fibra, os valores do diâmetro do campo de modo (MFD) para comprimentos de onda de 1310 nanômetros e 1.550 nanômetros, comprimento de onda de dispersão zero (ZDW) e inclinação de dispersão zero (ZDS).

TABELA 13

	MFD1310 ( $\mu\text{m}$ )	MFD1.550 ( $\mu\text{m}$ )	ZDW (nm)	ZDS ps/(nm <sup>2</sup> •km)
BIF	8,80	9,90	1320	0,0878
SSMF1	9,14	10,31	1314	0,0855
SSMF2	9,27	10,39	1309	0,0871
SSMF3	9,18	10,25	1306	0,088
C,Ex1	8,67	9,68	1317	0,0908
C,Ex2	8,65	9,59	1310	0,0917
C,Ex3	8,66	9,62	1312	0,0914
C,Ex4	8,64	9,65	1317	0,0897

C,Ex5	8,95	10,01	1317	0,0905
C,Ex6	8,96	10,02	1317	0,0905
C,Ex7	8,80	9,81	1314	0,0906
C,Ex8	8,89	9,91	1315	0,0913
C,Ex9	8,88	9,91	1314	0,0909
C,Ex10	8,94	9,97	1315	0,0914
C,Ex11	8,97	10,00	1314	0,0917
C,Ex12	8,95	9,99	1315	0,0911
C,Ex13	8,92	9,95	1314	0,0911
Ex1	9,00	10,10	1318	0,0906
Ex2	8,75	9,81	1318	0,0895
Ex3	8,75	9,81	1318	0,0895
Ex4	8,60	9,64	1318	0,0888
Ex5	8,60	9,64	1318	0,0888
Ex6	8,91	9,94	1315	0,0913
Ex7	8,92	9,95	1315	0,0914
Ex8	8,83	9,84	1313	0,0908
Ex9	8,93	9,95	1314	0,0915

Observa-se pela Tabela 13 que a fibra descrita (10) é compatível com as fibras correspondendo aos critérios da recomendação G.652. Em particular, a fibra descrita aqui tem um diâmetro do campo de modo MFD na faixa de valores padronizada de 8,6 microns a 9,5 microns em 5 1310 nanômetros, um comprimento de onda de dispersão zero entre 1.300 nanômetros e 1324 nanômetros, e uma inclinação de dispersão zero de menos do que 0,092 ps/(nm<sup>2</sup>.km). Cada um destes valores está de acordo com a recomendação G.652.

Por outro lado, como mostrado pela Tabela 14 (abaixo), a fibra 10 tem um comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$  (ou corte de fibra padrão, terceira coluna da Tabela 14) maior do que 1.300 nanômetros, ou mesmo maior do que 1350 nanômetros. Como observado acima, o comprimento de onda de corte eficaz é medido como sendo o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único após a propagação através de dois 15 metros de fibra, como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-44. Este aumentado valor de comprimento de onda de corte eficaz resulta em um valor de comprimento de onda de corte de cabo  $\lambda_{\text{cc}}$  (ou corte de cabo padrão, quinta coluna da Tabela 14) entre 1200 nanômetros e 1260 nanômetros. O

comprimento de onda de corte de cabo é medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único após propagação através de 22 metros de fibra, como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-44. O

5 sinal óptico é de modo único, quando a atenuação do modo LP11 é maior do que ou igual a 19,3 dB. Ambas as recomendações G.652 e G.657 impõem um valor máximo de 1260 nanômetros para o comprimento de onda de corte de cabo.

Um objetivo dos desenvolvimentos descritos aqui é produzir

10 fibras que possam ser usadas em todas as larguras de banda de transmissão exploradas pelos sistemas ópticos, isto é, fibras que possam ser usadas na propagação de modo único da largura de banda original (OB), que estende-se de 1260 nanômetros a 1360 nanômetros, e até a largura de banda ultra-longa (UL) além de 1625 nanômetros. Um baixo comprimento de onda de corte

15 eficaz torna possível garantir a possibilidade de usar a fibra através de todas as larguras de banda disponíveis.

As simulações da Tabela 14 (abaixo), entretanto, mostram que o modo LP11 de ordem diretamente mais elevada é propagado de acordo com um modo de vazamento de um comprimento de onda de 1260 nanômetros. A

20 fibra descrita aqui pode, portanto, ser usada em transmissão de modo único através da largura de banda original (OB: 1260 nanômetros a 1360 nanômetros).

A Tabela 14 (abaixo) mostra diversos valores de comprimento de onda de corte para as fibras descritas. A primeira coluna da Tabela 14

25 repete as referências da Tabela 12.

A coluna “Corte de Fibra Teórico” provê um valor de comprimento de onda de corte teórico, que corresponde ao comprimento de onda de transição entre uma propagação guiada do modo LP11 e uma propagação de modo de vazamento deste modo LP11. Para trabalhar

comprimentos de onda além deste comprimento de onda de corte eficaz, o modo LP11 é propagado em modo de vazamento.

A coluna “Corte de Fibra Padrão” corresponde ao comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$ , como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44.

A coluna “Corte de Fibra de 5m” corresponde ao comprimento de onda de corte medido como o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo múltiplo após a propagação através de 5 metros de fibra. Este valor, portanto, corresponde ao comprimento de onda de corte eficaz medido após a propagação através de 5 metros de fibra em vez de 2 metros de fibra.

A coluna “Corte de Cabo Padrão” corresponde ao comprimento de onda de corte de cabo  $\lambda_{\text{cc}}$ , como definido pelo subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44. De acordo com a recomendação do subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44, o comprimento de onda de corte de cabo  $\lambda_{\text{cc}}$  é determinado posicionando-se a fibra em dois laços de raio de 40 milímetros e dispondo-se o resto da fibra (isto é, 21,5 metros de fibra) em um mandril com um raio de 140 milímetros. Este corte deve ser de 1260 nanômetros ou menor.

A coluna “Corte de Cabo Reto” corresponde ao comprimento de onda de corte de cabo posicionando-se a fibra em dois laços, cada um tendo um raio de 40 milímetros e dispondo-se o resto da fibra (isto é, 21,5 metros de fibra) virtualmente reto. Este corte deve ser de 1260 metros ou menor. Os Exemplos comparativos 9, 10 e 12, estão de acordo com esta necessidade, porém são ligeiramente demasiado elevados em relação ao corte de cabo padrão.

A Coluna “LP11 LL @1260 após 22 m” indica as perdas de vazamento do modo LP11 após a propagação através de 22 metros de fibra

virtualmente reta.

A coluna “Comprimento - 19,3dB LP11 LL @1260 nanômetros” indica o comprimento da fibra necessário para obter-se perdas de vazamento do modo LP11 igual a 19,3dB com a fibra sendo mantida virtualmente reta. Isto indica em que distância a fibra, disposta virtualmente  
5 reta, é de modo único dentro do significado das recomendações G.652 e G.657.

TABELA 14

	Corte da Fibra (teórico)	Corte de Fibra Padrão	Corte de Fibra de 5m	Corte de Cabo Padrão	Corte de Cabo Reto	LP11 LL @1260 após 22 m	Comprimento - 19,3dB LP11 LL @1260 nanômetros
	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(dB)	
BTF	1197	1270	1234	1196	1208	180	2
SSMF1	1287	1226	1226	1151	1151	2	212
SSMF2	1334	1267	1267	1188	1188	0	>1000
SSMF3	1381	1311	1311	1231	1231	0	> 1000
C,Ex1	1.250	1379	1321	1271	1268	10	41
C,Ex2	1243	1383	1323	1271	1266	16	27
C,Ex3	1232	1397	1333	1271	1265	16	26
C,Ex4	1239	1392	1331	1272	1267	15	28
C,Ex5	1242	1382	1322	1268	1264	18	24
C,Ex6	1247	1376	1319	1267	1266	15	28
C,Ex7	1249	1351	1302	1259	1262	18	23
C,Ex8	1246	1378	1319	1268	1264	17	25
C,Ex9	1235	1373	1317	1264	1260	18	24
C,Ex10	1243	1371	1313	1263	1260	22	20
C,Ex11	1248	1367	1310	1263	1263	17	25
C,Ex12	1244	1371	1314	1264	1260	20	21
C,Ex13	1240	1375	1319	1267	1263	17	24
Ex1	1175	1316	1255	1204	1201	88	5
Ex2	1171	1316	1246	1205	1198	83	5
Ex3	1171	1366	1271	1225	1205	44	10
Ex4	1171	1316	1244	1207	1195	75	6
Ex5	1171	1366	1269	1226	1200	40	11
Ex9	1243	1360	1304	1257	1258	26	16
Ex7	1238	1362	1305	1256	1255	24	17
Ex8	1247	1350	1.300	1257	1260	22	19
Ex9	1245	1362	1306	1259	1259	24	18

10 Observa-se pela Tabela 14 que o comprimento de onda de corte eficaz padrão  $\lambda_{\text{ceff}}$ , isto é, quando medido de acordo com as recomendações do subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44, é maior do que 1.300 nanômetros. Similarmente, observa-se pela Tabela 14 que o comprimento de onda de corte de cabo padrão  $\lambda_{\text{cc}}$ , isto é, quando medido de acordo com as recomendações

do subcomitê 86A da International Electrotechnical Commission sob a norma IEC 60793-1-44, é entre 1200 nanômetros e 1260 nanômetros (isto é, está de acordo com o limite de 1260 nanômetros imposto pelas recomendações G.652 e G.657).

5                    Observa-se pela Tabela 14 que o modo LP11 é elevadamente atenuado por um comprimento de onda de 1260 nanômetros. De fato, o comprimento de onda de corte de fibra “teórico” é menor do que ou igual a 1.250 nanômetros. Assim, o modo LP11 de mais elevada ordem é propagado em um regime de modo de vazamento na largura de banda original e somente  
10 o modo fundamental permanece guiado na fibra descrita como de um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

                    Similarmente, observa-se pela Tabela 14 que o comprimento de onda de corte da fibra é significativamente reduzido após somente 5 metros de propagação da fibra. Assim, o comprimento de onda de corte, medido  
15 como o comprimento de onda em que o sinal óptico não é mais de modo único após a propagação através de 5 metros de fibra, é entre 1240 nanômetros e 1310 nanômetros para a fibra descrita.

                    Além disso, a Tabela 14 mostra claramente que o modo LP11 é prontamente bem atenuado após 22 metros de propagação. Observa-se, em  
20 particular, que a atenuação do modo LP11 em uma fibra descrita exemplar (10) é maior do que a atenuação do modo LP11 em uma fibra SSMF, quando a fibra é disposta virtualmente reta. De fato, em uma fibra SSMF, são as curvaturas que tornam possível elevadamente atenuar o modo LP11. Assim, a fibra tem uma atenuação do modo LP11 maior do que 5 dB, após 22 metros  
25 de propagação em fibra reta em um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

                    Além disso, a Tabela 14 também mostra que a atenuação de pelo menos 19,3 dB do modo LP11 é alcançada relativamente rápido, após menos do que 22 metros, de acordo com o corte de cabo imposto pela

recomendação. Além disso, o aumento do comprimento de onda de corte eficaz torna possível aumentar o valor MAC, como definido acima, e consequentemente reduzir as perdas de curvatura.

A Tabela 15 (abaixo) relata os valores de perdas de curvatura para formas de realização preferidas das fibras, como descrito aqui. A primeira coluna da Tabela 15 repete as referências da Tabela 12. As quatro colunas seguintes mostram valores das perdas de curvatura PPC para respectivos raios de curvatura de 15 milímetros, 10 milímetros, 7,5 milímetros e 5 milímetros em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros. As quatro colunas seguintes fornecem os valores das perdas de curvatura PPC para os respectivos raios de curvatura de 15 milímetros, 10 milímetros, 7,5 milímetros, e 5 milímetros em um comprimento de onda de 1625 nanômetros.

A última coluna tem um fator de mérito (Figura de mérito) representando a ordem de magnitude do melhoramento nas perdas de curvatura das fibras descritas em relação aos limites impostos pela recomendação G.657B. A Figura de mérito da Tabela 15 é assim definido como uma média das razões entre os limites superior, imposto pela norma G.657B, e as perdas de curvatura das fibras descritas para cada raio de curvatura medido. Todos os exemplos apresentam uma Figura de Mérito menor do que ou igual a 1, deste modo significando que todos estão de acordo com as recomendações das perdas de curvatura G.657B.

A Tabela 15 relata, na primeira linha, os valores de limite da perda de curvatura, impostos pela recomendação G.657B, para cada raio de curvatura e para os comprimentos de onda de 1.550 nanômetros e 1625 nanômetros.

**TABELA 15**

	R=15mm	R=10mm	R=7,5mm	R=5mm	R=15mm	R=10mm	R=7,5mm	R=5mm	FOM
	PPC @1.550nm (dB/volta)				PPC @1625nm (dB/volta)				
G657B	3 E-03	1 E-01	5 E-01		1 E-02	2 E-01	1 E+00		1,00
BTF	1,3E-03	2,9E-02	1,0E-01	3,3E-01	7,0E-03	8,4E-02	2,3E-01	6,3E-01	0,70
S SMF1	1,5E-02	6,0E-01	3,4E+00	1,7E+01	7,5E-02	1,7E+00	6,9E+00	2,7E+01	8,44
SSMF2	6,3E-03	3,6E-01	2,4E+00	1,4E+01	3,4E-02	1,0E+00	5,0E+00	2,3E+01	5,21
SSMF3	9,6E-04	1,1E-01	1,0E+00	8,9E+00	6,5E-03	3,6E-01	2,5E+00	1,4E+01	2,45
C,Ex1	4,9E-05	2,9E-03	1,6E-02	7,1E-02	3,9E-04	1,1E-02	4,2E-02	1,3E-01	0,05
C,Ex2	5,4E-05	2,9E-03	1,6E-02	6,5E-02	4,3E-04	1,1E-02	4,1E-02	1,3E-01	0,05

C.Ex3	6,6E-05	3,0E-03	1,5E-02	5,6E-02	5,0E-04	1,1E-02	3,8E-02	1,1E-01	0,05
C.Ex4	6,2E-05	3,1E-03	1,5E-02	6,3E-02	4,7E-04	1,1E-02	3,9E-02	1,2E-01	0,06
C.Ex5	2,2E-04	6,9E-03	2,7E-02	1,0E-01	1,3E-03	2,1E-02	6,4E-02	1,8E-01	0,13
C.Ex6	2,1E-04	7,1E-03	2,9E-02	1,1E-01	1,3E-03	2,2E-02	6,9E-02	2,0E-01	0,13
C.Ex7	1,4E-04	6,5E-03	3,1E-02	1,3E-01	1,0E-03	2,2E-02	7,7E-02	2,4E-01	0,11
C.Ex8	1,4E-04	5,4E-03	2,4E-02	9,0E-02	9,2E-04	1,8E-02	5,8E-02	1,7E-01	0,09
C.Ex9	2,3E-04	7,3E-03	2,8E-02	1,0E-01	1,4E-03	2,3E-02	6,8E-02	2,0E-01	0,14
C.Ex10	2,0E-04	6,8E-03	2,9E-02	1,0E-01	1,2E-03	2,2E-02	6,8E-02	2,0E-01	0,12
C.Ex11	2,0E-04	7,1E-03	3,0E-02	1,1E-01	1,2E-03	2,3E-02	7,1E-02	2,1E-01	0,12
C.Ex12	2,0E-04	7,0E-03	2,9E-02	1,0E-01	1,3E-03	2,2E-02	6,8E-02	2,0E-01	0,13
C.Ex13	2,3E-04	7,4E-03	2,9E-02	1,1E-01	1,4E-03	2,3E-02	7,0E-02	2,1E-01	0,14
Ex1	2,3E-03	2,8E-02	8,0E-02	1,4E-01	1,0E-02	7,5E-02	1,7E-01	2,5E-01	1,00
Ex2	1,2E-03	1,9E-02	5,0E-02	1,0E-01	6,5E-03	5,4E-02	1,3E-01	2,1E-01	0,65
Ex3	8,5E-04	1,2E-02	3,6E-02	6,7E-02	4,5E-03	3,7E-02	8,4E-02	1,4E-01	0,45
Ex4	7,1E-04	1,3E-02	4,3E-02	8,7E-02	4,1E-03	4,2E-02	1,0E-01	1,8E-01	0,41
Ex5	4,9E-04	8,7E-03	2,8E-02	5,6E-02	2,8E-03	2,8E-02	6,7E-02	1,2E-01	0,28
Ex6	2,0E-04	7,1E-03	3,1E-02	1,1E-01	1,2E-03	2,3E-02	7,2E-02	2,1E-01	0,12
Ex7	2,2E-04	7,4E-03	3,1E-02	1,1E-01	1,4E-03	2,4E-02	7,2E-02	2,1E-01	0,14
Ex8	1,7E-04	7,4E-03	3,4E-02	1,3E-01	1,2E-03	2,4E-02	8,2E-02	2,5E-01	0,12
Ex9	1,9E-04	7,0E-03	3,0E-02	1,1E-01	1,2E-03	2,3E-02	7,2E-02	2,1E-01	0,12

5 Observa-se pela Tabela 15 que as perdas de curvatura das fibras descritas são claramente menores do que os limites impostos pela norma G.657B, contudo, para o Exemplo 1 a perda de curvatura a 1625 nanômetros em uma curvatura de 15 milímetros é a mesma que a da recomendação.

10 Assim, a fibra descrita (acima) tem, para um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, perdas de curvatura menores do que  $3 \times 10^{-3}$  dB/volta, preferivelmente, menores do que  $0,25 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 15 milímetros, quando comparadas com um limite de  $3 \times 10^{-3}$  dB/volta imposto pela recomendação G.657B. A fibra ainda tem perdas de curvatura menores do que ou iguais a  $3 \times 10^{-2}$ , preferivelmente, menores do que ou iguais a  $7,5 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 10 milímetros, quando comparadas com um limite de 0,1 dB/volta imposto pela recomendação G.657B. As perdas de curvatura são menores do que ou iguais a 0,05 dB/volta, para um raio de curvatura de 7,5 milímetros, quando comparadas com um limite de 0,5 dB/volta imposto pela recomendação G.657B, e perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,15 dB/volta, preferivelmente menores do que ou iguais a 0,10 dB/volta, para um raio de curvatura de 5 milímetros.

20 Similarmente, a fibra descrita exibe, para um comprimento de onda de 1625 nanômetros, perdas de curvatura menores do que  $10^{-2}$  dB/volta,

preferivelmente, menores do que  $1,5 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 15 milímetros, quando comparadas com um limite de  $10^{-2}$  dB/volta imposto pela recomendação G.657B. As perdas de curvatura são menores do que ou iguais 0,1 dB/volta, preferivelmente, menores do que ou iguais a  $25 \times 10^{-3}$  dB/volta, para um raio de curvatura de 10 milímetros, quando comparadas com um limite de 0,2 dB/volta imposto pela recomendação G.657B. A fibra exibe perdas de curvatura menores do que ou iguais a 0,15 dB/volta, preferivelmente, menores do que ou iguais a 0,08 dB/volta, para um raio de curvatura de 7,5 milímetros, quando comparadas com um limite de 1 dB/volta imposto pela recomendação G.657B, e perdas de curvatura menores do que 0,25 dB/volta para um raio de curvatura de 5 milímetros.

As fibras descritas aqui são bem adequadas para uso em sistemas ópticos instalados no domicílio do assinante do tipo FTTH, em que a fibra é submetida à tensões de curvatura significativas, devidas à miniaturização da caixa óptica ou retenção da fibra em posição com grampos. A fibra pode ser colocada em caixas ópticas particularmente compactas. De fato, a fibra óptica pode ser disposta com um raio de curvatura menor do que 15 milímetros, por exemplo, um raio de curvatura de cerca de 5 milímetros. A fibra permanece compatível com as fibras dos sistemas existentes, em particular, nos termos de diâmetro do campo de modo, para bom acoplamento de fibra-com-fibra. O aumento do comprimento de onda de corte não é prejudicial, devido a uma atenuação significativa do modo LP11 de um comprimento de onda de 1260 nanômetros.

Como observado, a fibra óptica de acordo com a presente invenção inclui uma ou mais camadas de revestimento (por exemplo, uma de revestimento primário e uma de revestimento secundário). Pelo menos uma das camadas de revestimento - tipicamente a de revestimento secundário - pode ser colorida e/ou possuir outras marcações para ajudar a identificar

fibras individuais. Alternativamente, uma camada de tinta terciária pode circundar os revestimentos primário e secundário.

5 A fibra óptica, de acordo com a presente invenção, pode ser desenvolvida em várias estruturas, tais como aquelas estruturas exemplares descritas a seguir.

10 Por exemplo, uma ou mais das presentes fibras ópticas podem ser incluídas dentro de um tubo amortecedor. Por exemplo, a fibra óptica pode ser desenvolvida em um tubo amortecedor solto de única fibra ou um tubo amortecedor solto de multi-fibras. Com respeito ao último, múltiplas fibras ópticas podem ser enfeixadas ou torcidas dentro de um tubo amortecedor ou outra estrutura. A este respeito, dentro de um tubo amortecedor solto de multi-fibra, fibras sub-enfeixadas podem ser separadas com aglutinantes (por exemplo, cada fibra sub-enfeixada é envolvida em um aglutinante). Além disso, uma tubulação de insuflar para fora pode ser instalada na terminação de  
15 tais tubos amortecedores soltos, para diretamente terminar fibras ópticas amortecidas soltas com conectores instalados no campo.

20 Em outras formas de realização, o tubo amortecedor pode circundar apertadamente o revestimento da fibra óptica mais externo (isto é, fibra amortecida apertada) ou de outro modo circundar o revestimento da fibra óptica mais externo ou camada de tinta, para prover uma folga radial exemplar entre cerca de 50 e 100 microns (isto é, uma fibra amortecida semi-apertada).

25 Com respeito à fibra amortecida apertada anterior, o amortecimento pode ser formado revestindo-se a fibra óptica com uma composição curável (por exemplo, um material curável por UV) ou um material termoplástico. O diâmetro externo dos tubos amortecedores apertados, independente de se o tubo amortecedor é formado de um material curável ou não-curável, é tipicamente menor cerca de 1.000 microns (por exemplo, cerca de 500 microns ou cerca de 900 microns).

Com respeito à última fibra amortecida semi-apertada, um lubrificante pode ser incluído entre a fibra óptica e o tubo amortecedor (por exemplo, para prover uma camada de deslizamento).

5 Como será conhecido por aqueles tendo habilidade comum na arte, um tubo amortecedor exemplar, incluindo fibras ópticas, como descrito aqui, pode ser formado de poliolefinas (por exemplo, polietileno ou polipropileno), incluindo poliolefinas fluoradas, poliésteres (por exemplo, polibutileno tereftalato), poliamidas (por exemplo, náilon), bem como outros materiais poliméricos e misturas. Em geral, um tubo amortecedor pode ser  
10 formado de uma ou mais camadas. As camadas podem ser homogêneas ou incluir misturas ou combinações de vários materiais dentro de cada camada.

Neste contexto, o tubo amortecedor pode ser extrusado (por exemplo, um material polimérico extrusado) ou pultrusado (por exemplo, um plástico reforçado por fibra pultrusada). Por meio de exemplo, o tubo  
15 amortecedor pode incluir um material para prover elevada temperatura e resistência química (por exemplo, um material aromático ou material de polissulfona).

Embora tubos amortecedores tipicamente tenham uma seção transversal circular, os tubos amortecedores alternativamente podem ter um  
20 formato irregular ou não-circular (por exemplo, uma seção transversal oval ou trapezoidal).

Alternativamente, uma ou mais das fibras ópticas presentes pode simplesmente ser circundada por um envoltório protetor externo ou encapsulada dentro de um tubo de metal selado. Em qualquer estrutura,  
25 nenhum tubo amortecedor intermediário é necessariamente requerido.

Múltiplas fibras ópticas, como descrito aqui, podem ser intercaladas, encapsuladas e/ou ligadas pela borda, para formar uma fita de fibra óptica. As fitas de fibra óptica podem ser divisíveis em sub-unidades (por exemplo, uma fita de doze fibras que é divisível em sub-unidades de seis

fibras). Além disso, uma pluralidade de tais fitas de fibra óptica pode ser agregada para formar uma pilha de fitas, que pode ter vários tamanhos e formatos.

5 Por exemplo, é possível formar uma pilha de fitas retangulares ou uma pilha de fitas em que as fitas de fibra óptica mais superiores e mais inferiores têm menos fibras ópticas do que aquelas em direção ao centro da pilha. Esta construção pode ser útil para aumentar a densidade dos elementos ópticos (por exemplo, fibras ópticas) dentro do tubo amortecedor e/ou cabo.

10 Em geral, é desejável aumentar a trama dos elementos de transmissão nos tubos amortecidos ou cabos submetidos a outras restrições (por exemplo, atenuação de cabo ou meio-vão). Os próprios elementos ópticos podem ser designados para aumentada densidade de acondicionamento. Por exemplo, a fibra óptica pode possuir propriedades modificadas, tais como perfil de índice refrativo, dimensões de núcleo ou  
15 cobertura, ou espessura e/ou módulo de revestimento primário melhorados, para melhorar as características de microcurvatura e macrocurvatura.

Por meio de exemplo, uma pilha de fitas retangulares pode ser formada com ou sem uma torção central (isto é, uma “torção primária”). Aqueles tendo habilidade comum na arte observarão que uma pilha de fitas é  
20 tipicamente fabricada com torção rotacional, para permitir o tubo ou cabo curvar-se sem empregar excessiva tensão mecânica sobre as fibras ópticas durante enrolamento, instalação e uso. Em uma variação estrutural, uma pilha de fitas retangulares torcida (ou destorcida) pode ser ainda formada em uma configuração igual a serpentina (por exemplo, uma hélice) ou uma  
25 configuração similar a onda (por exemplo, uma senóide). Em outras palavras, a pilha de fitas pode possuir deformações “secundárias” regulares.

Como será conhecido daqueles tendo habilidade comum na arte, tais fitas de fibra óptica podem ser posicionadas dentro de um tubo amortecedor ou outra estrutura circundante, tal como um cabo livre de tubo

amortecedor. Submetidos a certas restrições (por exemplo, atenuação) é desejável aumentar a densidade dos elementos, tais como fibras ópticas ou fitas de fibra óptica, dentro de tubos amortecedores e/ou cabos de fibra óptica.

5 Uma pluralidade de tubos amortecedores contendo fibras ópticas (por exemplo, fibras soltas ou presas com fitas) pode ser posicionada externamente adjacente a e torcida em torno de um membro de resistência central. Esta torcedura pode ser realizada em uma direção, helicoidalmente, conhecida como torcedura “S” ou “Z”, ou torcedura de Camada Oscilada Inversa, conhecida como torcedura “S-Z”. A torcedura em torno do membro  
10 de resistência central reduz a tensão, quando a tensão do cabo ocorre durante instalação e uso.

Aqueles tendo habilidade comum na arte compreenderão o benefício de minimizar a tração da fibra tanto para a deformação do cabo de tração como para a deformação do cabo compressivo longitudinal, durante  
15 condições de instalação ou operação.

Com respeito à deformação do cabo de tração, que pode ocorrer durante a instalação, o cabo tornar-se-á mais longo, embora as fibras ópticas possam migrar para mais próximo do eixo geométrico neutro do cabo, para reduzir, se não eliminar, a deformação sendo translada às fibras ópticas.  
20 Com relação à deformação compressiva longitudinal, que pode ocorrer em baixas temperaturas de operação, devido à contração dos componentes do cabo, as fibras ópticas migrarão para longe do eixo geométrico neutro do cabo, para reduzir, se não eliminar, a deformação compressiva sendo translada às fibras ópticas.

25 Em uma variação, duas ou mais camadas substancialmente concêntricas de tubos amortecedores podem ser posicionadas em torno de um membro de resistência central. Em uma outra variação, múltiplos elementos de torcedura (por exemplo, tubos amortecedores múltiplos torcidos em torno de um membro de resistência) podem, eles mesmos, serem torcidos entre si ou

em torno de um membro de resistência central primário.

Alternativamente, uma pluralidade de tubos amortecedores contendo fibras ópticas (por exemplo, fibras soltas ou presas com fitas) pode ser simplesmente colocada externamente adjacente ao membro de resistência central (isto é, os tubos amortecedores não são intencionalmente torcidos ou dispostos em torno do membro de resistência central em um modo particular e correm substancialmente paralelos ao membro de resistência central).

Alternativamente ainda, as presentes fibras ópticas podem ser posicionadas com um tubo amortecedor central (isto é, o cabo de tubo amortecedor central tem um tubo amortecedor central em vez de um membro de resistência central). Um tal cabo de tubo amortecedor central pode posicionar os membros de resistência em outro lugar. Por exemplo, os membros de resistência metálicos ou não metálicos (por exemplo, GRP) podem ser posicionados dentro do próprio encapsamento de cabo, e/ou uma ou mais camadas de fios de elevada resistência (por exemplo, fios de aramida ou não-aramida) pode ser posicionada paralela a ou enrolada (por exemplo, concentricamente) em torno do tubo amortecedor (isto é, dentro do espaço interno do cabo). Da mesma maneira, membros de resistência podem ser incluídos dentro da camisa do tubo amortecedor.

Em outras formas de realização, as fibras ópticas podem ser colocadas dentro de um cabo de núcleo com fenda. Em um cabo de núcleo com fenda, fibras ópticas, individualmente ou como uma fita de fibra, podem ser colocadas dentro de sulcos helicoidais pré-conformados (isto é, canais) na superfície de um membro de resistência central, desse modo formando uma unidade de núcleo com fenda. A unidade de núcleo com fenda pode ser incluída por um tubo amortecedor. Uma ou mais de tais unidades de núcleo com fenda pode ser colocada dentro de um cabo de núcleo com fenda. Por exemplo, uma pluralidade de unidades de núcleo com fenda pode ser helicoidalmente torcida em torno de um membro de resistência central.

Alternativamente, as fibras ópticas podem também ser torcidas em um projeto de cabo de maxitubo, por meio do que as fibras ópticas são torcidas em torno de si mesmas dentro de um grande tubo amortecedor solto de multi-fibras em vez de em torno de um membro de resistência central. Em  
5 outras palavras, o grande tubo amortecedor solto de multi-fibras é centralmente posicionado dentro do cabo de maxitubo. Por exemplo, tais cabos de maxitubo podem ser desenvolvidos em fios terra ópticos (OPGW).

Em outra forma de realização de cabeamento, múltiplos tubos amortecedores podem ser torcidos em torno de si mesmos sem a presença de  
10 um membro central. Estes tubos amortecedores torcidos podem ser circundados por um tubo protetor. O tubo protetor pode servir como o invólucro externo do cabo de fibra óptico ou pode ser ainda circundado por um encapsamento externo. O tubo protetor pode apertada ou frouxamente circundar os tubos amortecedores torcidos.

15 Como será conhecido daqueles tendo habilidade comum na arte, elementos adicionais podem ser incluídos dentro de um núcleo de cabo. Por exemplo, cabos de cobre ou outros elementos de transmissão ativos podem ser torcidos ou de outro modo enfeixados dentro do encapsamento de cabo. Elementos passivos podem também ser colocados dentro do núcleo do  
20 cabo, tal como entre as paredes internas dos tubos amortecedores e as fibras ópticas inclusas. Alternativamente e por meio de exemplo, elementos passivos podem ser colocados fora dos tubos amortecedores, entre as respectivas paredes externas dos tubos amortecedores e a parede interna da camisa do cabo, ou dentro do espaço interno de um cabo livre de tubo amortecedor.

25 Por exemplo, fios, pano não-tecido (por exemplo, fitas), espumas ou outros materiais contendo material dilatável em água e/ou revestido com materiais dilatáveis em água (por exemplo, incluindo polímeros super absorventes (SAPs), tais como pós SAP) podem ser empregados para prover bloqueadores de água e/ou acoplar as fibras ópticas ao tubo

amortecedor circundante e/ou encamisamento de cabo (por exemplo, via adesão, fricção e/ou compressão). Elementos dilatáveis em água exemplares são descritos na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0019915 Al comumente cedido e seu Pedido de Patente U.S. No. 11/424.112, para uma  
5 *Water-Swellable Tape, Adhesive-Backed for Coupling When Used Inside a Buffer Tube* (Overton et al), cada um dos quais é por este meio incorporado por referência em sua totalidade.

Além disso, um adesivo (por exemplo, um adesivo de fusão a quente ou adesivo curável, tal como um acrilato de silicone reticulado por  
10 exposição a radiação actínica) pode ser provido em um ou mais elementos passivos (por exemplo, material dilatável em água) para ligar os elementos ao tubo amortecedor. Um material adesivo pode também ser usado para ligar o elemento dilatável em água a fibras ópticas dentro do tubo amortecedor. Formações exemplares de tais elementos são descritas na Publicação do  
15 Pedido de Patente U.S. No. US 2008/0145010 Al comumente cedido para um *Gel-Free Buffer Tube with Adhesively Coupled Optical Element* (Overton et al.), que é por este meio incorporado por referência em sua totalidade.

Os tubos amortecedores (ou cabos livres de tubo amortecedor) podem também conter uma composição tixotrópica (por exemplo, géis de  
20 graxa ou similares a graxa) entre as fibras ópticas e as paredes internas dos tubos amortecedores. Por exemplo, o enchimento do espaço livre dentro de um tubo amortecedor, com graxa de enchimento de bloqueio de água, baseada em petróleo, ajuda a bloquear o ingresso de água. Além disso, a graxa de enchimento tixotrópica (isto é, viscosidade) mecanicamente acopla-se às  
25 fibras ópticas do tubo amortecedor circundante.

Tais graxas de enchimento tixotrópicas são relativamente pesadas e desordenadas, impedindo desse modo operações de conexão e união. Assim, as presentes fibras ópticas podem ser desenvolvidas em estruturas de cabo seco (isto é, tubos amortecedores livres de graxa).

Estruturas de tubo amortecedor exemplar, que são livres de graxas de enchimento tixotrópicas, são descritas no Pedido de Patente U.S. No. 12/146,588 comumente cedido para uma *Coupling Composition for Optical Fiber Cables*, depositada em 26 de Junho de 2008, (Parris et al), que é por este meio incorporada por referência em sua totalidade. Tais tubos amortecedores empregam composições de acoplamento formadas de polímeros elastoméricos de elevado peso molecular (por exemplo, cerca de 35 % em peso ou menos) e óleos (por exemplo, cerca de 65 % em peso ou mais) que escoam em baixas temperaturas. Ao contrário das graxas de enchimento tixotrópicas, a composição de acoplamento (por exemplo, empregada como um gel ou espuma coesiva) é tipicamente seca e, portanto, menos desordenada durante a união.

Como será entendido por aqueles tendo habilidade comum na arte, fibras ópticas incluindo um cabo, como descrito aqui, podem ter um envoltório formado de vários materiais em vários projetos. A blindagem do cabo pode ser formada de materiais poliméricos, tais como, por exemplo, polietileno, polipropileno, cloreto de polivinila (PVC), poliamidas (por exemplo, náilon), poliéster (por exemplo, PBT), plásticos fluorados (por exemplo, perfluoroetileno propileno, fluoreto de polivinila ou difluoreto de polivinilideno), e acetato de etileno vinila. Os materiais de tubo envoltório e/ou amortecedor podem também conter outros aditivos, tais como agentes de nucleação, retardantes de chama, retardantes de fumaça, antioxidantes, absorvedores de UV e/ou plastificantes.

A blindagem de cabo pode ser uma única camisa formada de um material dielétrico (por exemplo, polímeros não-condutores) com ou sem componentes estruturais suplementares, que podem ser usados para melhorar a proteção (por exemplo, contra roedores) e a resistência provida pelo encapamento de cabo. Por exemplo, uma ou mais camadas de fita metálica (por exemplo, aço) juntamente com uma ou mais camisas dielétricas, podem

formar a blindagem de cabo. Hastes de reforço metálicas ou de fibra de vidro (por exemplo, GRP) podem também ser incorporadas nos encapamentos. Além disso, fios de aramida, fibra de vidro ou poliéster podem ser empregados sob os vários materiais do encapamento (por exemplo, entre o  
5 encapamento de cabo e o núcleo do cabo) e/ou comandos de abertura podem ser posicionados, por exemplo, dentro do encapamento de cabo.

Similares aos tubos amortecedores, encapamentos de cabo de fibra óptica tipicamente têm uma seção transversal circular, porém encapamentos de cabo, alternativamente, podem ter um formato irregular ou  
10 não-circular (por exemplo, uma seção transversal oval, trapezoidal ou plana).

Por meio de exemplo, a fibra óptica, de acordo com a presente invenção, pode ser incorporada em cabos finais de única fibra, tais como aqueles empregados para aplicações de Unidade de Múltiplas Habitações (MDU). Em tais desenvolvimentos, o encamisamento de cabo deve exibir  
15 resistência ao esmagamento, resistência à abrasão, resistência à perfuração, estabilidade térmica e resistência ao fogo, como requerido por códigos de construção. Um material exemplar para tais camisas de cabo é o poliuretano termicamente estável, retardante de chama (PUR), que protege mecanicamente as fibras ópticas, ainda é suficientemente flexível para  
20 facilitar fáceis instalações MDU. Alternativamente, um encapamento de poliolefina ou cloreto de polivinila retardante de chama pode ser utilizado.

Em geral e como será conhecido daqueles tendo habilidade comum na arte, um membro de resistência é, tipicamente, na forma de uma haste ou fios ou fibras enrolados trançados/helicoidalmente, embora outras  
25 configurações estarão dentro do conhecimento daqueles tendo habilidade comum na arte.

Cabos de fibra óptica contendo fibras ópticas, como descrito, podem ser variavelmente desenvolvidos, incluindo cabos finais, cabos de distribuição, cabos alimentadores, cabos de junção e cabos de ponta de fio

expostas, cada um dos quais pode ter variadas necessidades operacionais (por exemplo, faixa de temperatura, resistência ao esmagamento, resistência UV e raio de curvatura mínimo).

5 Tais cabos de fibra óptica podem ser instalados dentro de dutos, microdutos, plenos ou tubulações ascendentes. Por meio de exemplo, um cabo de fibra óptica pode ser instalado em um duto existente ou microduto por tração ou sopragem (por exemplo, usando ar comprimido). Um método de instalação de cabo exemplar é descrito na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. 2007/0263960 comumente cedido para uma *Communication Cable*  
10 *Assembly and Installation Method* (Lock et al.), e Pedido de Patente U.S. No. 12/200.095 para uma *Modified Pre-Ferrulized Communication Cable Assembly and Installation Method*, depositado em 28 de agosto de 2008, (Griffioen et al.), cada um do qual é incorporado por referência em sua totalidade.

15 Como observado, tubos amortecedores contendo fibras ópticas (por exemplo, fibras soltas ou presas com fitas) podem ser torcidos (por exemplo, em torno de um membro de resistência central). Em tais configurações, um envoltório externo protetor do cabo de fibra óptica pode ter uma superfície externa texturizada, que periodicamente varia  
20 longitudinalmente ao longo do cabo de uma maneira que replica o formato torcido dos tubos amortecedores subjacentes. O perfil texturizado do envoltório externo protetor pode melhorar o desempenho de sopragem do cabo de fibra óptica. A superfície texturizada reduz a superfície de contato entre o cabo e o duto ou microduto e aumenta a fricção entre o meio de sopragem (por exemplo, ar) e o cabo. O envoltório externo protetor pode ser  
25 feito de um material de baixo coeficiente de fricção, que pode facilitar a instalação soprada. Além disso, o envoltório protetor externo pode ser provido com um lubrificante, para facilitar mais a instalação soprada.

Em geral, para obter-se satisfatório desempenho de sopragem

de longa distância (por exemplo, entre cerca de 3.000 a 5.000 pés ou mais), o diâmetro do cabo externo de um cabo de fibra óptica não deve ser maior do que cerca de 70 a 80 % do diâmetro interno dos dutos ou microdutos.

O ar comprimido pode também ser usado para instalar fibras ópticas, de acordo com a presente invenção, em um sistema de fibra soprada de ar. Em um sistema de fibra soprada de ar, uma rede de cabos ou microdutos não enchidos é instalada antes da instalação das fibras ópticas. As fibras ópticas podem subsequentemente ser sopradas dentro dos cabos instalados, quando necessário para suportar as necessárias variações da rede.

Além disso, os cabos de fibra óptica podem ser diretamente enterrados na terra ou, quando um cabo aéreo, suspensos em um poste ou torre. Um cabo aéreo pode ser auto-suportado ou seguro ou preso a um suporte (por exemplo, fio mensageiro ou outro cabo). Os cabos de fibra óptica aéreos exemplares incluem fios terras aéreos (OPGW), cabos auto-suportantes todos dielétricos (ADSS), cabos chicotes todos dielétricos (AD-Lash) e cabos de oito figuras, cada um dos quais é bem conhecido por aqueles tendo habilidade comum na arte. Os cabos de oito Figuras e outros projetos, podem ser diretamente enterrados ou instalados em dutos, e podem opcionalmente incluir um elemento harmonizador, tal como um fio metálico, de modo que possam ser encontrados com um detector de metal.

Além disso, embora as fibras ópticas possam ser ainda protegidas por um encapamento de cabo externo, a própria fibra óptica pode ser ainda reforçada, de modo que a fibra óptica possa ser incluída dentro de um cabo de penetração, que permite o roteamento individual das fibras ópticas individuais.

Para eficazmente empregar as presentes fibras ópticas em um sistema de transmissão, conexões são requeridas em vários pontos da rede. As conexões de fibra óptica são tipicamente produzidas da união por fusão, união mecânica ou conectores mecânicos.

As extremidades de união de conectores podem ser instaladas nas extremidades da fibra no campo (por exemplo, na rede local) ou em uma fábrica antes da instalação dentro da rede. As extremidades dos conectores são unidas no campo a fim de conectar as fibras entre si ou conectar as fibras aos componentes passivos ou ativos. Por exemplo, certas unidades de cabo de fibra óptica (por exemplo, unidades de bifurcação) podem separar e transmitir fibras ópticas individuais de um cabo de fibra óptica múltiplo para conectores em um modo protetor.

O desenvolvimento de tais cabos de fibra óptica pode incluir equipamento suplementar. Por exemplo, um amplificador pode ser incluído para melhorar os sinais ópticos. Módulos de compensação de dispersão podem ser instalados para reduzir os efeitos da dispersão cromática e dispersão do modo de polarização. Caixas unidas, pedestais, e estruturas de distribuição, que podem ser protegidas por um envoltório, podem igualmente ser incluídas. Elementos adicionais incluem, por exemplo, comutadores terminais remotos, unidades de rede óptica, divisores ópticos e comutadores de estação central.

Um cabo contendo fibras de acordo com a presente invenção pode ser desenvolvido para uso em um sistema de comunicação (por exemplo, rede ou telecomunicações). Um sistema de comunicação pode incluir arquitetura de cabo de fibra óptica, tal como fibra-com-o-nó (FTTN), fibra com o envoltório de telecomunicações (FTTE), fibra-com-o-acostamento (FTTC), fibra-com-o-estabelecimento (FTTB) e fibra-com-o-domicílio (FTTH), bem como arquitetura de longa distância ou metrô. Além disso, um módulo óptico ou uma caixa de armazenagem, que inclui um alojamento, pode receber uma parte enrolada da fibra óptica descrita aqui. Por meio de exemplo, a fibra óptica pode ser enrolada com um raio de curvatura menor do que cerca de 15 milímetros (por exemplo, 10 milímetros ou menos, tal como cerca de 5 milímetros) no módulo óptico ou na caixa de armazenagem.

Além disso, as fibras ópticas, de acordo com a presente invenção, podem ser usadas em outras aplicações, incluindo, sem limitação, sensores de fibra óptica ou aplicações de iluminação.

\* \* \*

5 Em outro aspecto, as fibras, ópticas de acordo com a presente invenção, podem ser incluídas por tubos amortecedores formados de um material polimérico endurecido (por exemplo, polissulfona).

Aqueles tendo habilidade comum na arte observarão que tubos amortecedores endurecidos submetem as fibras ópticas convencionais a  
10 excessivo risco de microcurvatura. Ao contrário e como observado, as presentes fibras ópticas insensíveis à curvatura provêem excepcional resistência à microcurvatura e assim podem ser satisfatoriamente desenvolvidas em tubos amortecedores endurecidos.

Por meio de exemplo, o tubo amortecedor pode ter um  
15 diâmetro externo entre cerca de um e dois milímetros. Um tubo amortecedor endurecido exemplar pode possuir um diâmetro interno de cerca de 300 microns, formando assim um tubo amortecedor de fibra única semi-apertado (por exemplo, um tubo amortecedor endurecido tendo um diâmetro externo de 1,0 milímetro e um diâmetro interno de cerca de 300 microns).

20 Em uma forma de realização particular, uma fibra óptica insensível à curvatura de acordo com a presente invenção pode ser incluída por um tubo amortecedor endurecido formado de polissulfona, tal como por extrusão ou pultrusão. Este tipo de tubo amortecedor endurecido provê superior resistência à tensão lateral, que poderia de outro modo causar  
25 microcurvatura ou macrocurvatura da fibra óptica incluída. O tubo amortecedor endurecido é capaz de suportar elevadas temperaturas (por exemplo, 200°C) e expor-se a substâncias químicas corrosivas (por exemplo, gasolina). Semelhante a mais estruturas complexas, o tubo amortecedor endurecido presente oferece proteção contra tensões laterais, elevadas

temperaturas e substâncias químicas corrosivas, no entanto é menos dispendioso e mais simples de fabricar.

\* \* \*

Este pedido incorpora totalmente por referência as seguintes

5 patentes, publicações de pedido de patente e pedidos de patente comumente cedidos: Patente U.S. No. 5.574.816, para *Polypropylene-Polyethylene Copolymer Buffer Tubes for Optical Fiber Cables and Method for Making the Same*, e seu Pedido de Patente Série No. 08/377.366 relacionado; Patente U.S. No. 5.717.805, para *Stress Concentrations in an Optical Fiber Ribbon to*

10 *Facilitate Separation of Ribbon Matrix Material*; Patente U.S. No. 5.761.362, para *Polypropylene-Polyethylene Copolymer Buffer Tubes for Optical Fiber Cables and Method for Making the Same*; Patente U.S. No. 5,911.023, para *Polyolefin Materials Suitable for Optical Fiber Cable Components*; Patente U.S. No. 5.982.968, para *Stress Concentrations in an Optical Fiber Ribbon to*

15 *Facilitate Separation of Ribbon Matrix Material*; Patente U.S. No. 6.035.087, para *Optical Unit for Fiber Optic Cables*; Patente U.S. No. 6.066.397, para *Polypropylene Filler Rods for Optical Fiber Communications Cables*; Patente U.S. No. 6.175.677, para *Optical Fiber Multi-Ribbon and Method for Making the Same*; Patente U.S. No. 6.085.009, para *Water Blocking Gels Compatible*

20 *with Polyolefin Optical Fiber Cable Buffer Tubes and Cables Made Therewith*; Patente U.S. No. 6.215.931, para *Flexible Thermoplastic Polyolefin Elastomers for Buffering Transmission Elements in a Telecommunications Cable*; Patente U.S. No. 6.134.363, para *Method for Accessing Optical Fibers in the Midspan Region of an Optical Fiber Cable*;

25 Patente U.S. No. 6.381.390, para *Color-Coded Optical Fiber Ribbon and Die for Making the Same*; Patente U.S. No. 6.181.857, para *Method for Accessing Optical Fibers Contained in a Sheath*; Patente U.S. No. 6.314.224, para *Thick-Walled Cable Jacket with Non-Circular Cavity Cross Section*; Patente U.S. No. 6.334.016, para *Optical Fiber Ribbon Matrix Material Having*

Optimal Handling Characteristics; Patente U.S. No. 6.321.012, para *Optical Fiber Having Water Swellable Material for Identifying Grouping of Fiber Groups*; Patente U.S. No. 6.321.014, para *Method for Manufacturing Optical Fiber Ribbon*; Patente U.S. No. 6.210.802, para *Polypropylene Filler Rods for Optical Fiber Communications Cables*; Patente U.S. No. 6.493.491, para *Optical Drop Cable for Aerial Installation*; Patente U.S. No. 7.346.244, para *Coated Central Strength Member for Fiber Optic Cables with Reduced Shrinkage*; Patente U.S. No. 6.658.184, para *Protective Skin for Optical Fibers*; Patente U.S. No. 6.603.908, para *Buffer Tube that Results in Easy Access to and Low Attenuation of Fibers Disposed Within Buffer Tube*; Patente U.S. No. 7.045.010, para *Applicator for High-Speed Gel Buffering of Flextube Optical Fiber Bundles*; Patente U.S. No. 6.749.446, para *Optical Fiber Cable with Cushion Members Protecting Optical Fiber Ribbon Stack*; Patente U.S. No. 6.922.515, para *Method and Apparatus to Reduce Variation of Excess Fiber Length in Buffer Tubes of Fiber Optic Cables*; Patente U.S. No. 6.618.538, para *Method and Apparatus to Reduce Variation of Excess Fiber Length in Buffer Tubes of Fiber Optic Cables*; Patente U.S. No. 7.322.122, para *Method and Apparatus for Curing a Fiber Having at Least Two Fiber Coating Curing Stages*; Patente U.S. No. 6.912.347, para *Optimized Fiber Optic Cable Suitable for Microduct Blown Installation*; Patente U.S. No. 6.941.049, para *Fiber Optic Cable Having No Rigid Strength Members and a Reduced Coefficient of Thermal Expansion*; Patente U.S. No. 7.162.128, para *Use of Buffer Tube Coupling Coil to Prevent Fiber Retraction*; Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0019915 A1, para uma *Water-Swellable Tape, Adhesive-Backed for Coupling When Used Inside a Buffer Tube* (Overton et al.); Publicação do Pedido de Patente Internacional No. 2007/013923, para *Grease-Free Buffer Optical Fiber Buffer Tube Construction Utilizing a Water-Swellable, Texturized Yarn* (Overton et al.); Publicação do Pedido de Patente Europeu No. 1.921.478 A1, para um

*Telecommunication Optical Fiber Cable* (Tatat et al.); Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2007/0183726 A1, para um *Optical Fiber Cable Suited for Blown Installation or Pushing Installation in Microducts of Small Diameter* (Nothofer et al); Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 5 2008/0037942 A1, para um *Optical Fiber Telecommunications Cable* (Tatat); Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2008/0145010 A1, para um *Gel-Free Buffer Tube with Adhesively Coupled Optical Element* (Overton et al); Publicação do Pedido de Patente U.S. No. US 2008/0181564 A1, para um *Fiber Optic Cable Having a Water-Swellable Element* (Overton); Pedido de 10 Patente U.S. No. 12/101/528, para um *Method for Accessing Optical Fibers within a Telecommunication Cable*, depositado em 11 de abril de 2008, (Lavenne et al); Pedido de Patente U.S. No. 12/146.526, para um *Optical Fiber Cable Having a Deformable Coupling Element*, depositado em 26 de junho de 2008, (Parris et al); Pedido de Patente U.S. No. 12/146.588, para um 15 *Coupling Composition for Optical Fiber Cables*, depositado em 26 de junho de 2008, (Parris et al.); Pedido de Patente U.S. No. 61/096.545, para um *Optical Fiber Cable Assembly*, depositado em 12 de setembro de 2008, (Barker et al); Pedido de Patente U.S. No. 61/096.750, para *High-Fiber-Density Optical Fiber Cable*, depositado em 12 de setembro de 2008, (Lovie, 20 et al.).

\* \* \*

No relatório e nas figuras, foram descritas formas de realização típicas da invenção. A presente invenção não é limitada a tais formas de realização exemplares. Termos específicos foram usados somente 25 em um sentido genérico e descritivo e não para fins de limitação. O escopo da invenção é fornecido nas seguintes reivindicações.

## REIVINDICAÇÕES

1. FIBRA ÓPTICA, possuindo um sistema de revestimento melhorado que reduz a micro curvatura induzida por tensão, caracterizada por compreender:

5                   uma fibra de vidro de modo simples insensível à curvatura assistida por vala, a dita fibra de vidro de modo simples compreendendo:

- um núcleo central tendo um raio  $r_1$  e uma diferença positiva de índice  $\Delta n_1$  com dita cobertura óptica; em que a integral de superfície de dito núcleo central ( $V_{01}$ ), definida como

10                   
$$V_{01} = \int_0^{r_1} \Delta n(r) \cdot dr \approx r_1 \times \Delta n_1$$

é entre  $19,0 \times 10^{-3}$  micrometros e  $23,0 \times 10^{-3}$  micrometros

- uma cobertura intermediária tendo um raio  $r_2$  e uma diferença de índice positiva  $\Delta n_2$  com a cobertura óptica sendo menor do que a diferença de índice  $\Delta n_1$  de dito núcleo; em que a integral de superfície da dita cobertura

15 intermediária  $V_{02}$ , definida como

$$V_{02} = \int_{r_1}^{r_2} \Delta n(r) \cdot dr \approx (r_2 - r_1) \times \Delta n_2$$

é entre  $-0,5$  e  $3,0 \times 10^{-3}$  micrometros

20 - uma vala rebaixada tendo um raio  $r_3$  e uma diferença de índice negativa  $\Delta n_3$  com dita cobertura óptica;

em que a fibra óptica tem um diâmetro de campo de modo nominal (MFD) entre 8,6 microns e 9,5 microns em um comprimento de onda de 1310 nanometros e, para um comprimento de onda de 1550 nanometros, perdas de curvatura menores do que 0,15 dB/volta para um raio de curvatura de 5  
25 milímetros; e

- um comprimento de onda de corte de cabo menor do que ou igual a 1260 nanometros, medido como o comprimento de onda em que a atenuação do modo LP11 é maior do que ou igual a 19,3 dB após propagação através de 22 metros de fibra

- em que a integral de superfície da dita vala rebaixada ( $V_{03}$ ),  
definida como

$$V_{03} = \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot dr \approx (r_3 - r_2) \times \Delta n_3$$

ser entre  $-55,0 \times 10^{-3}$  micrometros e  $-30,0 \times 10^{-3}$  micrometros; e a

5 integral do volume de dita vale rebaixada ( $V_{13}$ ), definida como

$$V_{13} = 2 \cdot \int_{r_2}^{r_3} \Delta n(r) \cdot r \cdot dr \approx (r_3^2 - r_2^2) \times \Delta n_3$$

ser entre  $-1200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  e  $-750 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,

e dita fibra óptica ainda compreende um revestimento primário curado, o dito revestimento primário compreendendo entre 40 e 80% de uma  
10 composição de acrilato de poliuretano curável por UV e compreendendo ainda um fotoiniciador, um ou mais oligómeros, e um ou mais diluentes monoméricos, e dito revestimento primário curado possuindo (i) um módulo in situ maior que 0,2Mpa e menor do que cerca de 0,5 MPa e (ii) uma temperatura de transição vítrea menor do que cerca de  $-50^\circ\text{C}$ .

15 2. FIBRA, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo dito revestimento primário substancialmente curado possuir um módulo in situ de entre cerca 0,3 MPa e 0,4 MPa.

3. FIBRA, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo dito revestimento primário obter 50 por cento de cura total em uma dose UV de  
20 cerca de  $0,3 \text{ J/cm}^2$ , conforme medido em uma película padrão de 75 microns em temperatura e pressão padrão,

4. FIBRA, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo dito revestimento primário obter 80 por cento de cura total em uma dose de UV de cerca de  $0,5 \text{ J/cm}^2$ .

25 5. FIBRA, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo dito revestimento primário obter 90 por cento de cura total em uma dose UV de cerca de  $10 \text{ J/cm}^2$ , conforme medido em uma película de 75 microns padrão em temperatura e pressão padrão.

6. FIBRA, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada por

um diâmetro externo entre cerca de 150 microns e cerca de 230 microns, opcionalmente incluir uma camada de revestimento secundário e/ou uma camada de tinta.

5 7. FIBRA, de acordo com a reivindicação 6, caracterizada por compreender ainda uma camada de revestimento secundário, tendo um diâmetro externo entre cerca de 190 microns e 210 microns, em que dita fibra de vidro de modo único tem um diâmetro de cerca de 125 microns e dito revestimento primário substancialmente curado ter um diâmetro externo entre cerca de 135 microns e 175 microns.

10 8. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizada por, em comprimentos de onda entre 1200 nanômetros e 1700 nanômetros, dita fibra óptica insensível à curvatura possuir perdas adicionadas de atenuação espectral menores do que cerca de 0,1 dB/km, conforme medido de acordo com IEC TR62221, Método B (lixa grau de 40" microns),

15 9. FIBRA, de acordo com a reivindicação 6, caracterizada por, em um comprimento de onda de 1550 nanômetros ou 1625 nanômetros, dita fibra óptica insensível à curvatura possuir perdas adicionadas de atenuação menores do que cerca 0,05 dB/km, conforme medido de acordo com IEC TR62221, Método B (lixa grau 40-microns).

20 10. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 9, caracterizada por, em um comprimento de onda de 1.550 nanômetros, dita fibra óptica insensível à curvatura possuir perdas adicionadas de atenuação menores do que 1,0 dB/km, conforme medido a 23°C, de acordo com um teste de tambor de lixa de diâmetro fixo IEC TR62221 modificado, em que uma amostra de fibra  
25 de 440 metros é enrolada em uma camada única a cerca de 1.470 mN em um tambor de quartzo com o diâmetro de 300 mm, que é envolvido com lixa de granulação-180, para criar uma superfície áspera.

11. FIBRA, de acordo com a reivindicação 10, caracterizada por, em um comprimento de onda de 1550 nanômetros, dita fibra óptica insensível à

curvatura possuir perdas adicionadas de atenuação menores do que cerca de 1,5 dB/km, conforme medido a -40°C.

12. FIBRA, de acordo com a reivindicação 10, caracterizada por, em um comprimento de onda de 1550 nanômetros, dita fibra óptica insensível à curvatura possuir perdas de adicionadas de atenuação menores do que cerca de 2,0 dB/km conforme medido a -60°C.

13. FIBRA, de acordo com a reivindicação 10, caracterizada por, em um comprimento de onda de 1550 nanômetros, dita fibra óptica insensível à curvatura possuir sensibilidade de microcurvatura menor do que cerca de 25 {dB/km)/(N/mm), conforme medido após uma hora a 23°C.

14. FIBRA, de acordo com a reivindicação 10, caracterizada por, em um comprimento de onda de 1550 nanômetros, dita fibra óptica insensível à curvatura possuir sensibilidade de micro-curvatura menor do que cerca de 75 (dB/km)/(N/mm), conforme medido após uma hora a -40°C.

15. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 14, caracterizada pela integral de superfície de dito núcleo central ( $V_{01}$ ) ser entre cerca de  $20,0 \times 10^{-3}$  microns e  $21,5 \times 10^{-3}$  microns.

16. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 15, caracterizada pela integral de superfície de dita vala rebaixada ( $V_{03}$ ) ser entre  $-42,5 \times 10^{-3}$  microns e  $-32,5 \times 10^{-3}$  microns.

17. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 16, caracterizada pela integral do volume de dita vala rebaixada ( $V_{13}$ ) ser entre  $-1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  e  $-750 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ .

18. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 17, caracterizada por compreender ainda um comprimento de onda de corte eficaz  $\lambda_{\text{ceff}}$  maior do que 1300 nanômetros, opcionalmente.

19. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 18, caracterizada por compreender ainda um comprimento de onda de corte entre 1240 nanômetros e 1310 nanômetros.

20. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 19, caracterizada por compreender ainda um comprimento de onda de corte teórico menor do que ou igual a 1250 nanômetros.

5 20, caracterizada pelo dito núcleo central ter um raio  $r_1$  entre 3,8 microns e 4,35 microns.

22. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 21, caracterizada pela dita cobertura intermediária ter um raio  $r_2$  compreendido entre 8,5 microns e 9,7 microns.

10 23. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 22, caracterizada pela dita vala rebaixada ter um raio  $r_1$  entre 13,5 microns e 16 microns.

15 24. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 23, caracterizada pelo dito núcleo central ter uma diferença de índice ( $\Delta n_1$ ) com dita cobertura óptica entre  $4,9 \times 10^{-3}$  e  $5,7 \times 10^{-3}$ .

25. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 24, caracterizada pela dita cobertura intermediária ter uma diferença de índice ( $\Delta n_2$ ) com dita cobertura óptica entre  $-0,1 \times 10^{-3}$  e  $0,6 \times 10^{-3}$ .

20 26. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 25, caracterizada pela dita vala rebaixada ter uma diferença de índice ( $\Delta n_3$ ) com dita cobertura óptica entre  $-10,0 \times 10^{-3}$  e  $-5,0 \times 10^{-3}$ .

27. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 26, caracterizada por compreender ainda um comprimento de onda de dispersão cromática zero (ZDW) entre 1.300 nanômetros e 1325 nanômetros.

25 28. FIBRA, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 27, caracterizada por compreender ainda um valor de inclinação de dispersão cromática zero no comprimento de onda de dispersão cromática zero (ZDS) menor do que  $0,092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ .

29. CAIXA ÓPTICA, caracterizada por compreender pelo menos

uma porção de uma ou mais fibra ópticas ou um sistema FTTx compreendendo uma ou mais fibras ópticas, conforme definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 28.

FIG. 1

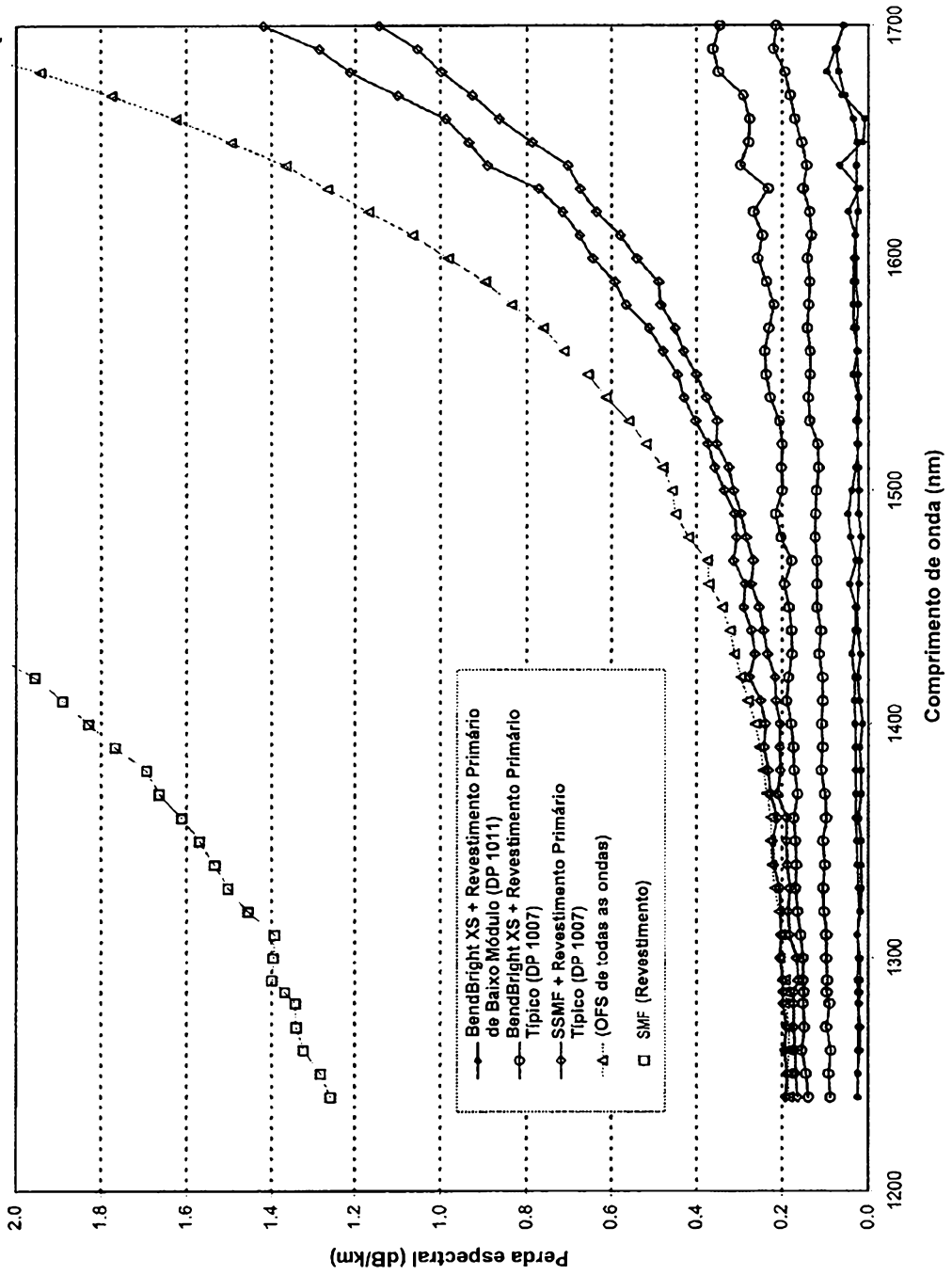
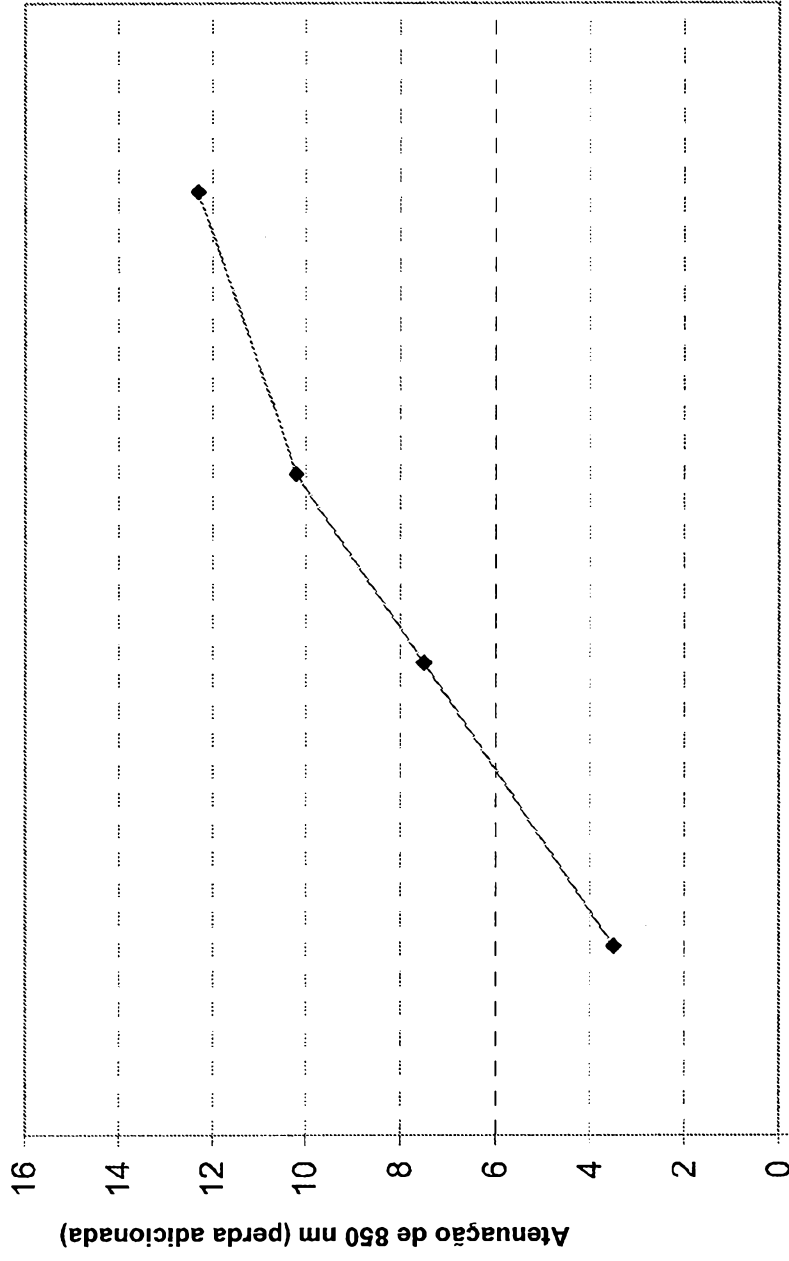


FIG. 2



Módulo de revestimento primário in situ.

FIG. 3

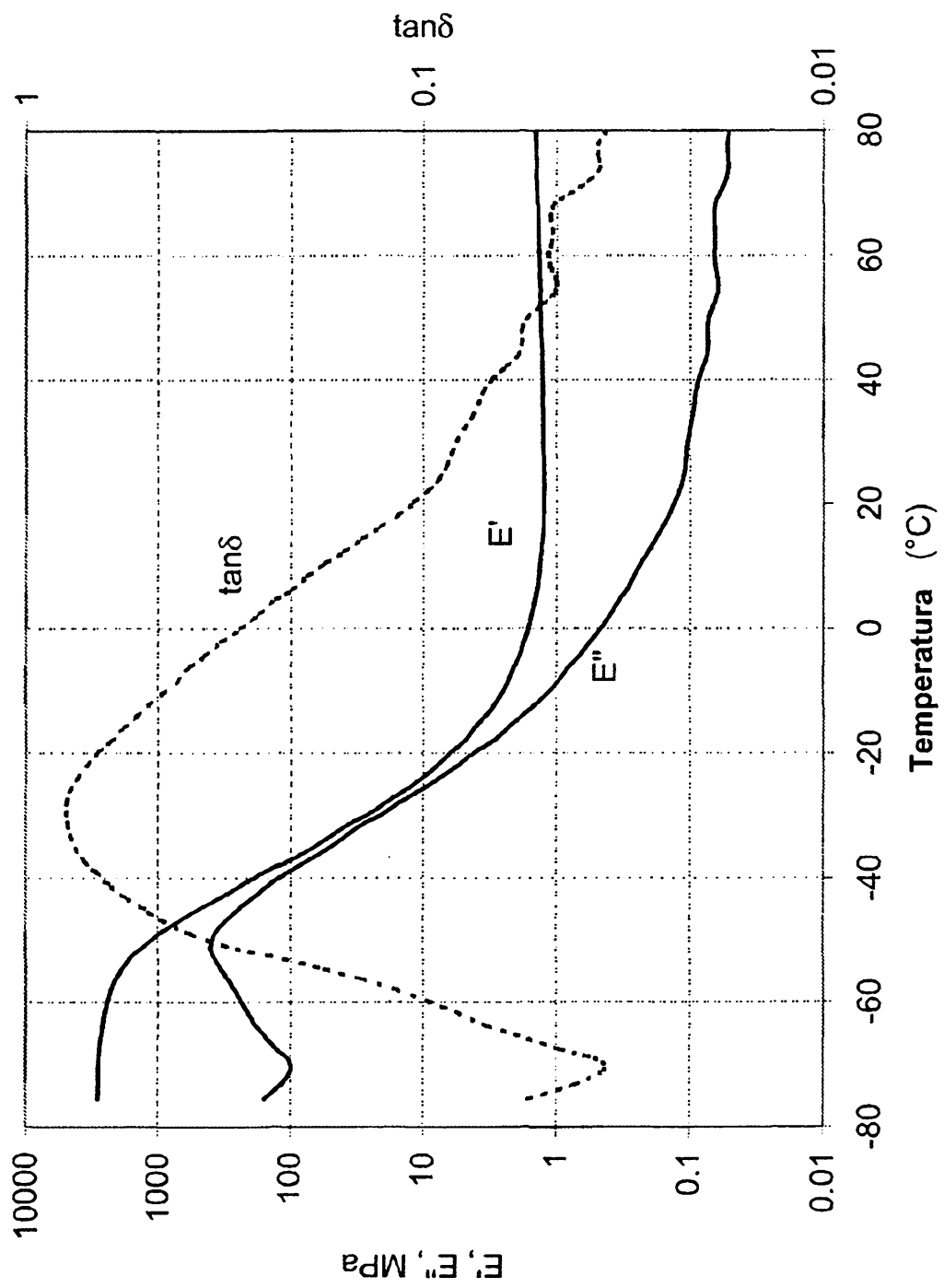


FIG. 4

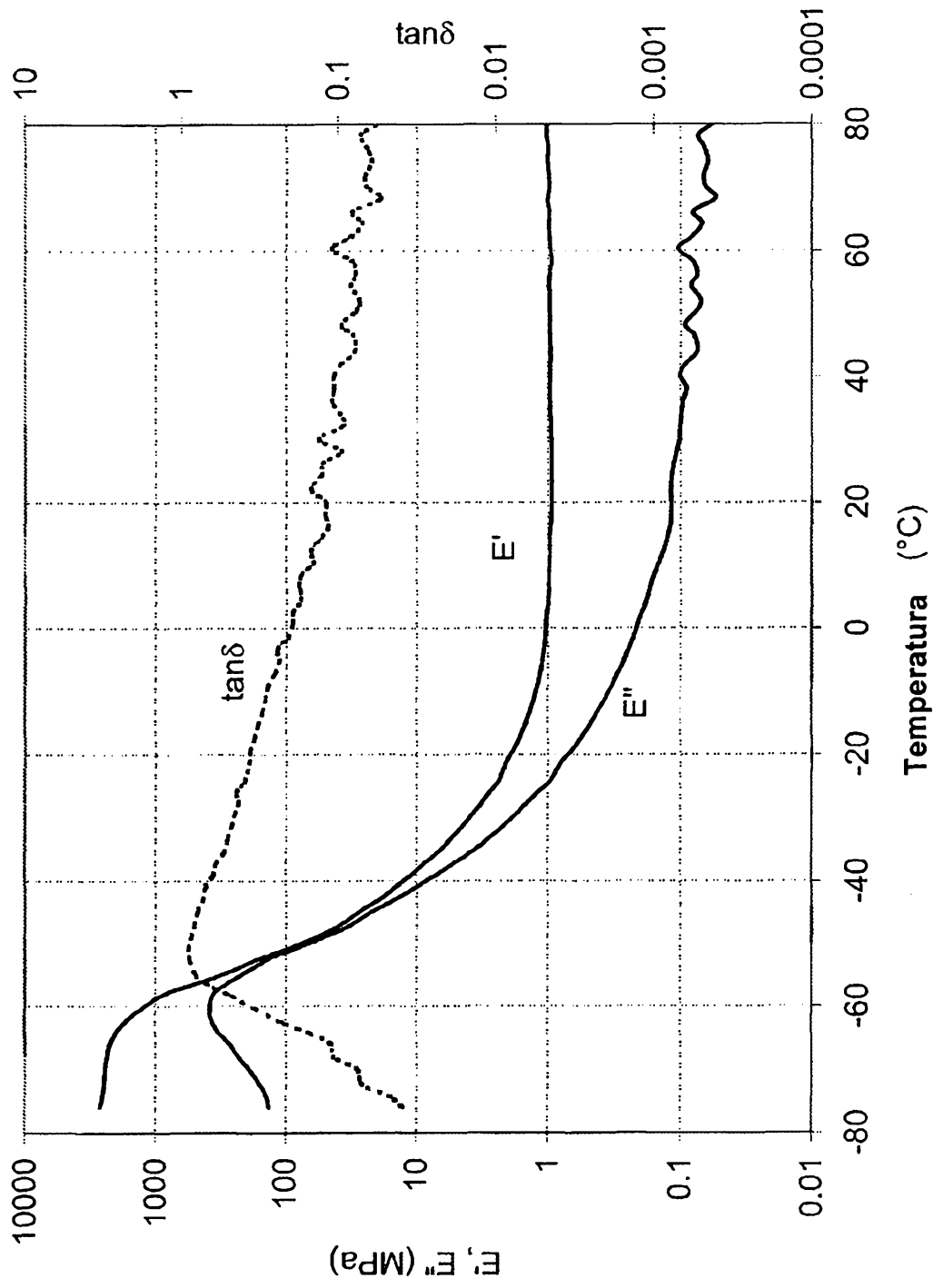


FIG. 5

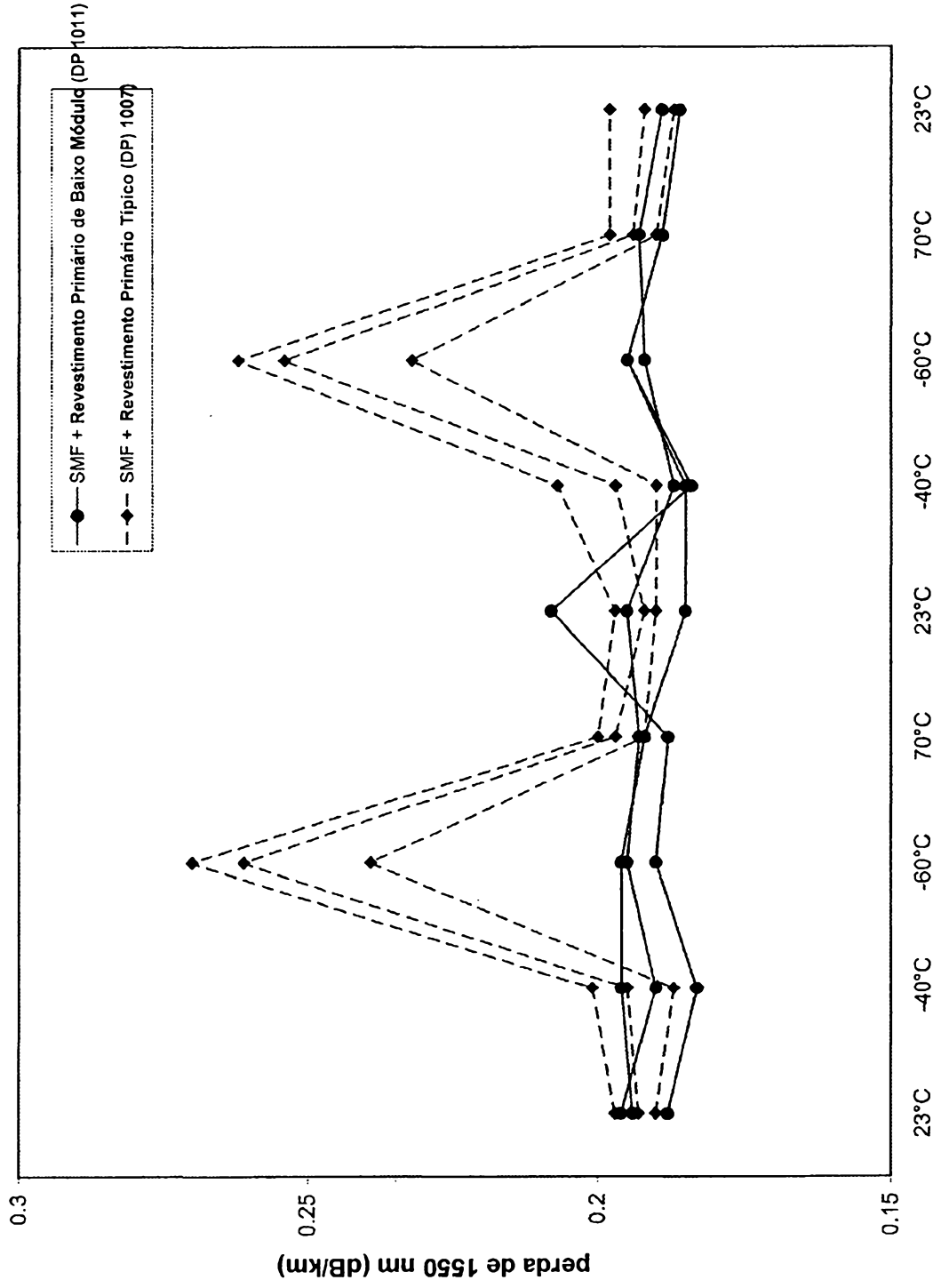


FIG. 6

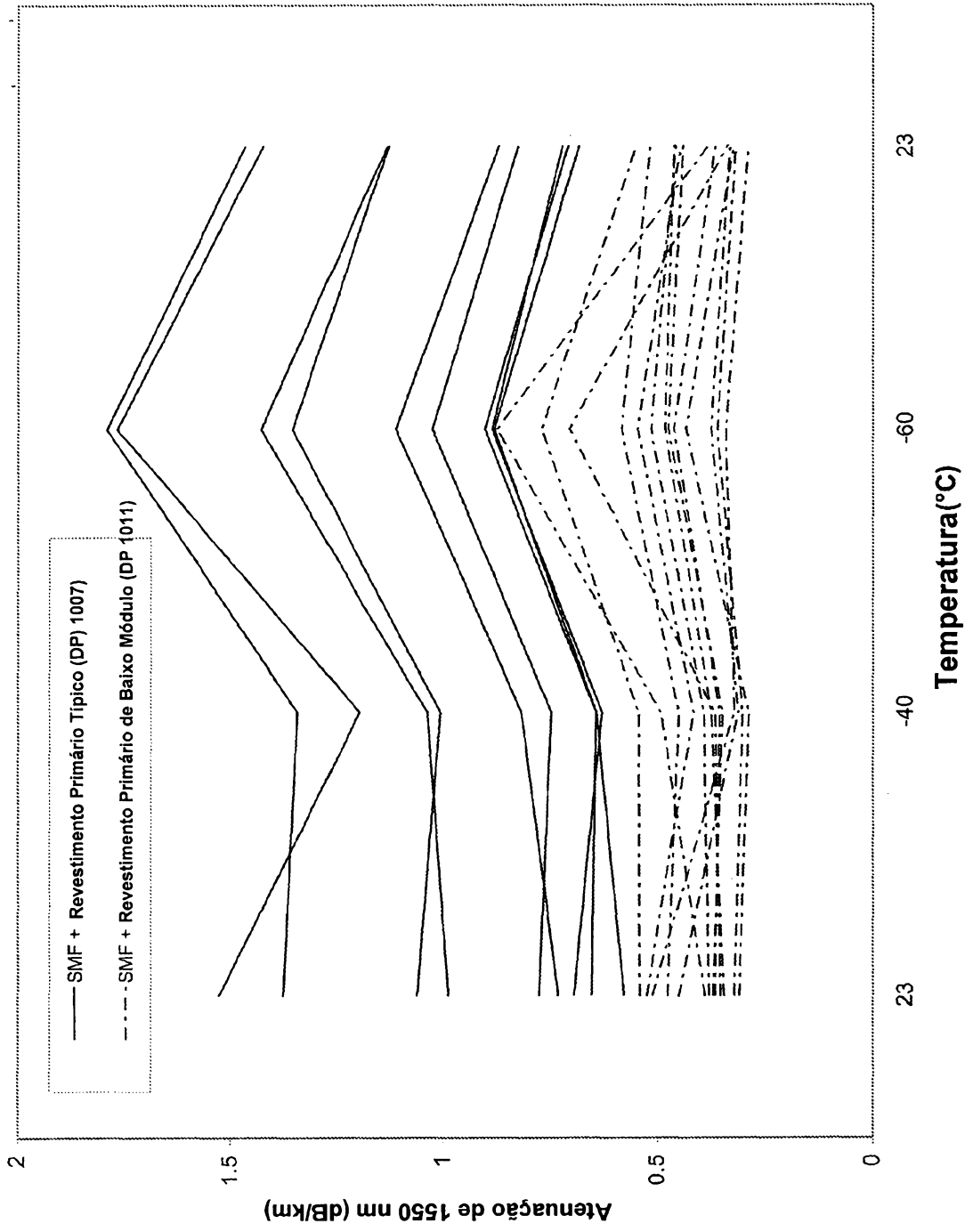


FIG. 7

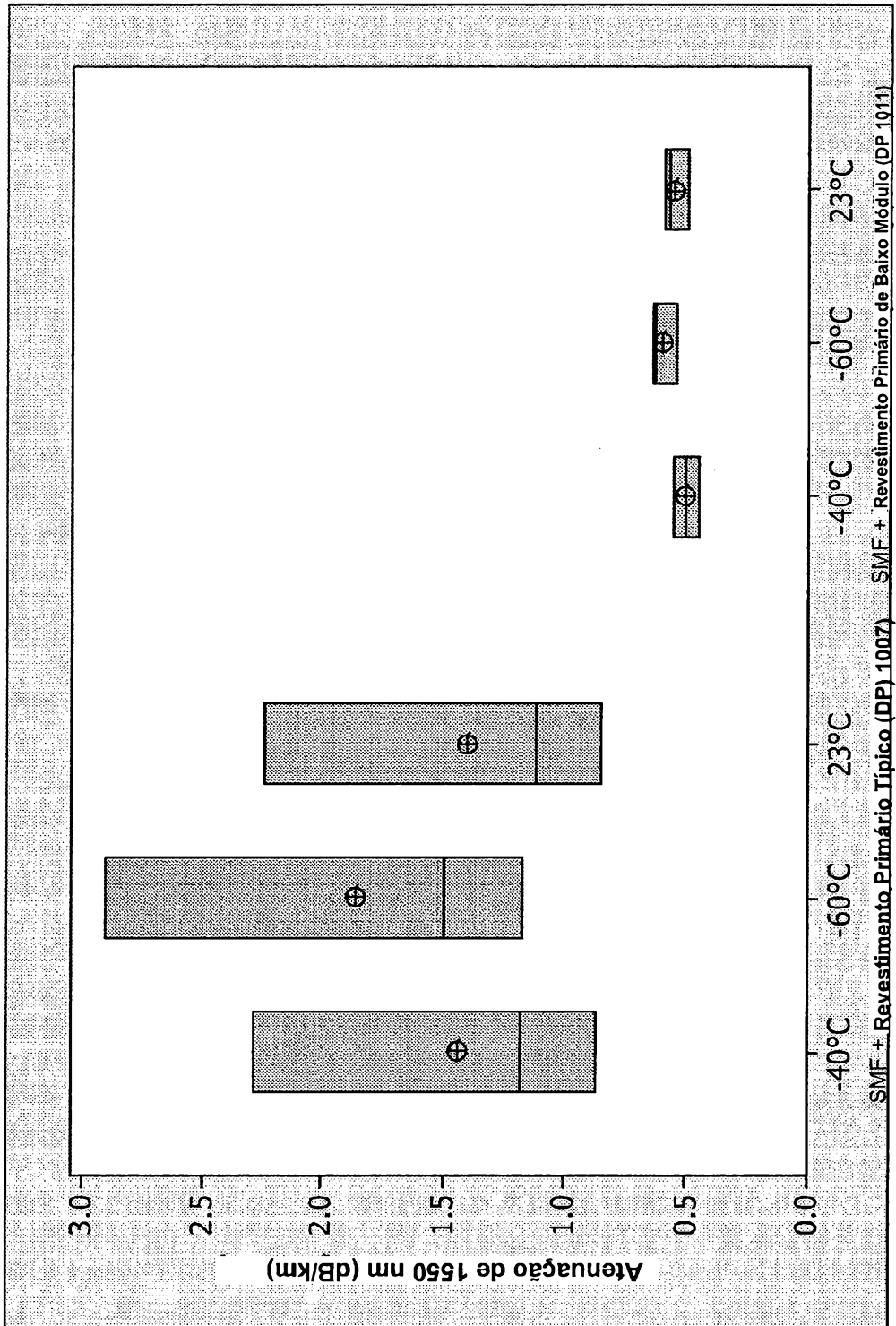


FIG. 8

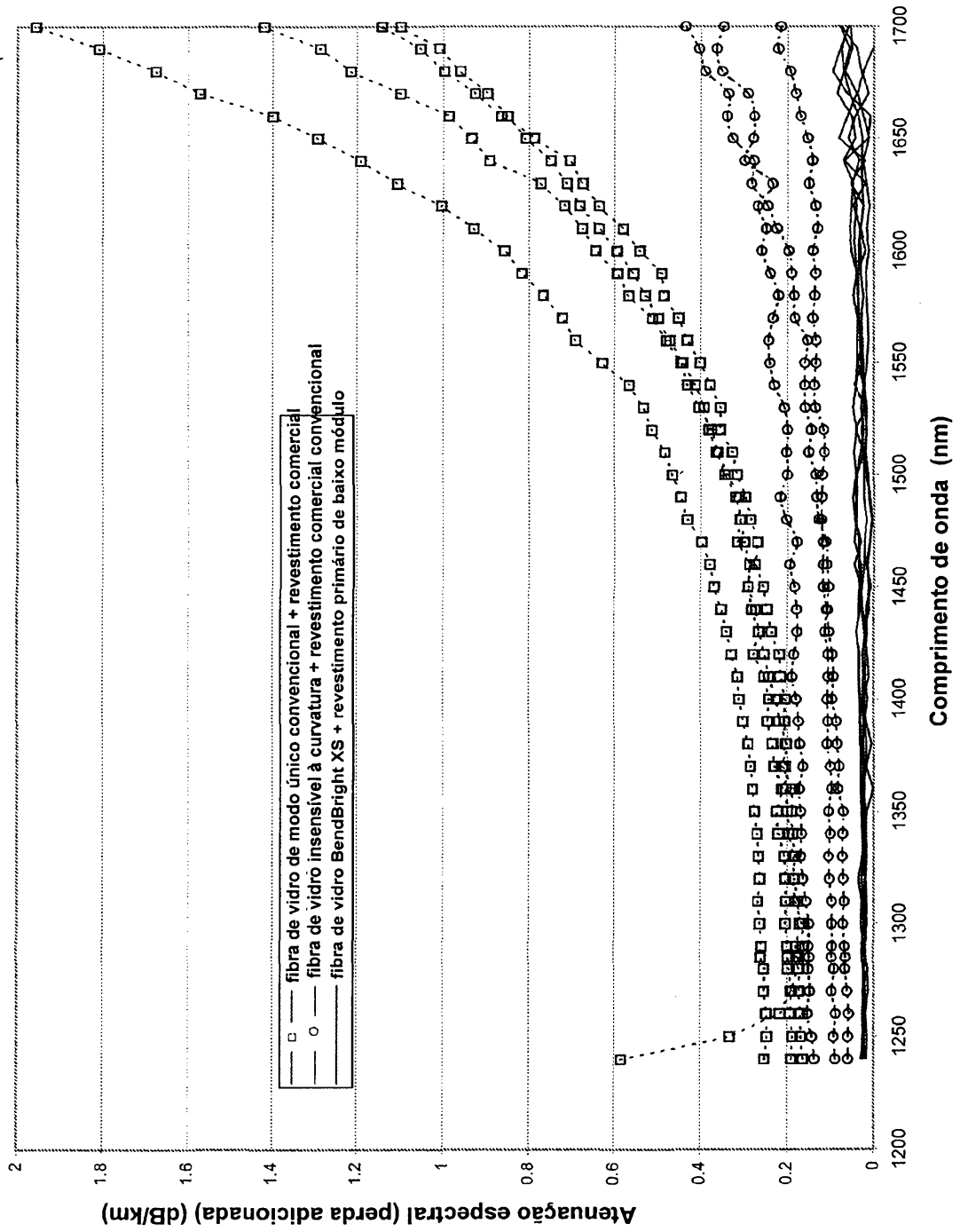


FIG. 9

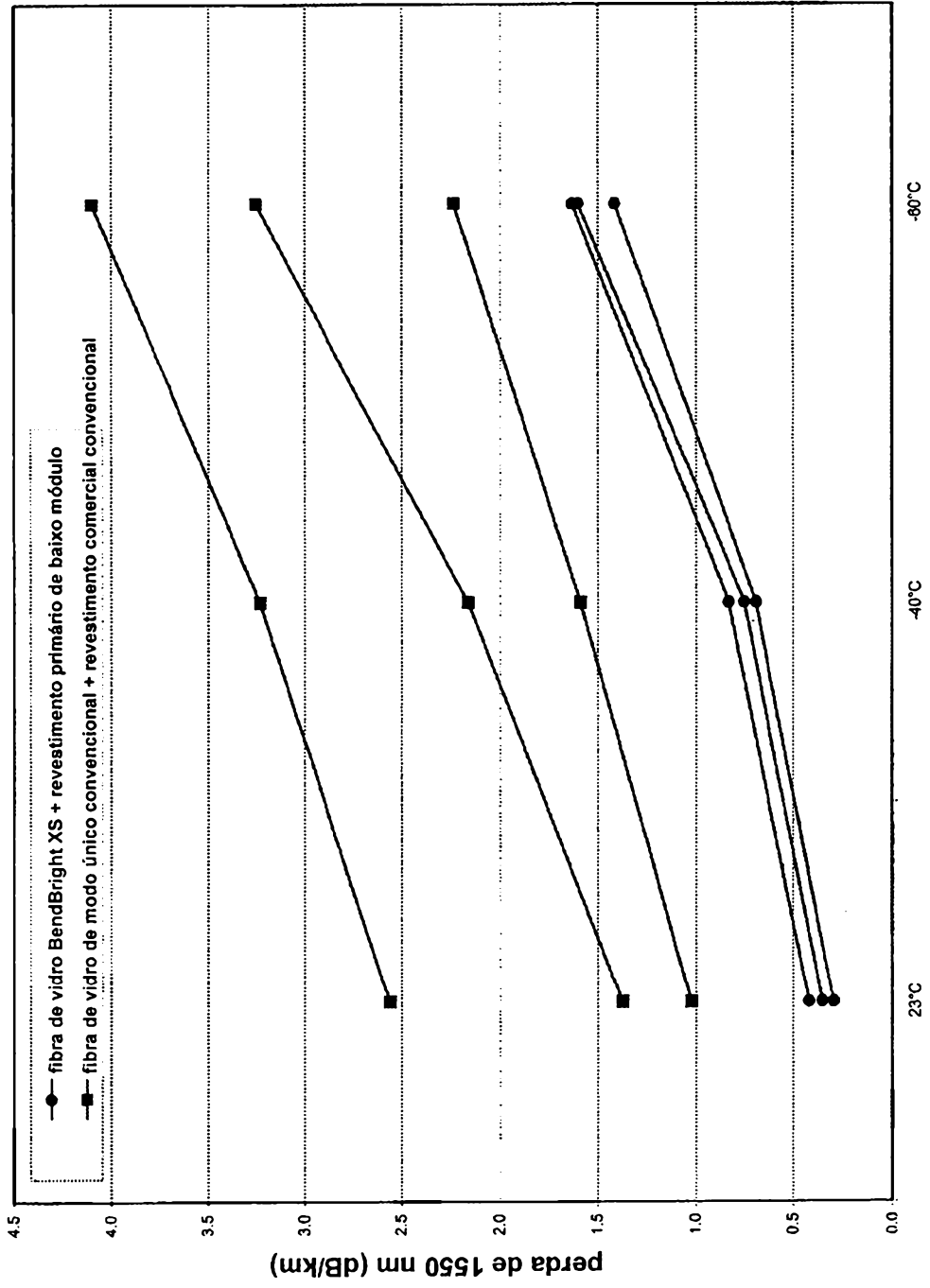


FIG. 10

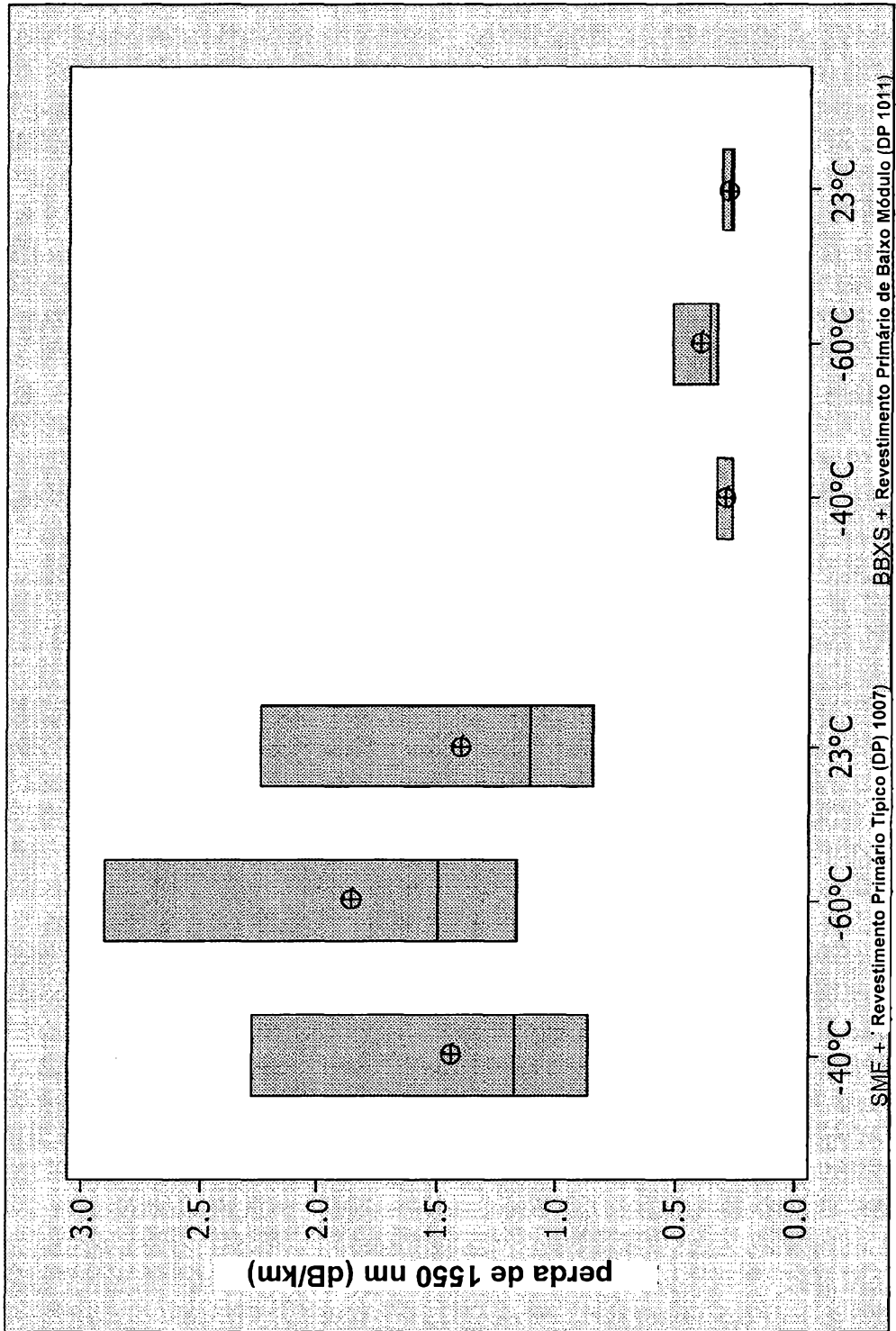


FIG. 11

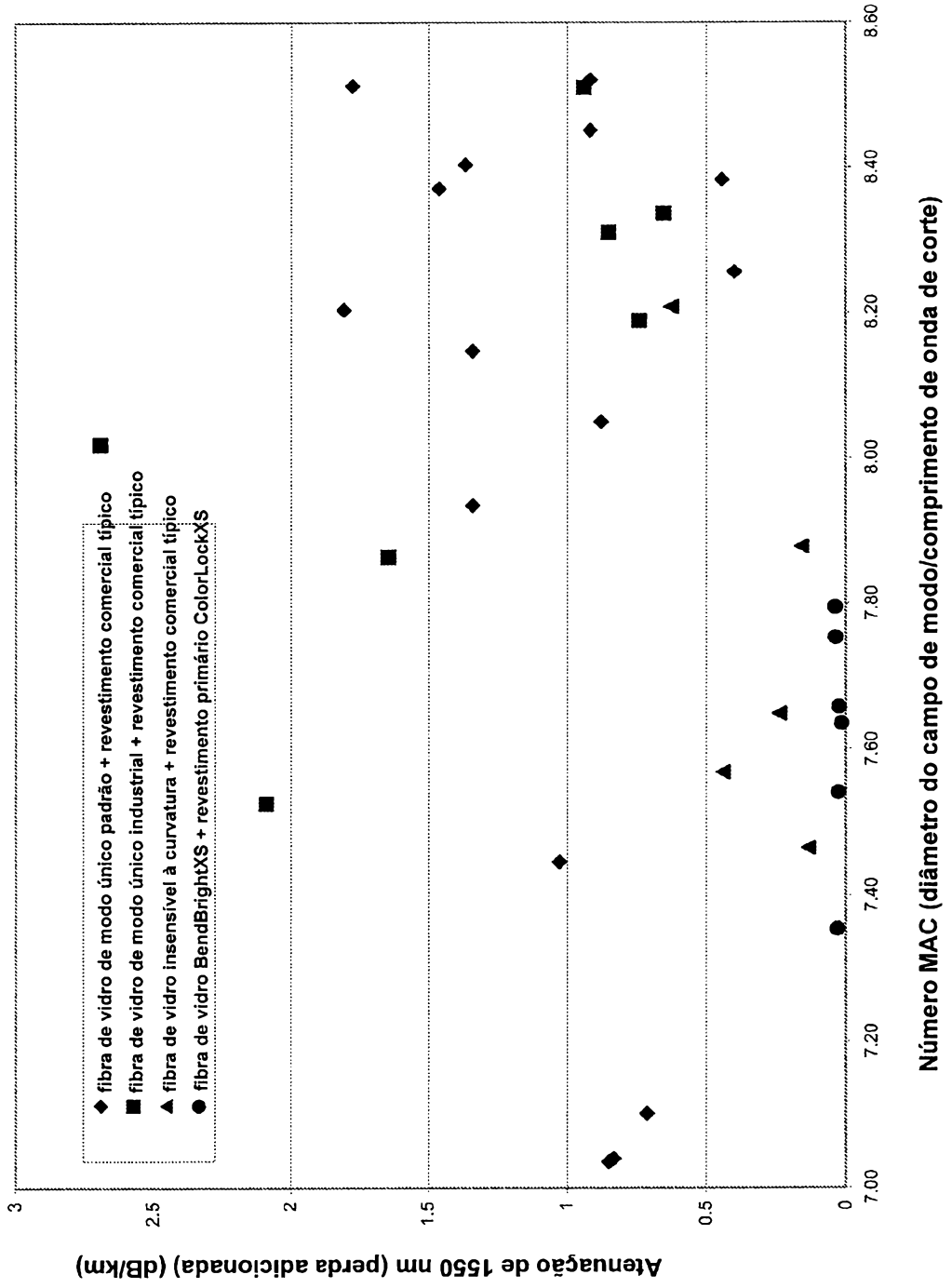


FIG. 12

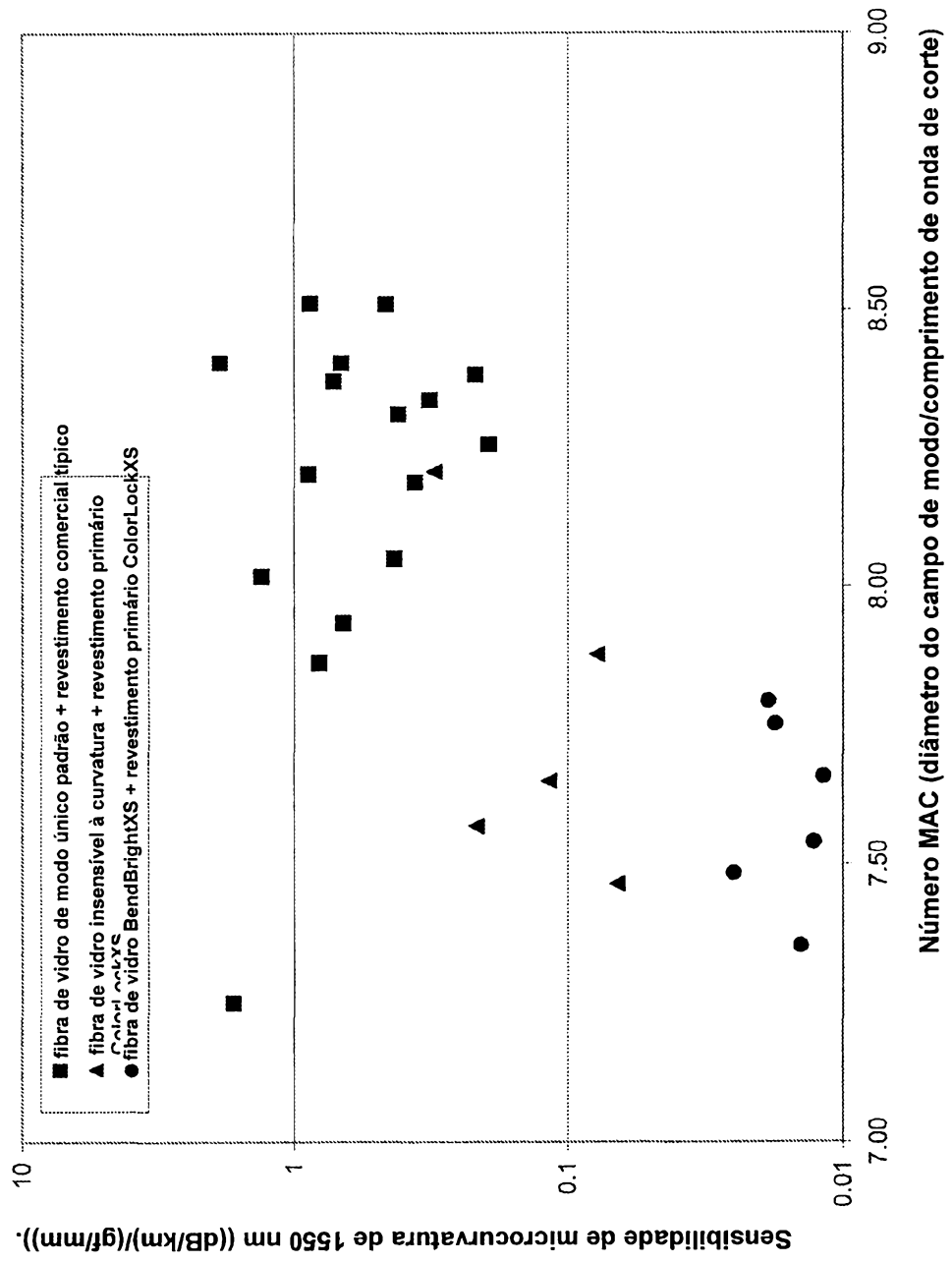


FIG. 13

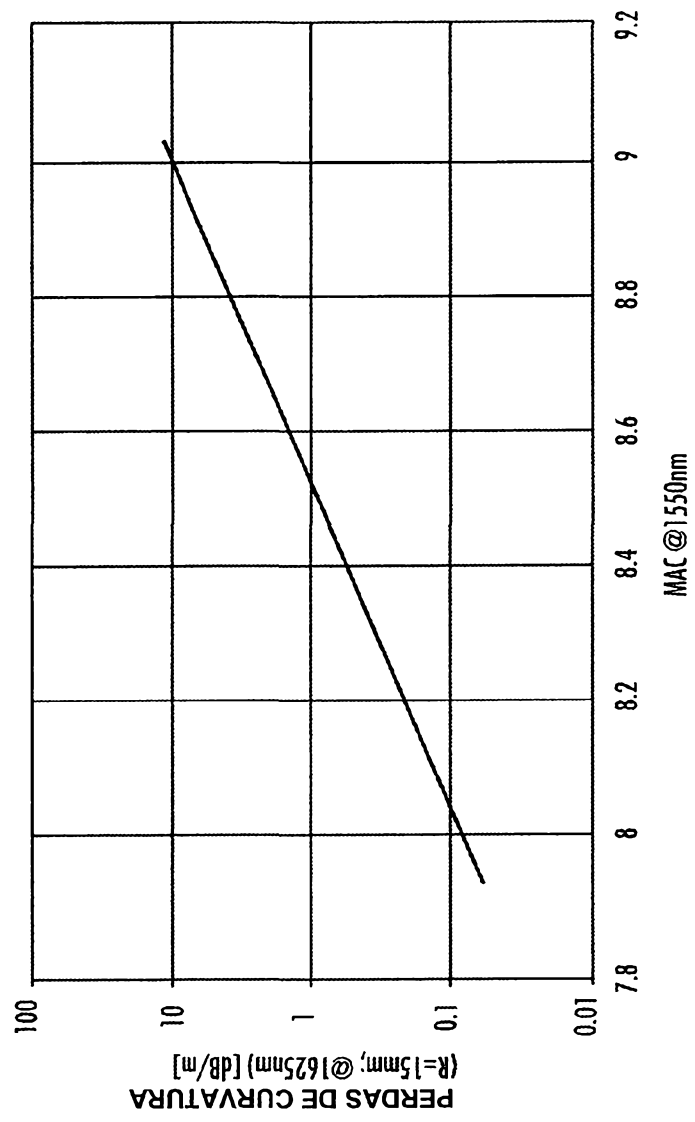


FIG. 14

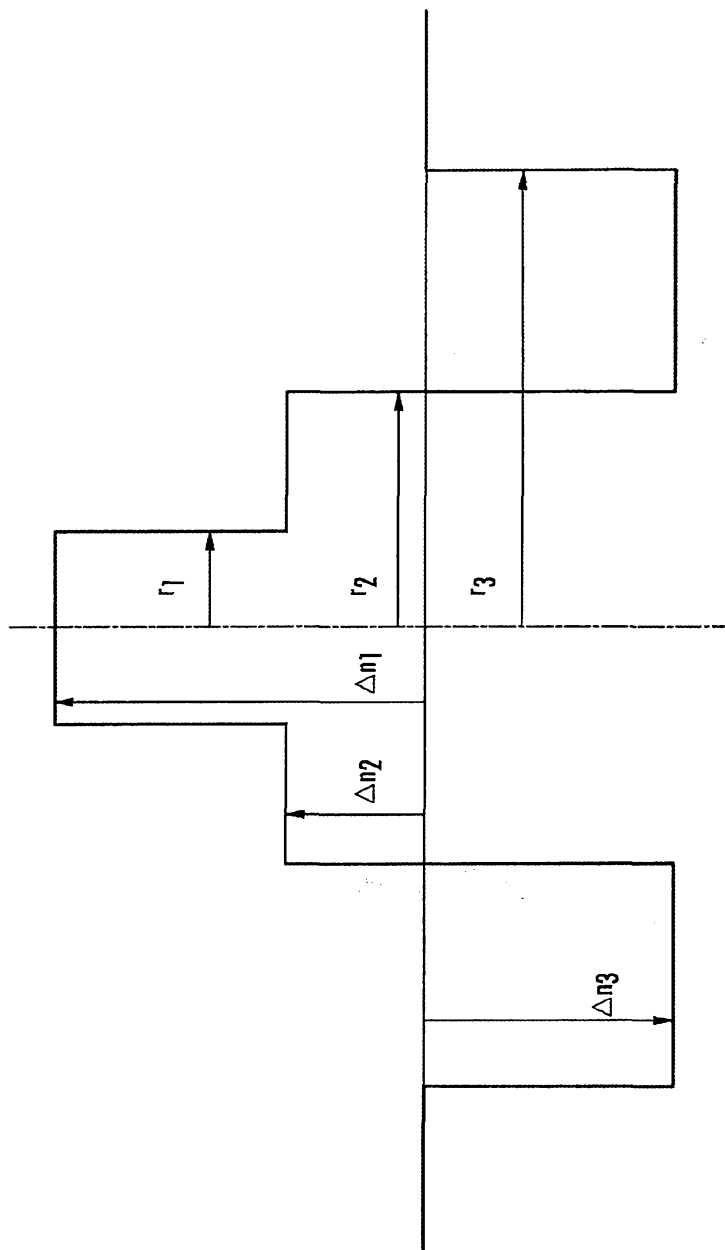


FIG. 15a

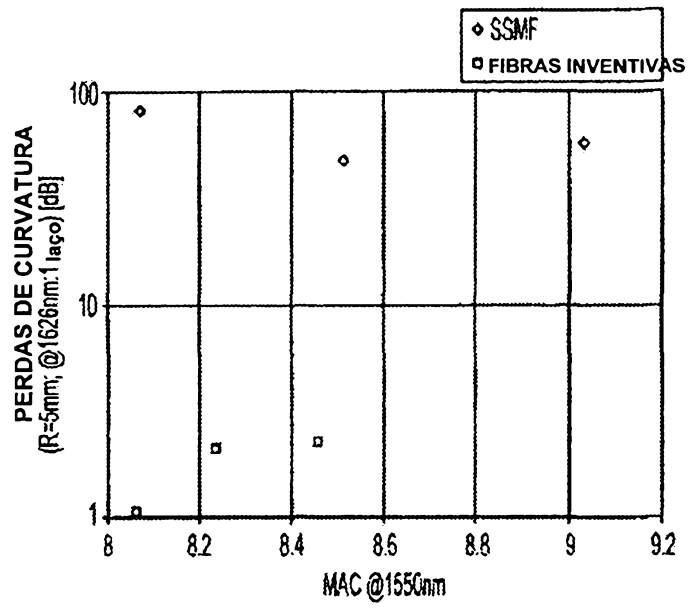


FIG. 15b

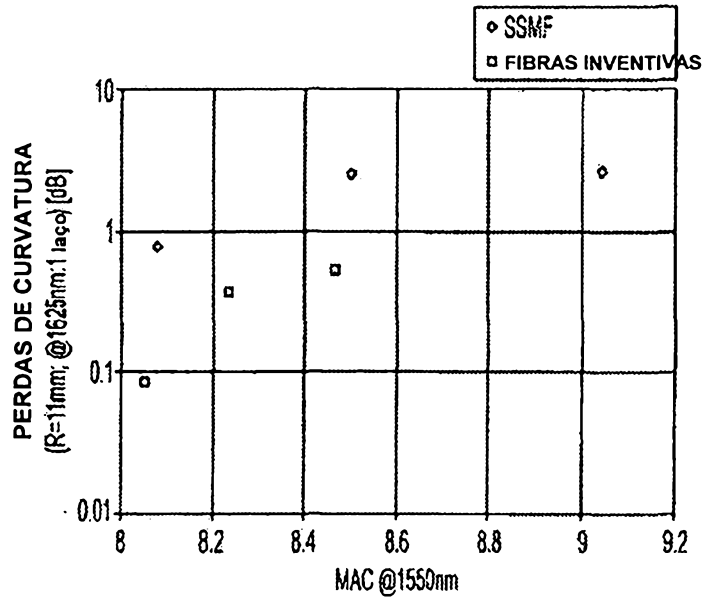


FIG. 15c

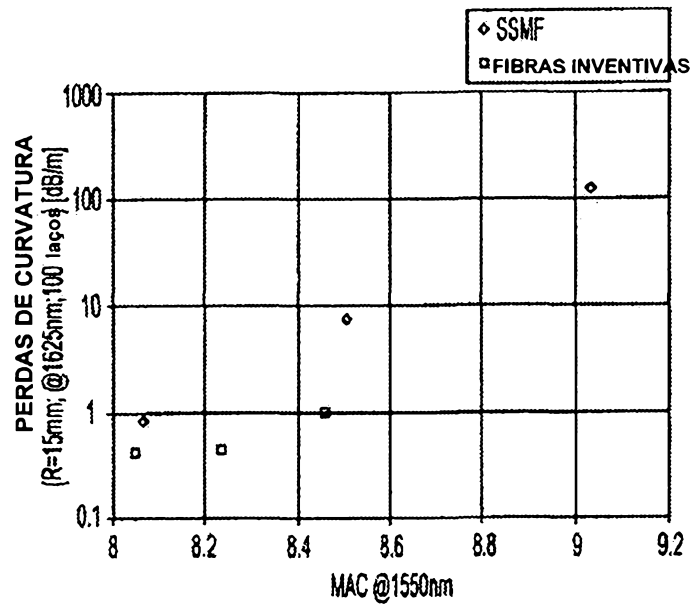


FIG. 16a

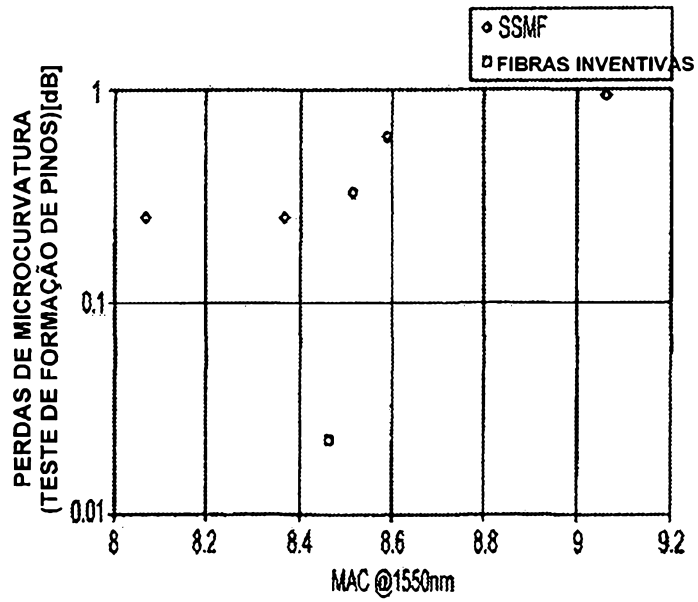


FIG. 16b

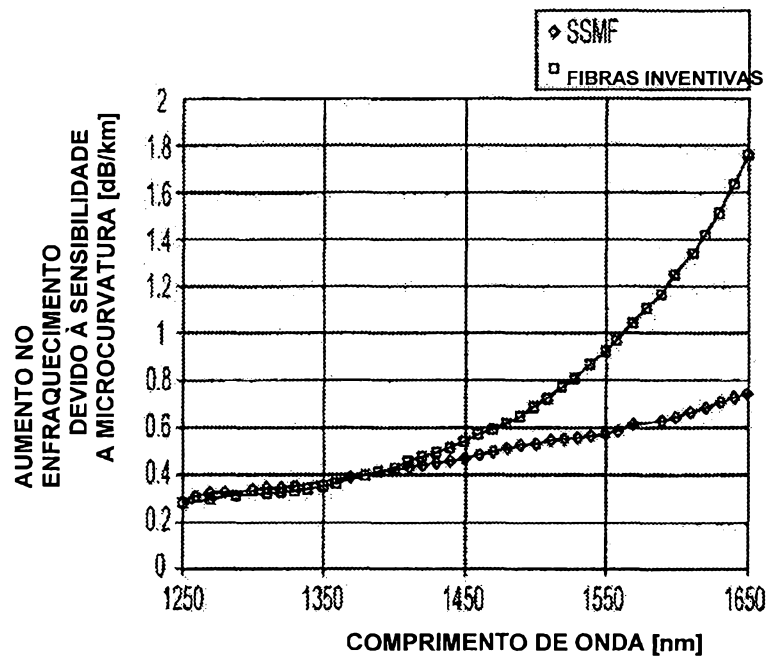
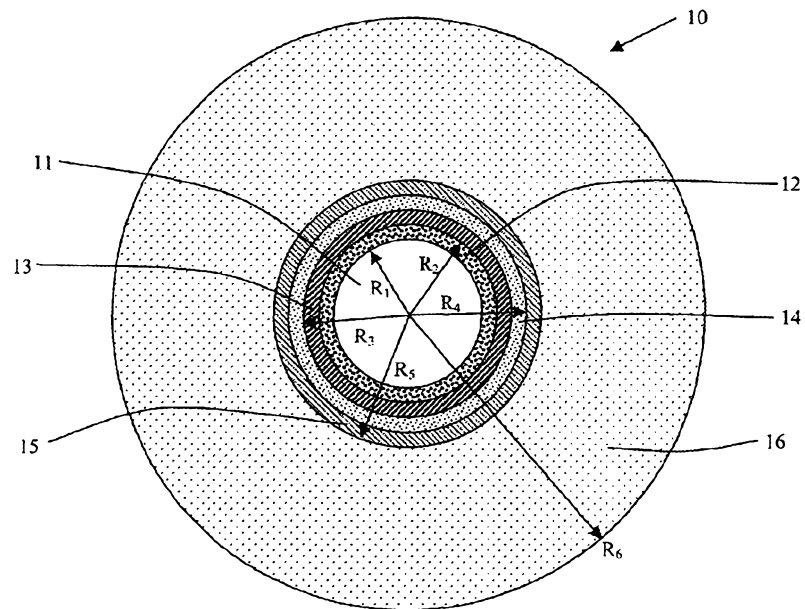


FIG. 17



**10 - fibra**

**11- núcleo central**

**12 – primeiro revestimento interno intermediário**

**13 – primeiro revestimento interno rebaixado**

**14 – segundo revestimento interno intermediário**

**15 – segundo revestimento interno rebaixado**

**16 – revestimento externo (índice refrativo  $n_g$ ).**

FIG. 18

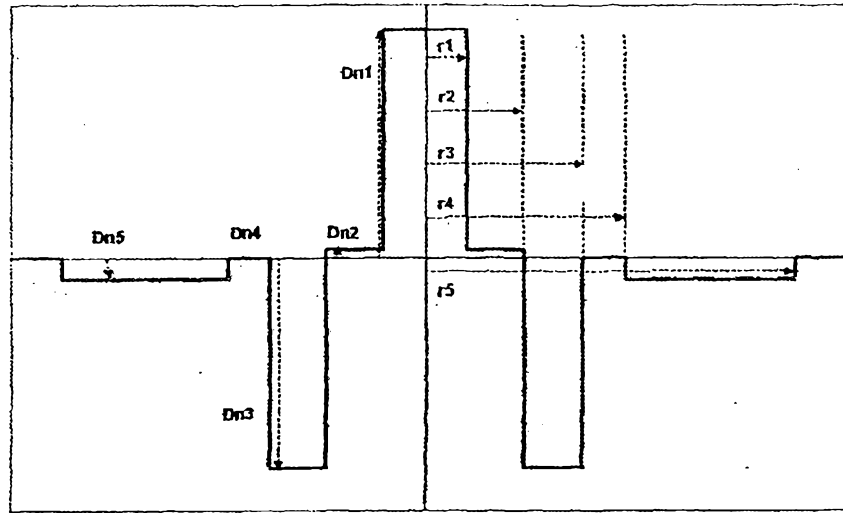


FIG. 19

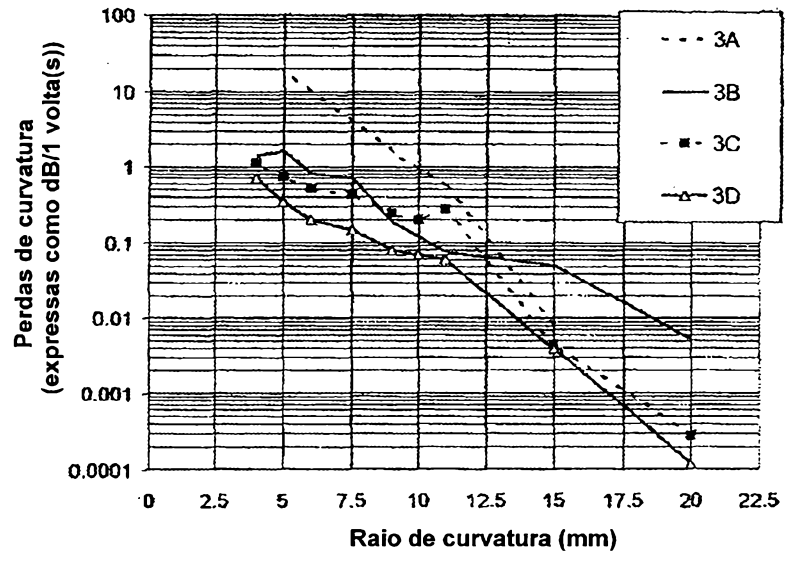


FIG. 20

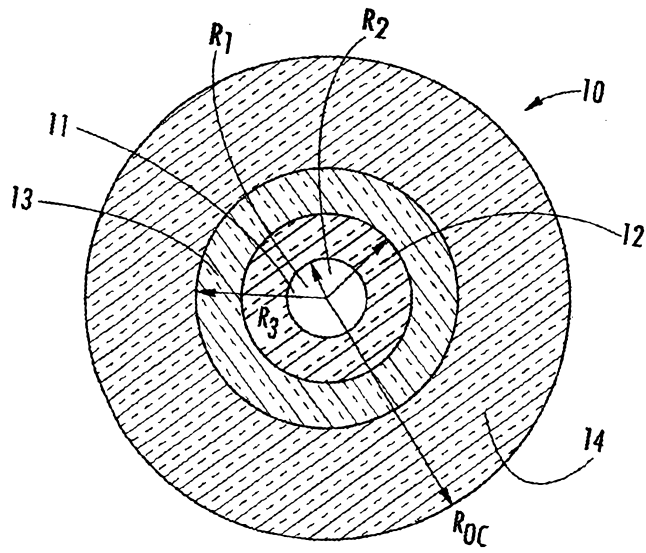


FIG. 21a

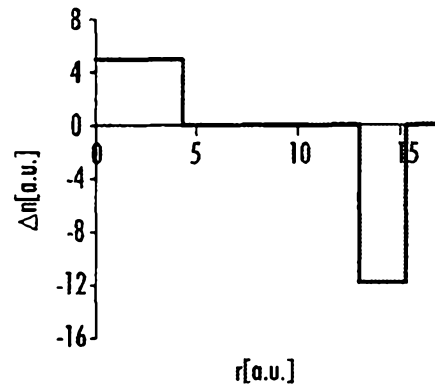


FIG. 21b

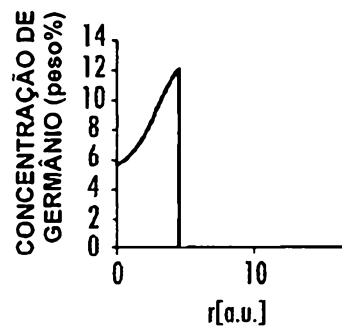


FIG. 21c

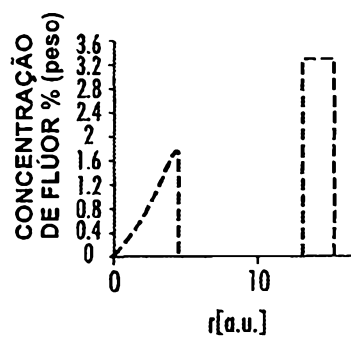


FIG. 22

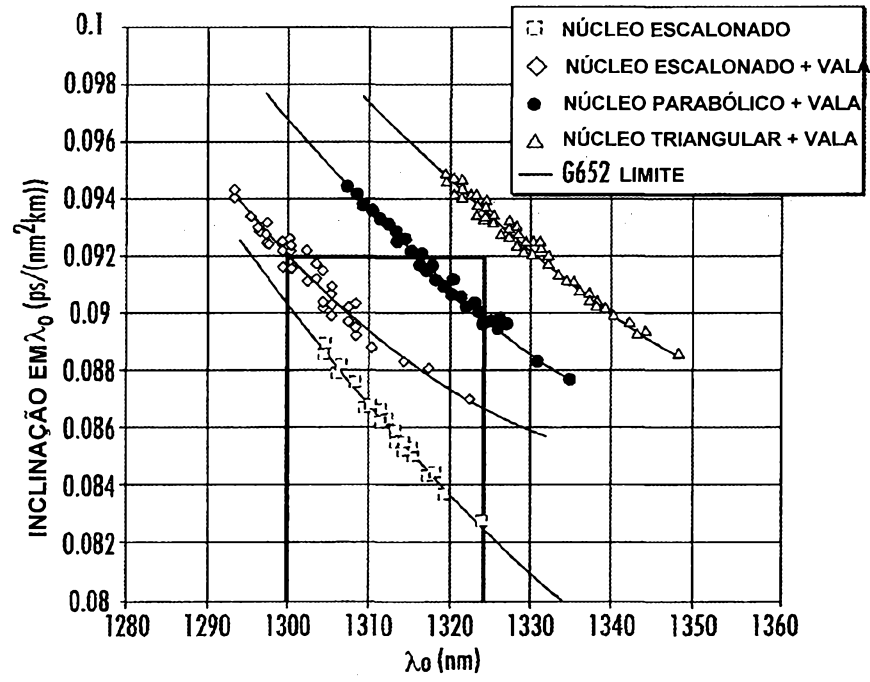
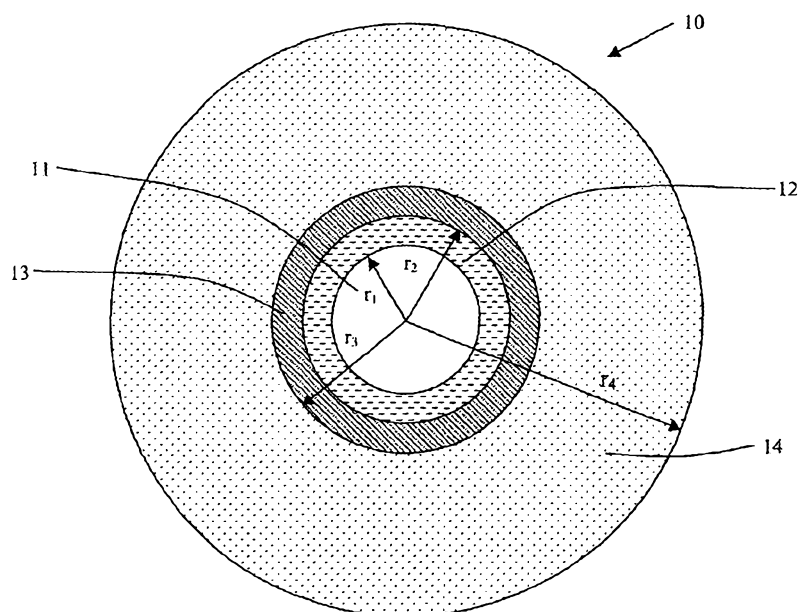


FIG. 23



10 - fibra

11- núcleo central

12 – revestimento intermediário

13 – revestimento rebaixado

14 – revestimento óptico externo (índice refrativo  $n_g$ ).

FIG. 24

