



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0715480-1 B1

(22) Data do Depósito: 25/07/2007

(45) Data de Concessão: 11/07/2017



(54) Título: LIGA À BASE DE NÍQUEL

(51) Int.Cl.: C22C 19/03

(30) Prioridade Unionista: 25/07/2006 US 11/492423

(73) Titular(es): GENERAL ELECTRIC TECHNOLOGY GMBH

(72) Inventor(es): CHARLES BIONDO; J. PAGE STROHL; JEFFERY W. SAMUELSON; GERHARD E. FUCHS; STANLEY T. WLODEK (FALECIDO)

"LIGA À BASE DE NÍQUEL".CAMPO DA INVENÇÃO

[001] A presente invenção diz respeito a turbinas a gás. Mais particularmente, modalidades da presente invenção dizem respeito a ligas à base de níquel para uso na fundição de componentes de turbinas a gás.

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

[002] Motores de turbina a gás são conhecidos por operar em ambientes extremos, expondo os componentes do motor, especialmente aqueles na seção da turbina, a altas temperaturas e tensões operacionais. A fim de que os componentes da turbina suportem essas condições, é necessário que eles sejam fabricados de um material com propriedades capazes de suportar exposição prolongada a tais elevadas temperaturas e tensões operacionais, recebendo ainda resfriamento adequado para reduzir suas temperaturas operacionais efetivas. Isto é especialmente válido para palheta de turbinas, ou pás, bem como bicos, ou aletas, que ficam diretamente na corrente do caminho de gás quente de uma seção de combustão.

[003] Em um esforço de melhorar a eficiência de um motor de turbina a gás, temperaturas operacionais podem ser aumentadas na seção de combustão de maneira a queimar mais completamente o combustível. Em decorrência disto, as temperaturas na seção da turbina são igualmente aumentadas. Para que os materiais de turbina operem a uma temperatura mais alta sem comprometer a integridade dos componentes, é exigido tanto resfriamento adicional dos componentes da turbina quanto maior capacidade do material. Entretanto, pelo redirecionamento do ar para resfriar os componentes da turbina, a quantidade de ar disponível para o processo de combustão é reduzida, reduzindo sua eficiência. Isto é contraprodutivo para a meta de melhorar a eficiência da turbina a gás elevando a temperatura operacional. Por-

tanto, é desejável prover as melhorias operacionais sem reduzir os níveis de fluxo de ar presentes e a eficiência do motor.

[004] Um resultado das maiores temperaturas de queima é a mudança estrutural adicional no material. Ou seja, à medida que as temperaturas operacionais aumentam para um dado material, sua capacidade de suportar cargas diminui. Como as temperaturas operacionais para motores de turbina a gás aumentaram com o tempo a fim de melhorar a eficiência do motor, inúmeros materiais foram introduzidos, com maior compatibilidade de temperatura. Um exemplo como este é uma liga normalmente referida como CM-247 produzida pela Cannon-Muskegon Corporation of Muskegon, Michigan. Uma forma desta liga está revelada na patente US 4.461.659. Esta liga é uma das muitas que foram desenvolvidas com maior resistência pela redução do trincamento no contorno de grão.

[005] Uma outra melhoria de liga para aplicações de turbina a gás foi desenvolvida pela General Electric Company. GTD-111, uma liga à base de níquel com maior resistência à corrosão a quente, foi desenvolvida para uso na produção de pás e aletas de turbina a gás. As propriedades desta liga estão reveladas nas patentes US 6.416.596 e 6.428.637.

[006] Ademais, além das ligas melhoradas, técnicas de fundição têm sido desenvolvidas para melhorar a resistência de palhetas e bocais e outros componentes de turbina a gás. Como é do entendimento dos versados na técnica de aerofólios de turbina a gás, a resistência de uma peça fundida vazada, e qualquer fraqueza inerente nela, são função do tamanho e localização dos contornos dos grãos da peça fundida. Especificamente, técnicas de fundição têm evoluído de um processo convencional, ou equiaxial, onde um metal é vazado e contornos de grãos são livres para se formarem à medida que a peça resfria, a um processo de fundição com solidificação direcional (DS) onde

o metal é vazado e resfriado de uma maneira a formar somente contornos de grãos em uma única direção, preferivelmente de forma que a direção cristalográfica $\langle 001 \rangle$ seja paralela à direção longitudinal do aerofólio. Pelo alinhamento dos contornos de grãos, tipicamente a porção mais fraca de uma peça fundida, em uma direção no geral perpendicular à carga no aerofólio, melhorias significativas na resistência mecânica, ductilidade e resistência à fadiga térmica da peça fundida são realizadas. Mais recentemente, melhorias têm sido feitas no processo de fundição de maneira a eliminar os contornos de grãos completamente pelo resfriamento das peças fundidas de uma maneira a formar uma estrutura de único cristal, ou grão, eliminando assim os contornos de grãos. Este tipo de fundição é o tipo mais resistente de peça fundida até hoje, entretanto, é a peça fundida mais cara de se fabricar, por causa das várias exigências de processamento e custos das ligas. Tipicamente, peças fundidas de um único cristal são limitadas a aplicações onde temperaturas extremamente altas são encontradas, existem cargas mecânicas excessivamente altas, ou a geometria da turbina dita uma peça fundida como estacionamento. Uma questão adicional com relação ao processo de fundição e liga utilizados diz respeito ao processamento exigido. Ou seja, dependendo da técnica de fundição e da liga envolvida, processos demorados e caros têm que ocorrer para formar o componente da turbina dessa liga particular.

[007] Embora melhorias significativas tenham sido feitas no desenvolvimento de liga, tecnologia de resfriamento e processos de fundição, existe ainda uma margem significativa para melhorias adicionais. Especificamente, existe uma necessidade da indústria de uma liga com pelo menos as capacidades das ligas da tecnologia de ponta, que tem ainda maior resistência à tração, melhor capacidade de fundição, menores tensões operacionais e menores custos de fabricação.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[008] A presente invenção fornece modalidades de uma liga à base de níquel adequada para a produção de componentes de turbina a gás com melhor estabilidade, propriedades mecânicas e menores tensões operacionais. Uma redução de tensão como esta é encontrada na tensão longitudinal, que é função da densidade da liga, que, para as ligas aqui reveladas, é menor que de outras ligas bem conhecidas usadas em aplicações de turbina a gás. Além disso, a liga à base de níquel é submetida a um processo de tratamento térmico sem o uso de programações de forno de alta temperatura excessivamente longas, tendo ao mesmo tempo uma maior janela na qual um tratamento térmico como esse pode ocorrer.

[009] Composições de ligas à base de níquel adequadas para múltiplas formas de fundição de precisão são reveladas. Esta inclui uma composição adequada para peças fundidas equiaxiais e para peças fundidas com solidificação direcional (DS). Em um aspecto adicional da presente invenção, um método de fabricar uma peça fundida e artigo tratado termicamente a partir da liga à base de níquel é provido, compreendendo a composição elementar, bem como o processo de tratamento térmico.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DO DESENHO

[0010] A presente invenção é descrita a seguir com referência às figuras do desenho anexo, em que:

[0011] A figura 1 é um gráfico que representa o limite de resistência máximo e limite de escoamento em função da temperatura para uma modalidade de liga da presente invenção, comparada com uma liga da tecnologia anterior.

[0012] A figura 2 é um gráfico que representa a tensão de ruptura em função do parâmetro de tempo e temperatura normalizados para uma modalidade de liga da presente invenção, comparada com ligas da tecnologia anterior.

[0013] A figura 3 é uma seção transversal de um motor de turbina a gás identificando o local onde palhetas e bocais de acordo com a presente invenção estão presentes.

[0014] A figura 4 é uma vista em perspectiva de uma palheta formada da superliga de acordo com uma modalidade da presente invenção.

[0015] A figura 5 é uma vista em perspectiva de uma palheta alternativa formada da superliga de acordo com uma modalidade da presente invenção.

[0016] A figura 6 é um gráfico que representa o limite de resistência máximo em função da temperatura para uma modalidade solidificada direcionalmente de uma liga da presente invenção, comparada com uma liga da tecnologia anterior.

[0017] A figura 7 é um gráfico que representa o limite de resistência máximo em função da temperatura para uma modalidade equiaxial de uma liga da presente invenção, comparada com ligas da tecnologia anterior.

[0018] A figura 8 é um gráfico que representa o limite de escoamento em função da temperatura para uma modalidade equiaxial de uma liga da presente invenção, comparada com ligas da tecnologia anteriores.

[0019] A figura 9 é um gráfico que representa o limite de escoamento em função da temperatura para uma modalidade solidificada direcionalmente de uma liga da presente invenção, comparada com uma liga da tecnologia anterior.

[0020] A figura 10 é um gráfico que representa alongamento do material em função da temperatura para uma modalidade solidificada direcionalmente de uma liga da presente invenção, comparada com uma liga da tecnologia anterior.

[0021] A figura 11 é um gráfico que representa alongamento do

material em função da temperatura para uma modalidade equiaxial de uma liga da presente invenção, comparada com ligas da tecnologia anterior.

[0022] A figura 12 é um gráfico que representa a vida sem ruptura sob fluência de uma pá fabricada da modalidade equiaxial de uma liga da presente invenção, comparada com uma liga da tecnologia anterior.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[0023] A matéria em questão da presente invenção está descrita com especificidade aqui para atender exigências estatutárias. Entretanto, a descrição em si não é para limitar o escopo desta patente. Em vez disso, os inventores contemplaram que a matéria em questão reivindicada pode também ser concebida de outras maneiras, de forma a incluir diferentes etapas ou combinações de etapas similares às descritas neste documento, em conjunto com outras tecnologias atuais e futuras. Além disso, embora os termos "etapa" e/ou "bloco" possam ser aqui usados para conotar diferentes elementos de métodos empregados, os termos não devem ser interpretados implicando nenhuma ordem particular entre duas ou mais das várias etapas aqui reveladas, a menos e exceto quando a ordem de etapas individuais for explicitamente descrita.

[0024] A presente invenção fornece uma liga à base de níquel adequada para a produção de componentes de turbina a gás e método de produzir uma peça fundida e liga à base de níquel tratada termicamente. Uma modalidade exemplar da presente invenção é descrita a seguir.

[0025] Com propósitos de clareza, é melhor identificar parte da terminologia comum que será discutida com mais detalhes com relação a modalidades da presente invenção. Um "motor de turbina a gás", como o termo é aqui utilizado, é um motor que fornece saída mecânica

na forma tanto de empuxo para propelir um veículo quando potência do eixo para acionar um gerador elétrico. Motores de turbina a gás tipicamente compreendem um compressor, pelo menos um combustor, e uma turbina. Uma "pá", na forma que o termo é aqui utilizado, é um aerofólio anexado a um disco que gira em torno de um eixo do motor de turbina a gás. Pás são usadas tanto para comprimir o fluxo de ar que passa através de um compressor quanto para girar o disco, e o eixo de uma turbina, por meio do ar que passa ao longo da superfície do aerofólio. O termo "pá" é geralmente usado indiferentemente com "palheta", e isto é feito aqui, e não é para limitar a natureza do termo. Uma "aleta", na forma que o termo é aqui utilizado, é um aerofólio que é tipicamente encontrado tanto em seções de compressor quanto de turbina, e serve para redirecionar o fluxo de ar que passa por um compressor ou turbina. O termo "aleta" é geralmente usado indiferentemente com "bico", e assim é feito aqui, e não é para limitar a natureza do termo. Esses tipos de planos aerodinâmicos são geralmente fundidos a partir de um metal líquido. Metal pode ser vazado e resfriado em uma variedade de meios, incluindo para formar peças fundidas equiaxiais (EQ) e solidificadas direcionalmente (DS). Em uma peça fundida equiaxial, como versados na técnica podem entender, a peça fundida é resfriada naturalmente de maneira tal que os contornos de grãos do metal solidificado fiquem livres para se formarem em qualquer direção. Em uma peça fundida DS, o metal é resfriado em uma direção de maneira a formar um conjunto de contornos de grãos que se estendem em uma direção específica.

[0026] Uma liga com excelentes propriedades de fundição, menor densidade e melhor estabilidade foi desenvolvida pelos inventores. A liga tem uma faixa de composições químicas aceitável dependendo do tipo de processo de fundição a ser utilizado, cada um das quais resulta em melhores propriedades mecânicas. Isto tem sido conseguido com

composições químicas que são isentas de elementos caros, tal como rênio (aproximadamente \$1.778/kg) ou elementos muito reativos tais com zircônio e háfnio.

[0027] A liga à base de níquel da presente invenção, na forma originalmente concebida pelos inventores, consiste essencialmente de forma aproximada na composição em peso apresentada na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Composição da liga

Elemento	Porcentagem em peso
Alumínio	3,20 – 3,80
Titânio	4,00 – 5,30
Tântalo	2,20 – 2,70
Cromo	11,90 – 12,30
Cobalto	11,80 – 12,50
Ferro	0,0 – 0,20
Cobre	0,0 – 0,10
Tungstênio	3,0 – 3,7
Molibdênio	1,80 – 2,00
Carbono	0,03 – 0,10
Boro	0,001 – 0,007
Zircônio	0,001 – 0,005
Háfnio	0,001 – 0,005
Enxofre	0,0 – 0,003
Nitrogênio	0,001 – 0,007
Oxigênio	0,003 – 0,010
Níquel	restante

[0028] O desenvolvimento desta liga focalizou na identificação de uma liga à base de níquel efetiva sem adições de liga caras ou demasiadamente reativas, de maneira tal que a liga pudesse ser adequada para fundição de componentes direcionalmente solidificados, bem como equiaxiais. Inicialmente, foram produzidas sete composições qui-

micas em placas lingotadas solidificadas direcionalmente.

[0029] Uma área abordada durante o desenvolvimento da liga que é importante com relação à funcionalidade da liga foi sua estabilidade estrutural. Ligas passam por reações de fase sólida complexas durante o serviço que podem levar à precipitação de fases fragilizantes. O controle da composição química da liga de maneira a impedir a formação dessas fases de empacotamento topologicamente denso (TCP) podem ser atingidas com um certo sucesso calculando-se as lacunas eletrônicas por átomo de liga, um valor denominado N_{v3} . A estabilidade estrutural de uma liga é em geral calculada de acordo com a equação

$$N_{v3} = \sum_{i=1}^n m_i (N_{v3i})$$

[0030] pela SAE AS 5491 Rev. B. Quanto maior N_{v3} , tanto menos estável é a liga e mais suscetível é a estruturas TCP. Estudos anteriores mostraram que, mesmo para as ligas mais estáveis deste tipo, fases TCP podem se formar se $N_{v3} > 2,45$ a $2,49$. Algumas ligas comerciais tais como Rene 80 e Inconel 738 tornam-se instáveis se $N_{v3} > 2,32$ a $2,38$.

[0031] Para as sete composições químicas previamente mencionadas, os dados de estabilidade estão listados a seguir na tabela 2. Conforme será mostrado, dependendo da forma da peça fundida, o fato de estabilidade metalúrgica, ou estabilidade estrutural, da liga varia de $2,22 - 2,40$.

Tabela 2 – Estabilidade da Primeira Rodada de Ligas

Liga	Quantidade de fases TCP presentes depois de 1000 horas a 760°C	Quantidade de fases TCP presentes depois de 1000 horas a 871°C	Nv
1	Nenhuma	muito limitada	2,19
2	Nenhuma	nenhuma	2,31
3	muito limitada	limitada	2,38
4	Nenhuma	nenhuma	2,16

Liga	Quantidade de fases TCP presentes depois de 1000 horas a 760°C	Quantidade de fases TCP presentes depois de 1000 horas a 871°C	Nv
5	muito limitada	muito limitada	2,26
6	Nenhuma	nenhuma	2,17
7	Nenhuma	limitada	2,28

[0032] Embora as ligas 5 e 6 não excederam o valor N_{v3} de 2,32, onde sabe-se que formam-se fases TCP, uma revisão detalhada dos corpos de prova revelou ligeiras instabilidades. A liga 2 com um valor N_{v3} de 2,31 apresentou os melhores resultados com relação à estabilidade estrutural, ainda sem mostrar indicações de fases TCP.

[0033] A fim de melhorar as propriedades mecânicas da liga à base de níquel, é necessário tratar termicamente a liga. Para tratar termicamente uma liga endurecida por precipitação tal como uma liga à base de níquel da presente invenção, deve-se primeiramente aquecer a liga a uma temperatura próxima da temperatura solvus γ' , a temperatura acima da qual a principal fase γ' de endurecimento se dissolve. Isto é normalmente referido como um tratamento térmico de solubilização. Exposição subsequente a uma menor temperatura de envelhecimento fará com que a fase γ' de endurecimento se precipite de uma maneira que aumenta as propriedades mecânicas. A resistência da liga aumenta com a quantidade de γ' . Sua distribuição e parâmetros cristalinos são também fatores que afetam o grau de resistência que pode ser conferido por meio de precipitação de γ' .

[0034] A janela de tratamento térmico, a diferença entre a temperatura solvus e solidus (temperatura onde começa a fusão) é bastante aumentada na presente invenção. É esta janela na qual o tratamento térmico de solubilização tem que ser realizado a fim de tratar seguramente a parte sem que ela se funda. Mudanças relativamente pequenas nas quantidades de alumínio, titânio e tântalo podem causar mudanças bem grandes na temperatura solvus γ' . Se a liga contiver maiores níveis de alumínio, titânio ou tântalo, então a temperatura solvus γ'

aumenta, diminuindo assim a janela de tratamento térmico. A fim de determinar as temperaturas solvus e solidus γ' , foram realizadas análises térmicas diferenciais (DTA). Como versados na técnica de engenharia de materiais entendem, uma DTA mede a diferença na temperatura entre uma amostra e uma referência termicamente inerte à medida que a temperatura aumenta. O gráfico deste diferencial fornece informação a respeito de reações que ocorrem na amostra, incluindo transições de fase, pontos de fusão e cristalização. Alguns resultados típicos dessas análises estão mostrados a seguir na tabela 3.

Tabela 3 – Características de Tratamento Térmico

Liga	solvus γ' °C	Solidus °C	Janela de tratamento térmico °C	Liquidus °C
2	1,199	1,284	85	1,350
3	1,198	1,277	70	1,342
7	1,200	1,275	75	1,342

[0035] Conforme pode-se ver pelos dados apresentados, a janela de tratamento térmico da liga 2, a mais estruturalmente estável das ligas, também teve uma grande janela de tratamento térmico, aproximadamente 83°C. Dependendo da composição da liga, a janela de tratamento térmico pode variar de 67-89°C. Uma grande janela como esta indica que a liga pode ser tratada termicamente com segurança em condições de produção, sem que haja possibilidade de fusão. Isto é especialmente crítico em virtude de, muitas vezes, o tratamento térmico de partes grandes em grandes lotes não poder ser feito com um controle de temperatura muito preciso, muitas vezes variando em até $\pm 14^\circ\text{C}$.

[0036] Um outro benefício do tratamento térmico da liga da presente invenção é com relação às suas propriedades de tração e ruptura por fluência. Foi determinado que nenhum benefício apreciável é conseguido pelo tratamento térmico de solubilização da liga da presente invenção a temperaturas mais altas, ou submetendo-a a tratamen-

tos de envelhecimento mais complexos, como é o caso para outras ligas à base de níquel de altas temperaturas. As ligas desenvolvidas pela presente invenção foram tratadas termicamente por solubilização a $1121^{\circ}\text{C} \pm 14^{\circ}\text{C}$ por 2 horas \pm 15 minutos, seguido por uma têmpera com resfriamento por gás abaixo de 593°C . A têmpera preferivelmente ocorre em um ambiente de gás selecionado do grupo que compreende argônio, hélio e hidrogênio. As ligas tiveram então a temperatura elevada para $1079^{\circ}\text{C} \pm 14^{\circ}\text{C}$ e envelhecidas por 4 horas \pm 15 minutos seguido por um resfriamento por têmpera a gás de volta abaixo de 593°C . Finalmente, a liga teve a temperatura elevada para $843^{\circ}\text{C} \pm 14^{\circ}\text{C}$ e estabilizada por 24 horas \pm 30 minutos seguida por um resfriamento abaixo de 593°C porém mais provavelmente à temperatura ambiente. Este ciclo de tratamento térmico ocorre a uma temperatura relativamente baixa e envolve menos ciclos, comparado como aqueles de outras ligas bem conhecidas, tornando assim este ciclo um ciclo de tratamento térmico muito econômico. Isto é mais bem entendido comparando-se os ciclos de tratamento térmico aqui revelados com aqueles de outras ligas similares mostradas na tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Exigências de Tratamento Térmico de Algumas Ligas Comerciais

Liga	Presente invenção	GTD 404	CM 247 LC
Patente aplicável		US 6.908.518	US 4.461.659
Tratamento térmico	2 horas, 1121°C + 4 horas 1079°C + 24 horas 816°C	aquecer a 760°C por 10 minutos + aquecer a 1.218°C mantendo por 8 horas + aquecer a 1221°C mantendo por 4 horas + aquecer a 1249°C mantendo por 2 horas. As baixas velocidades de aquecimento e resfriamento esti-	2 horas a 1232°C + 2 horas a 1260°C + 5 horas a 1190°C + 20 horas 871°C

		puladas aumentam ainda mais o tempo de forno	
--	--	--	--

[0037] Dependendo do tipo de componente de turbina a gás que está sendo fundido, o sincronismo dos ciclos de tratamento térmico pode variar. Por exemplo, se uma pá ou aleta de turbina a gás tiver que ser revestida com um revestimento de barreira térmica (TBC) para proteção adicional de altas temperaturas operacionais, então a segunda e terceira etapas no processo de tratamento térmico podem ocorrer depois que o TBC tiver sido aplicado. A etapa de elevar a temperatura da liga para $1079^{\circ}\text{C} \pm 14^{\circ}\text{C}$ e manter por 4 horas também serve para tratar o revestimento como parte do processo de revestimento.

[0038] Um outro recurso importante da presente invenção é sua densidade. Conforme versados na técnica de aerofólios de turbinas a gás entendem, a tensão longitudinal em um aerofólio é proporcional à densidade ao quadrado, ou [tensão $\sigma \propto (\text{densidade } \rho)^2$]. Ou seja, quanto menor a densidade da liga usada para produzir o aerofólio, tanto menores as tensões longitudinais apresentadas pelo aerofólio.

[0039] Densidades específicas para a liga 2 foram ambas calculadas e medidas a partir dos revestimentos das amostras. Para calcular mais precisamente a densidade nesta faixa de composição química particular, foi desenvolvida uma equação. Esta equação não é sensível aos níveis de cobalto e cromo, e é definida como:

$$D = 0,307667639 + (\% \text{ Mo})(0,000452137) + (\% \text{ W})(0,001737591) - (\% \text{ Al})(0,004497133) - (\% \text{ Ti})(0,001240936) + (\% \text{ Ta})(0,002133375)$$

com % Mo sendo igual à porcentagem em peso de molibdênio, % W sendo igual à porcentagem em peso de tungstênio, % Al sendo igual à porcentagem em peso de alumínio, % Ti sendo igual à porcentagem em peso de titânio e % Ta sendo igual à porcentagem em peso de tântalo.

[0040] O grau de ajuste da equação é excelente, conforme pode-se ver pela comparação das densidades medidas da peça fundida de amostra com as densidades calculadas mostradas na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Densidade de Ligas Experimentais

	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Densidade medida g/cm ³	Densidade calculada g/cm ³
Liga 2	12	12	1,9	5	3,82	3,5	3	8,38	8,36
Liga 3	12	10	2,5	5,45	3,72	3,5	4	8,46	8,51
Liga 7	12	12,1	1,5	3,8	3,06	4,95	2,9	8,34	8,34
Liga 1	12,5	9	1,9	3,9	3,6	3,5	2,9	8,32	8,33
Liga 2 *	11,9	12	1,9	4,8	3,5	3,5	2,9	8,38	8,39
Liga 4 *	10,1	11,9	2,5	5,3	3,1	4,1	3,4	8,47	8,48
Liga 5 *	12,1	9,5	3	4,4	2,8	4,6	3,4	8,47	8,46
Liga 6 *	10,9	11,9	2,5	4,4	3,4	3,6	3,4	8,42	8,41
Liga 2A	12,1	12	1,5	3,3	3,6	4,6	2,5	8,24	8,24
Liga 2B	12,1	12	1,5	3	3,7	4,1	2,9	8,26	8,25
Liga 2C	11,9	11,9	1,9	3,5	3,3	5,1	2,4	8,26	8,27
Liga 2D	12	11,9	2	3	3,5	4,6	2,9	8,25	8,27

* Fundida usando fornecedor alternativo

[0041] Conforme previamente discutido, a densidade desta nova liga é significativa, em virtude das menores tensões operacionais inerentes. A densidade da liga na presente invenção é menor ou igual a 8,3 g/cm³. O menor nível de densidade desta liga pode ser mais bem percebido quando comparado com outras ligas normalmente usadas em aplicações de turbina a gás mostradas na tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Densidades de Várias Ligas de Turbina a Gás

Liga	Densidade g/cm ³	Densidade lb/in ³
PWA 1484	8,8	0,323
PWA1480	8,7	0,314

Liga	Densidade g/cm ³	Densidade lb/in ³
CMSX-4	8,7	0,314
Rene N5	8,6	0,312
CM 247 LC	8,54	0,308
GTD 404	8,4	0,307
GTD 111	9,3	0,300
Liga 2C	8,24	0,298

[0042] Um outro fator importante relativo à densidade da liga diz respeito ao peso e frequência do componente resultante. Quanto menor a densidade, tanto menor o peso do componente. Para uma pá de turbina que está girando, a anexação da pá empurra um disco, enquanto a pá está sendo mantida no disco. Este empurrão é função do peso da pá. Um menor peso de pá terá menos empurrão no disco e, em decorrência disto, terá menores tensões de anexação.

[0043] A densidade também afeta a frequência natural de um aerofólio, quer ele seja uma pá ou uma aleta. Conforme versados na técnica entendem, a frequência natural de um aerofólio é crítica em que ela tem que permanecer fora da frequência crítica do motor (60 Hz para um motor que opera a 3.600 revoluções por minuto). Os aerofólios não se destinam somente a ficar fora da frequência operacional do motor (60 Hz neste exemplo), mas também ordem destes (isto é, 120 Hz, 180 Hz). As presentes pás de turbina fabricadas a partir de uma liga com uma maior densidade têm uma frequência natural logo acima da frequência do motor. Se uma pá ou aleta residir na frequência natural do motor, ou qualquer ordem desta por um longo período de tempo, falha da pá pode ocorrer por causa de fadiga de alto ciclo. A fabricação das pás/aletas de turbina a partir de uma liga de menor densidade não somente reduz o peso do componente, e as tensões de anexação das pás, mas também aumenta sua frequência natural, que desloca a frequência da pá ou aleta ainda mais para fora da frequência do motor, reduzindo assim a chance de falha por fadiga de alto ciclo.

[0044] As propriedades mecânicas para dois pontos de dados para a primeira rodada de ligas estão mostradas nas tabelas 7 e 8 a seguir. A tabela 7 representa dados do limite de resistência máximo (UTS) e dados de limite de escoamento (YS) a temperaturas de 427°C e 760°C, enquanto a tabela 8 representa dados de ruptura por fluência a 760°C. Cada uma dessas tabelas também inclui dados referentes a uma "linha de base". Comparações são feitas nas tabelas seguintes e figuras entre as ligas desenvolvidas e uma liga de linha de base e GTD-111. A linha de base é uma liga atualmente usada pelo requerente em certas produções de aerofólios, com a linha de base tendo propriedades similares às de GTD-111.

[0045] Conforme previamente discutido, uma meta deste programa de desenvolvimento é produzir uma liga estável, com maior resistência, que tem melhor capacidade de fundição, e menores custos de fabricação. Referindo-se à tabela 7, duas experiências de fundição da liga 2 são salientadas, bem como uma liga linha de base. Conforme pode-se ver pelos dados, a liga 2 (ambas as experiências de fundição) tem um UTS dentro de aproximadamente 3% da liga linha de base na temperatura menor que 427°C, embora tendo ainda um maior YS. Enquanto a liga 7 tem um maior UTS, ela tem uma menor janela de tratamento térmico (75°C contra 85°C da liga 2). A liga 3 também tem uma menor janela de tratamento térmico do que a liga 2 e tem um menor UTS. Inconvenientes nas outras ligas do desenvolvimento tornam-se aparentes a temperaturas operacionais mais altas.,

[0046] A temperaturas operacionais de turbina típicas, mais próximas de 760°C, a liga 2 (ambas as experiências de fundição) tem um UTS e YS maior que a linha de base. Também, conforme previamente discutido, a liga 2 foi estruturalmente toda estável e teve a maior janela de tratamento térmico, servindo para as melhores condições de fabricação. Conforme pode-se ver, as outras ligas a 760°C nem tiveram a

resistência da liga 2 nem começaram apresentar instabilidades estruturais (fases TCP), como previamente discutido na tabela 2 e reproduzida a seguir.

Tabela 7 – Propriedades Mecânicas da Experiência de Fundição da Liga

Liga	HT	Orient	Temp (°C)	UTS MPa	YS 0,2% MPa	% Alo	ROA%	Estabilidade	Janela TT		Fases TCP	
											760	871
Linha de Base	A	Long	427	1166	875	6,6	8,6					
PCC1	A	Long	427	1112	896	7,7	13,1					
CC2	A	Long	427	1136	878	10,5	17,2					
PCC2	A	Long	427	1105	922	6,6	12,4		153			
CC3	A	Long	427	1074	912	8,6	9,3		143			
PCC4	A	Long	427	1131	916	7,3	10,9					
PCC5	A	Long	427	1187	1011	3,6	7,4					
PCC8	A	Long	427	1142	936	8,7	12,7					
CC7	A	Long	427	1196	930	5	9,7		135			

Linha de Base	A	Long	760	1047	836	16,4	23,2				
PCC1	A	Long	760	1093	933	6,9	10,4	219		Nenhuma	Muito limitadas
CC2	A	Long	760	1131	963	20,8	33,3	2,31	153	Nenhuma	Nenhuma
PCC2	A	Long	760	1118	968	7,9	11,6				
CC3	A	Long	760	1128	879	14,3	20,4	2,38	143	Muito limitadas	Limitadas
PCC4	A	Long	760	1116	973	7	9,7	216		Nenhuma	Nenhuma
PCC5	A	Long	760	1155	NA	124	16,8	2,26		Muito limitadas	Muito limitadas
PCC8	A	Long	760	1096	940	5,1	8,2	217		Nenhuma	Nenhuma
CC7	A	Long	760	1.074,9	890,8	21	38,2	2,28	135	Nenhuma	Limitada

[0047] Além da resistência das várias ligas, uma outra medida de capacidade da liga é a ruptura por fluência (ver tabela 8 a seguir). Fluência é uma deformação plástica causada pelo deslizamento que ocorre ao longo das direções cristalográficas por causa de uma carga/tensão constante aplicada a uma temperatura elevada. Fluência é tipicamente medida em porcentagem de deformação e o número de horas necessárias nesse carregamento e temperatura para causar a deformação. A partir dos dados na tabela 8, pode-se ver que todas as ligas apresentaram melhoria com relação à vida sob fluência e o número de horas para 0,5%, 1% e 5% de deformação por fluência. Embora a liga 3 tenha apresentado melhor vida sob fluência do que a liga 2, a liga 3 teve outros inconvenientes com relação às janelas de tratamento térmico e estabilidade estrutural, mostrado na tabela 7.

Tabela 8 - Dados de Ruptura por Fluência de Experiências de Fundição da Liga

Liga	TT	Orien- tação	Temp. °C	Ten- são MPa	Horas de vida h	Horas para fluência			
						0,50%	1%	2%	5%
Linha de base	A	L	760	587	301,9	9	32,25	103,5	221,5
1	A	L	760	587	508,2	42,7	129,4	266,7	466
PCC2	A	L	760	587	659,2	53,6	196,4	452,4	força
CC2	A	L	760	487	1.317,9	58	211,3	473	912,5
3	A	L	760	587	1.255,2	101,7	303,2	637,95	1.169,5
4	A	L	760	587	658,7	66,6	214,2	551,5	reprova- do
5	A	L	760	587	613	15,75	98,25	299,5	força
6	A	L	760	587	517,7	34,7	123	312,2	força
7	A	L	760	587	511,2	19,7	66,9	192,4	384,2

[0048] A partir destes e de outros dados, determinou-se que a liga 2 foi a composição preferida que forneceu a resistência, estabilidade estrutural necessárias, e permitiu um processo de fabricação mais conveniente.

[0049] Análise e desenvolvimento mais detalhado da liga 2 foram então conduzidos para determinar a composição final. Mais especificamente, quatro pequenas corridas (13,6 quilogramas) foram fundidas como placas solidificadas direcionalmente e avaliadas. Esses tamanhos de corrida foram selecionados como os mais representativos dos tamanhos e pesos para aplicações de peças fundidas de turbina a gás típicas. Dessas corridas, o número de lacunas eletrônicas, N_{v3} , variou de 2,220 – 2,280. As composições químicas resultantes dessas quatro ligas estão mostradas a seguir na tabela 9.

Tabela 9 – Composições Químicas de Variações da Liga 2

Propriedade	Liga 2A	Liga 2B	Liga 2C	Liga 2D
Al	3,59	3,63	3,31	3,57
Ti	4,53	4,02	4,98	4,50
Ta	2,59	3,00	2,54	3,05
Cr	11,97	11,93	11,78	11,87
Co	12,04	12,04	11,96	11,96
W	3,40	3,08	3,65	3,09
Mo	1,46	1,44	1,89	1,98
C	0,076	0,066	0,072	0,066
B	0,012	0,011	0,010	0,010
Zr	<10 ppm	<10 ppm	<10 ppm	<10 ppm
S	6 ppm	7 ppm	4 ppm	7 ppm
N	12 ppm	19 ppm	8 ppm	16 ppm
O	9 ppm	6 ppm	8 ppm	9 ppm
P	8 ppm	10 ppm	8 ppm	9 ppm
Re	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
V	<0,10	<0,05	<0,10	<0,05
Nv 3	2,270	2,220	2,280	2,270

[0050] As propriedades mecânicas das ligas 2A – 2D foram comparadas com uma linha de base para determinar uma liga preferida. Referindo-se à tabela 10, pode-se ver que a liga 2C forneceu maior YS e UTS a 427°C em relação à linha de base, bem como um maior YS na direção transversal a 760°C. Um gráfico da capacidade da liga 2C em função de GTD-111 está mostrado na figura 1. Dados de ruptura sob tensão para as ligas 2C e 2D são comparados com uma liga linha de base e GTD-111 na figura 2. A partir deste gráfico, pode-se ver que a liga 2C tem maior vida na ruptura por tensão do que a da linha de base e desta maneira é similar à de GTD-111.

Tabela 10 – Propriedades de Tração das Variações da Liga 2 Experimental desta Invenção

Propriedade	Liga 2A	Liga 2B	Liga 2C	Liga 2D	GTD111DS
Longitudinal					
427°C YS MPa	862	855	924	9318	896
427°C UTS MPa	1220	1241	1234	1234	1172
427°C AIO%	7	7	5	5	
427°C RA%	14	15	13	13	
Longitudinal					
760°C YS MPa	896	862	903	910	910
760°C UTS MPa	1020	986	1020	1034	1048
760°C ALO%	8	7	10	8	
760°C RA%	22	20	23	20	
Transversal					
760°C YS MPa	786	752	821	779	717
760°C UTS MPa	917	903	938	917	965
760°C ALO%	2	2	3	3	
760°C RA%	5	6	5	8	
Longitudinal					
871°C YS /MPa	531	483	565	539	579
871°C UTS MPa	690	641	710	710	717
871°C ALO%	16	29	13	12	
871°C RA%	36	43	37	38	

[0051] Tendo determinado que a liga 2 é a liga preferida e, mais particularmente, que a liga 2C é a composição elementar preferida, por causa de seu maior limite de resistência a 427°C, desejou-se verificar que as quantidades em produção industrial da liga podem ser produzidas tanto em fundições solidificadas direcionalmente (DS) quando convencional, ou equiaxial. Para avaliar as peças fundidas em escala

de produção, duas corridas de liga principal de 172 quilogramas foram produzidas. Conforme versados na técnica de fundição de precisão entendem, a fim de fundir uma liga à base de níquel tal como a da presente invenção com diferentes técnicas de solidificação, DS contra equiaxial, é necessário modificar o teor de carbono. Especificamente, uma peça fundida equiaxial exige um maior teor de carbono, aproximadamente 0,07 – 0,10%, ao passo que uma peça fundida DS exige apenas aproximadamente 0,03 – 0,06%. Para as corridas de amostra fundidas em cada configuração, as análises químicas estão mostradas na tabela 11.

Tabela 11 – Análises Químicas de Corridas de Produção de (181 quilogramas)

Propriedade	2C-1 DS	2C-1 Convencional.
Al	3.54	3.56
Ti	5.08	5.1
Ta	2.5	2.5
Cr	12.0	12.2
Co	12.2	12.1
W	3.5	3.5
Mo	1.9	1.9
C	0.050	0.097
B	0.015	0.015
Zr	<10 ppm	< ppm
S	1 ppm	1 ppm
N	1 PPIT ¹	4 ppm
O	6 ppm	6 ppm
P	7 ppm	6 ppm
Re	< 0.10	<0.10
V	<0.005	<0.005
Nv 3	2.400	2.390

[0052] Tendo concluído que a liga 2C poderia ser fundida com sucesso tanto no tipo DS quando equiaxial, a etapa seguinte no desenvolvimento da liga foi transferir fundição de corridas de experiência para fundição de componentes de turbina a gás de experiência. Uma seção transversal de um motor de turbina a gás típico está mostrada na figura 3, com cada seção do motor notada. Para a liga 2C, duas pás da seção da turbina compatíveis com cada da turbina do segundo e terceiro estágio da General Electric Frame foram fundidas. As pás do

segundo estágio têm aproximadamente 45,7 centímetros de comprimento e cada qual pesa aproximadamente 8,6 quilogramas. Um diagrama deste tipo de pá de turbina a gás está mostrado na figura 4. Esta pá é tipicamente fundida de uma maneira solidificada direcionalmente por causa das temperaturas operacionais e níveis de tensão observados pela pá. Ela é fundida de CM 247, uma liga à base de níquel que tem uma maior densidade do que a da liga aqui revelada, cujos detalhes foram previamente discutidos e estão revelados na patente US 4.461.659. Um rendimento de produção médio (% de peças fundidas aceitáveis) para este aerofólio fundido em CM-247 é aproximadamente 80%. Peças fundidas experimentais para pá de turbina deste estágio resultaram em um rendimento de 100%. Embora o tamanho da amostra tenha sido pequeno, não houve indicações de que este rendimento seria diferente em um ambiente de produção.

[0053] Como para a pá do terceiro estágio, ela tem aproximadamente 58,4 centímetros de comprimento e pesa aproximadamente 11,8 quilogramas. Um diagrama deste tipo de pá de turbina a gás está mostrado na figura 5. Esta pá é tipicamente fundida da mesma forma em um tipo convencional, ou equiaxial de CM 247. Entretanto, o rendimento típico desta parte é apenas aproximadamente 20%, quando é fundida de CM 247. A utilização da liga da presente invenção aumentou o rendimento de fundição para 100%. Embora o tamanho de amostra fosse pequeno, não houve indicação de que este rendimento seria diferente em um ambiente de produção.

[0054] Pelo teste e análise adicionais, fez-se ligeiras modificações na composição da liga 2C para produzir uma composição mais reprodutível, bem como para melhorar ainda mais as capacidades do material. A composição resultante difere ligeiramente entre a forma equiaxial e DS, mas ambas estão cobertas pela composição da liga listada a seguir na tabela 12.

Tabela 12 – Composição da liga

Elemento	%/Peso
Alumínio	3,35 – 3,65
Titânio	4,85 – 5,15
Tântalo	2,30 – 2,70
Cromo	11,50 – 12,50
Cobalto	11,50 – 12,50
Ferro	0,0 – 0,15
Cobre	0,0 – 0,10
Tungstênio	3,3 – 3,7
Molibdênio	1,70 – 2,10
Carbono	cerca de 0,04 – 0,12
Boro	0,010 – 0,020
Zircônio	0,0 – 20 partes por milhão
Háfnio	0,0 – 0,05
Enxofre	0,0 – 0,0012
Nitrogênio	0,0 – 25 partes por milhão
Oxigênio	0,0 – 10 partes por milhão, e
Níquel	Resíduo

[0055] Por tais análise e teste, um melhor entendimento das capacidades do material para a liga 2C tanto na forma equiaxial quanto solidificada direcionalmente foram medidas. A forma equiaxial da liga 2C foi designada como PSM116 e a forma DS da liga 2C foi designada como PSM117. PSM117 foi analisada com relação tanto à direção longitudinal quanto transversal. Como versados na técnica entendem, "longitudinal" e "de comprido" referem-se ao longo dos contornos de grão, ao passo que "transversal" ou "de travessa" é a direção 90 graus à direção dos grãos. Modificações feitas para criar a forma de produção da liga equiaxial e DS incluíram mudanças secundárias nas concentrações elementares, algumas aumentando, algumas diminuindo. Mediante teste mecânico de corpos de prova de produção, determi-

nou-se que o limite de resistência máximo melhorou em relação à liga 2C, e a liga GTD-111 da tecnologia anterior. Isto foi válido tanto para as forma equiaxiais quanto DS na extremidade superior do espectro operacional de uma pá de turbina, maior que aproximadamente 649°C (ver figuras 6 e 7). Conforme pode-se ver na figura 7, a forma equiaxial da liga da presente invenção também tem maior limite de resistência máximo em relação à maior parte do perfil de temperatura, comparado com ligas Canon-Muskegon 247 e Inconel 738 da tecnologia anterior.

[0056] Além disso, para o mesmo espectro operacional, o limite de escoamento da liga equiaxial, PSM116, foi também ligeiramente maior em relação à liga 2C, ligas GTD-111, CM-247 e IN-738 da tecnologia anterior (ver figura 8). Referindo-se à figura 9, melhorias similares no limite de escoamento, comparado com a liga GTD-111 da tecnologia anterior, podem ser vistas para os corpos de prova DS da liga da presente invenção. Essas melhorias no limite de escoamento e limite de resistência máximo na extremidade superior do envelope operacional são importantes, uma vez que pás de turbina fabricadas a partir desta liga tendem operar nessas maiores temperaturas (649°C ou mais).

[0057] Referindo-se agora às figuras 10 e 11, o alongamento do material a elevada temperatura está mostrado, respectivamente, para formas solidificadas direcionalmente e equiaxial da presente invenção. Em geral, para ambas as formas da liga, o alongamento percentual é maior a maiores temperaturas operacionais do que a menores temperaturas. Referindo-se à figura 10, a forma DS da liga tem alongamento ligeiramente maior do que da liga da tecnologia anterior GTD-111. Entretanto, a maiores temperaturas operacionais, acima de aproximadamente 760°C, o alongamento percentual da forma DS (PSM117) é menor que de GTD-111. É este arranjo que é mais desejável para tecnologia de turbina a gás. Para pás e aletas de turbinas que operam a

temperaturas mais elevadas, menores valores de alongamento são indicativos de um componente mais forte. Com relação à figura 11, está mostrado o alongamento percentual em função da temperatura para a forma equiaxial da liga da presente invenção, PSM116. O alongamento percentual é maior para a liga equiaxial na maior parte do perfil de temperatura, comparado com as ligas da tecnologia anterior.

[0058] Referindo-se à figura 12, um benefício adicional da liga da presente invenção está mostrado em termos de vida na ruptura por fluência em relação à extensão percentual da pá formada da liga. A vida do componente é medida em termos de horas até ocorrer a ruptura. Conforme pode-se ver pela figura 12, para uma dada temperatura e carga mecânica, a forma equiaxial da liga 2C, PSM116, mostra melhoria na vida sem ruptura (mostrada em escala adimensional) da rota de uma pá formada da liga até pelo menos 80% do local da extensão, comparada com a forma equiaxial da liga GTD-111 da tecnologia anterior.

[0059] Além da composição da liga que é revelada, são revelados um método de fabricar uma peça fundida e artigo tratado termicamente de uma liga à base de níquel, compreendendo prover a liga de acordo com os níveis de composição previamente descritos e submeter a liga ao processo de tratamento térmico previamente revelado.

[0060] A presente invenção foi descrita com relação a modalidades particulares, que são destinadas em todos os aspectos a ser ilustrativas, e não restritivas. Modalidades alternativas ficarão aparentes aos versados na técnica aos quais a presente invenção diz respeito sem fugir de seu escopo.

[0061] Pelo exposto, percebe-se que esta invenção é bem adaptada para atingir todas as finalidades e objetivos apresentados, juntamente com outras vantagens que são óbvias e inerentes ao sistema e método. Entende-se que certos recursos e subcombinações são de

utilidade e podem ser empregados sem referência a outros recursos e subcombinações. Isto está contemplado e de acordo com o escopo das reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. Liga à base de níquel com uma densidade de 0,30 lb/in³ (8,3 g/cm³) para a produção de componentes de turbina a gás longitudinalmente tracionados inferiores, caracterizada pelo fato de que consiste na composição seguinte em porcentagem em peso:

alumínio	3,35 – 3,65
titânio	4,85 – 5,15
tântalo	2,30 – 2,70
cromo	11,50 – 12,50
cobalto	11,50 – 12,50
ferro	0,0 – 0,15
cobre	0,0 – 0,10
tungstênio	3,3 – 3,7
molibdênio	1,70 – 2,10
carbono	0,04 – 0,12
boro	0,010 – 0,020
zircônio	0,0 – 20 partes por milhão
háfnio	0,0 – 0,05
enxofre	0,0 – 0,0012
nitrogênio	0,0 – 25 partes por milhão
oxigênio	0,0 – 10 partes por milhão, e
o restante níquel e impurezas incidentais.	

2. Liga à base de níquel de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a dita composição de carbono em porcentagem em peso é de 0,08 – 0,12 e a dita composição de zircônio em porcentagem em peso é até 10 partes por milhão.

3. Liga à base de níquel de acordo com a reivindicação 2, caracterizada pelo fato de que compreende adicionalmente uma composição de silício em porcentagem em peso de até 0,05.

4. Liga à base de níquel de acordo com a reivindicação

1, caracterizada pelo fato de que a dita composição de carbono em porcentagem em peso é de 0,04-0,07, a dita composição de enxofre em porcentagem em peso é até 10 partes por milhão, e a dita composição de nitrogênio em porcentagem em peso é até 10 partes por milhão.

5. Liga à base de níquel de acordo com a reivindicação 4, caracterizada pelo fato de que compreende adicionalmente uma composição de silício em porcentagem em peso de até 0,06, uma composição de fósforo em porcentagem em peso de até 15 partes por milhão, e uma composição de chumbo em porcentagem em peso de até 1 parte por milhão.

Liga 2C vs gtd-111:
Resistência Final vs. Limite Elástico

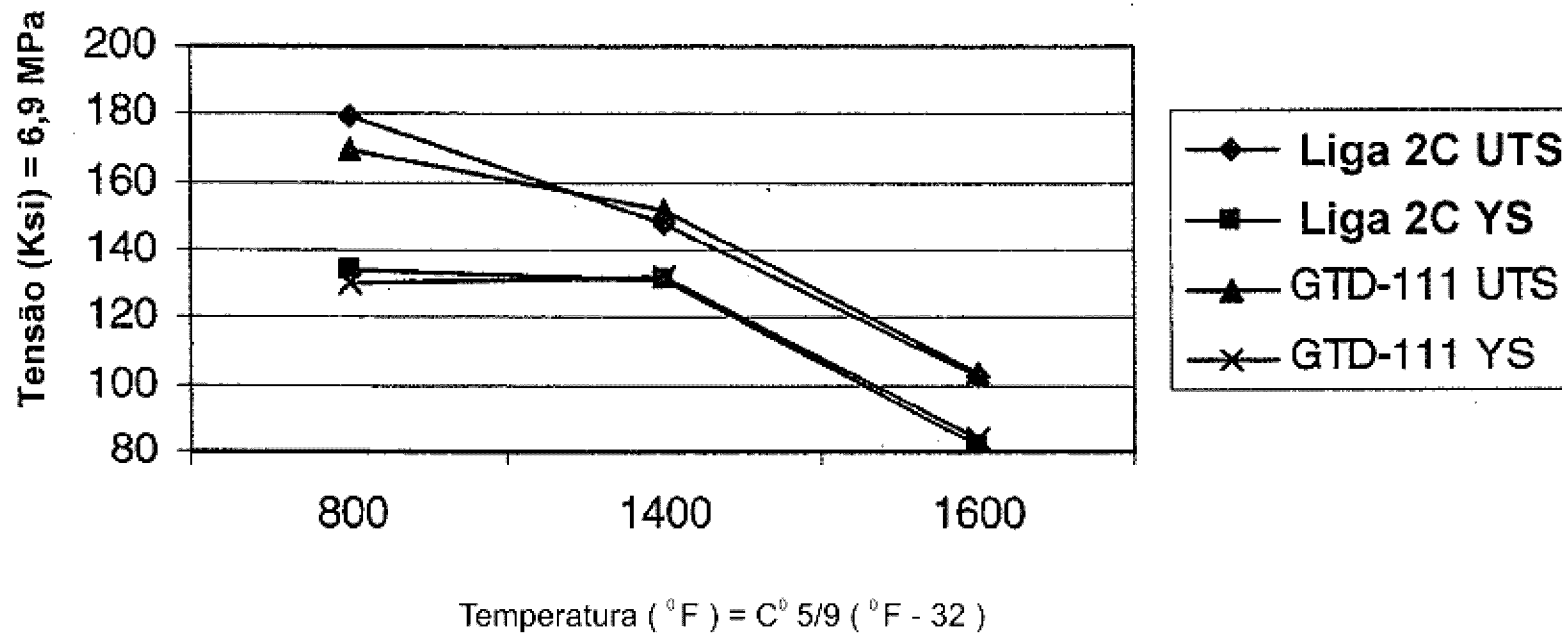


FIG. 1

Ruptura por Tensão: LIOgas 2C e 2D v.s GTD-11/Linha de base

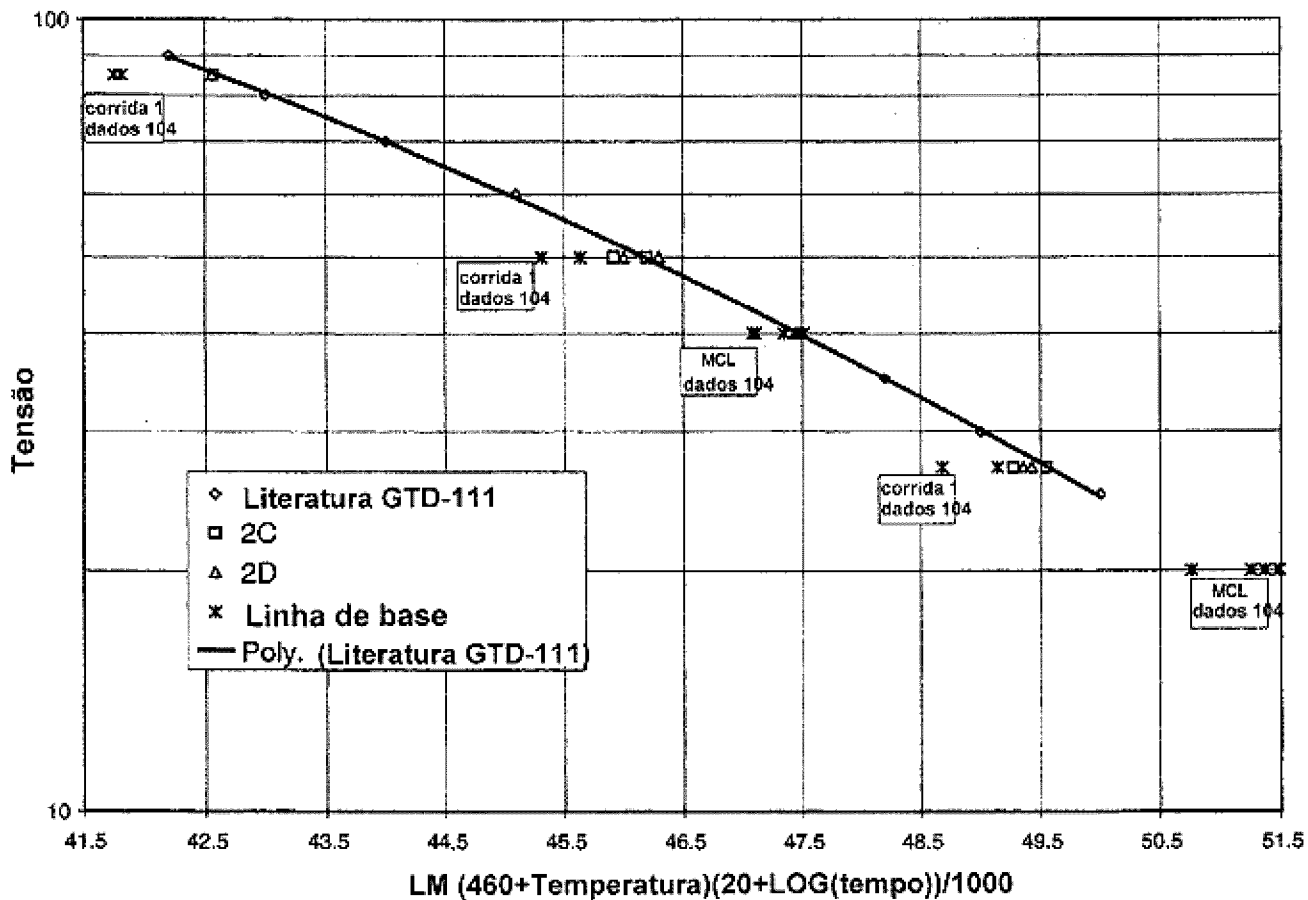


FIG. 2

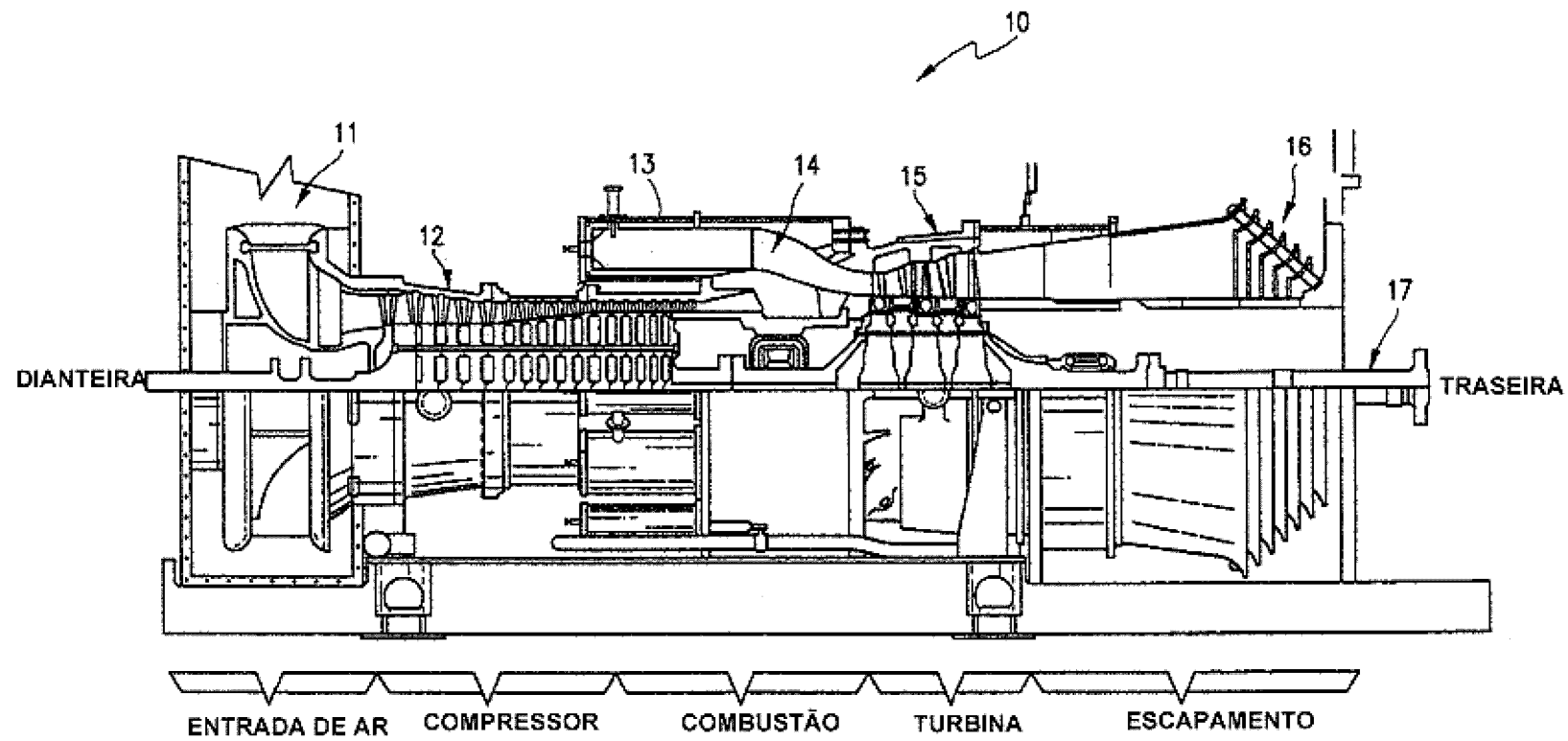
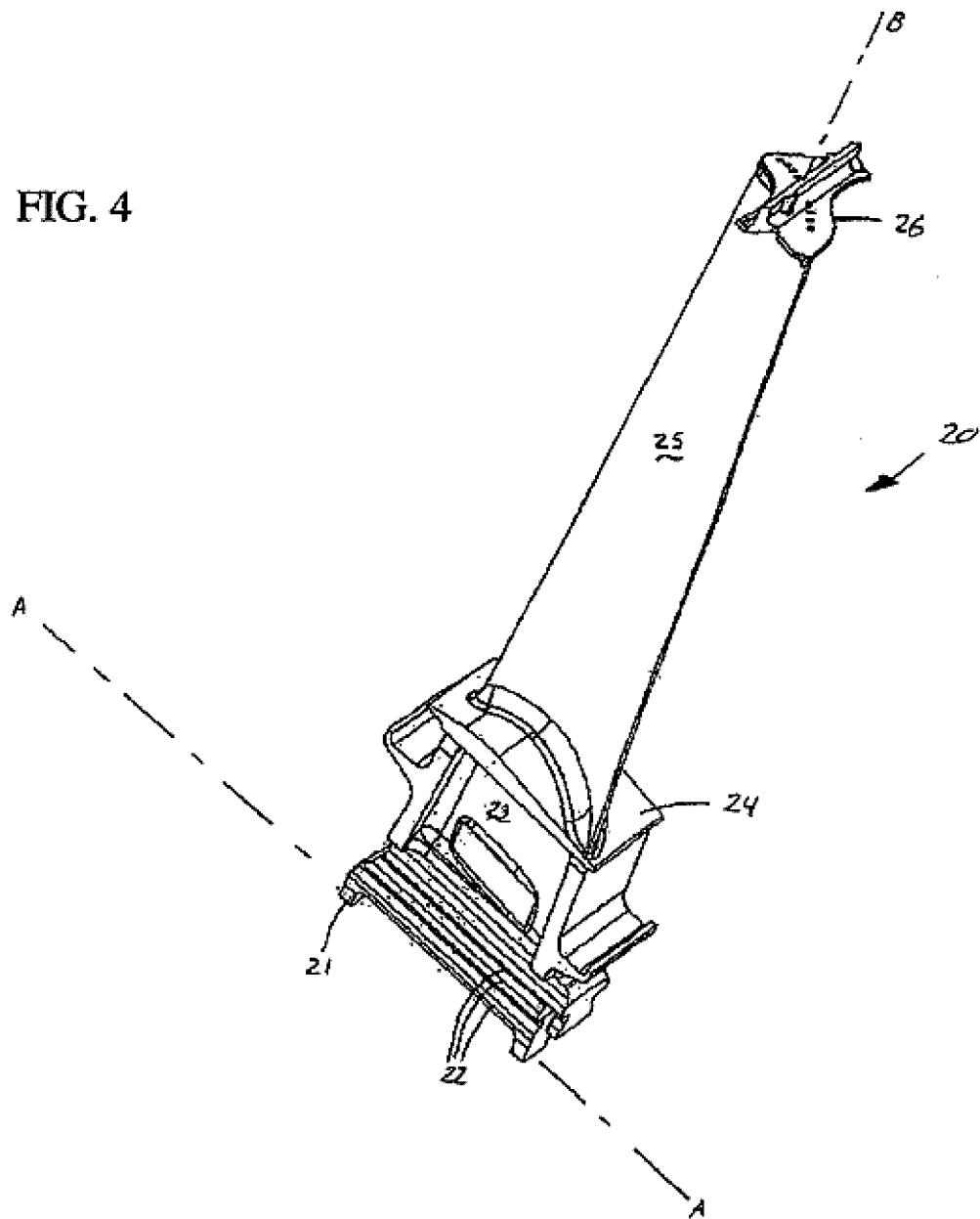


FIG. 3

FIG. 4



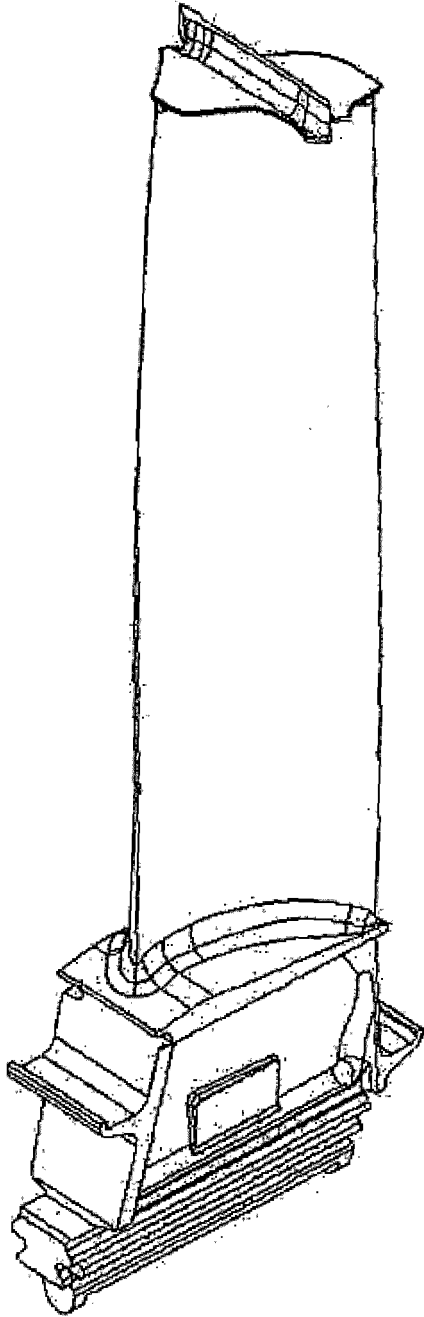


FIG. 5

Resistência à Tração Final Vs. Temperatura
(Direcionalmente Solidificado)

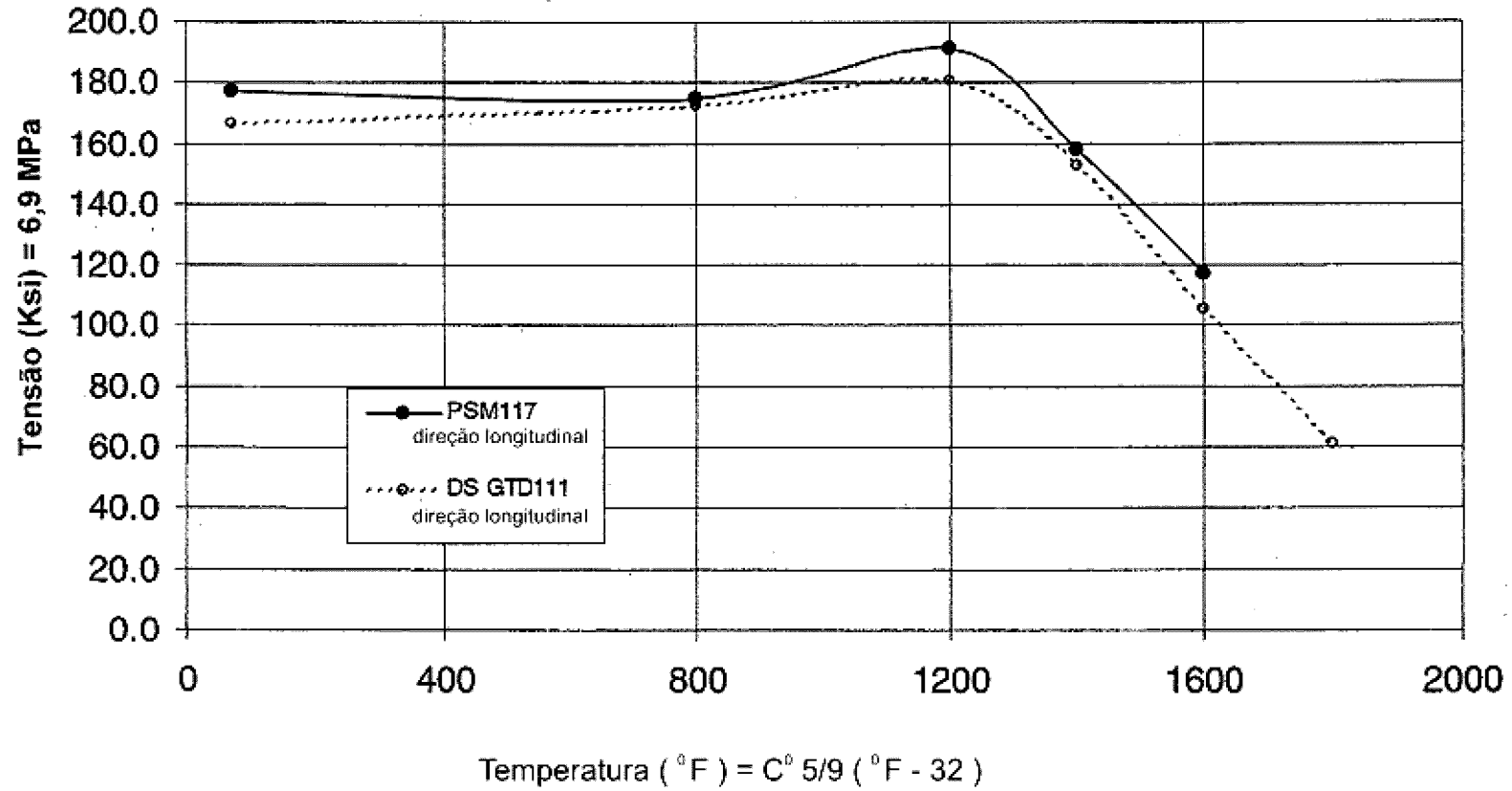


FIG. 6

Resistência à Tração Final Vs. Temperatura (Equiaxial)

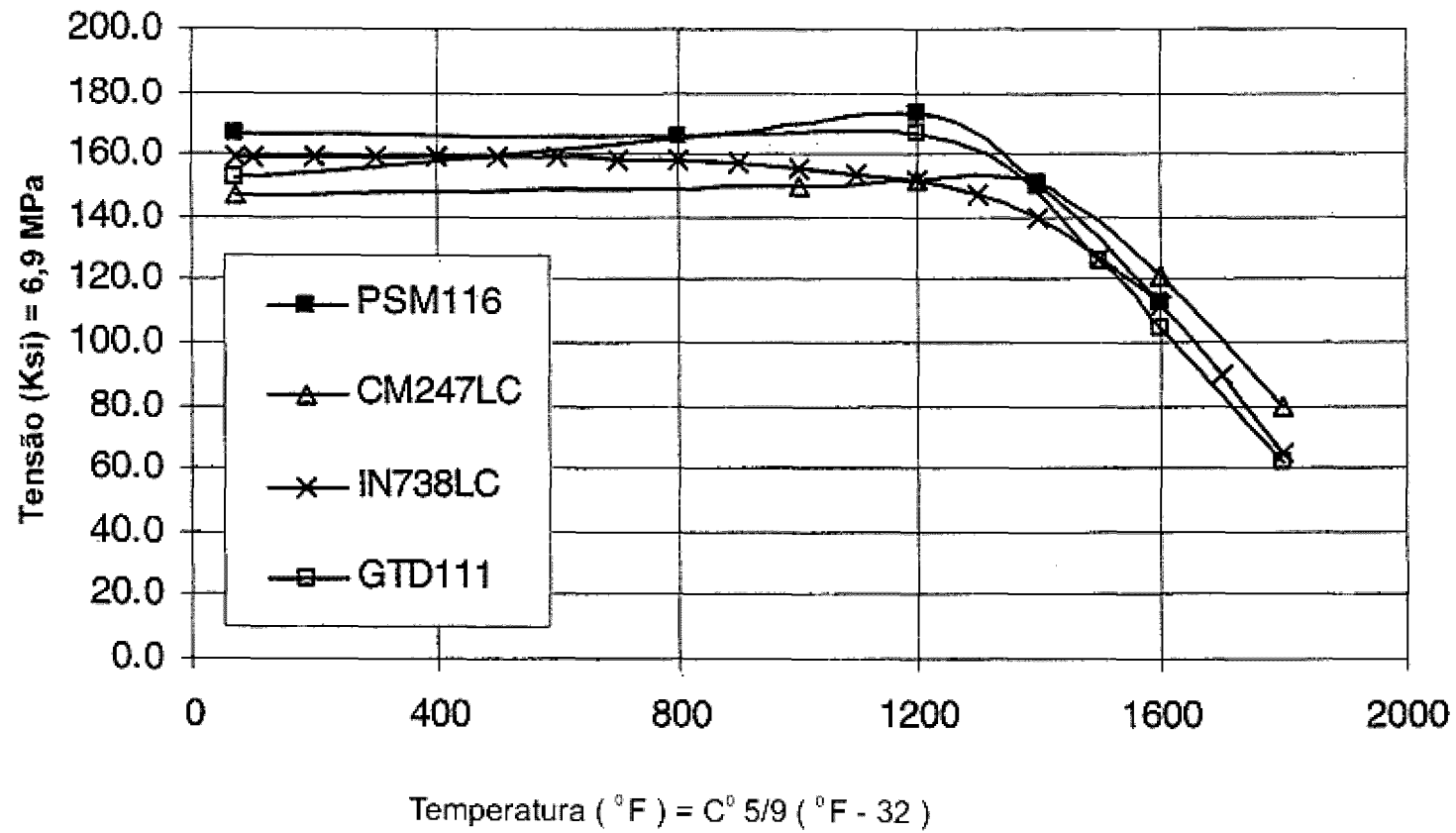


FIG. 7

Resistência à Tração a 0,2% Vs. Temperatura (Equiaxial)

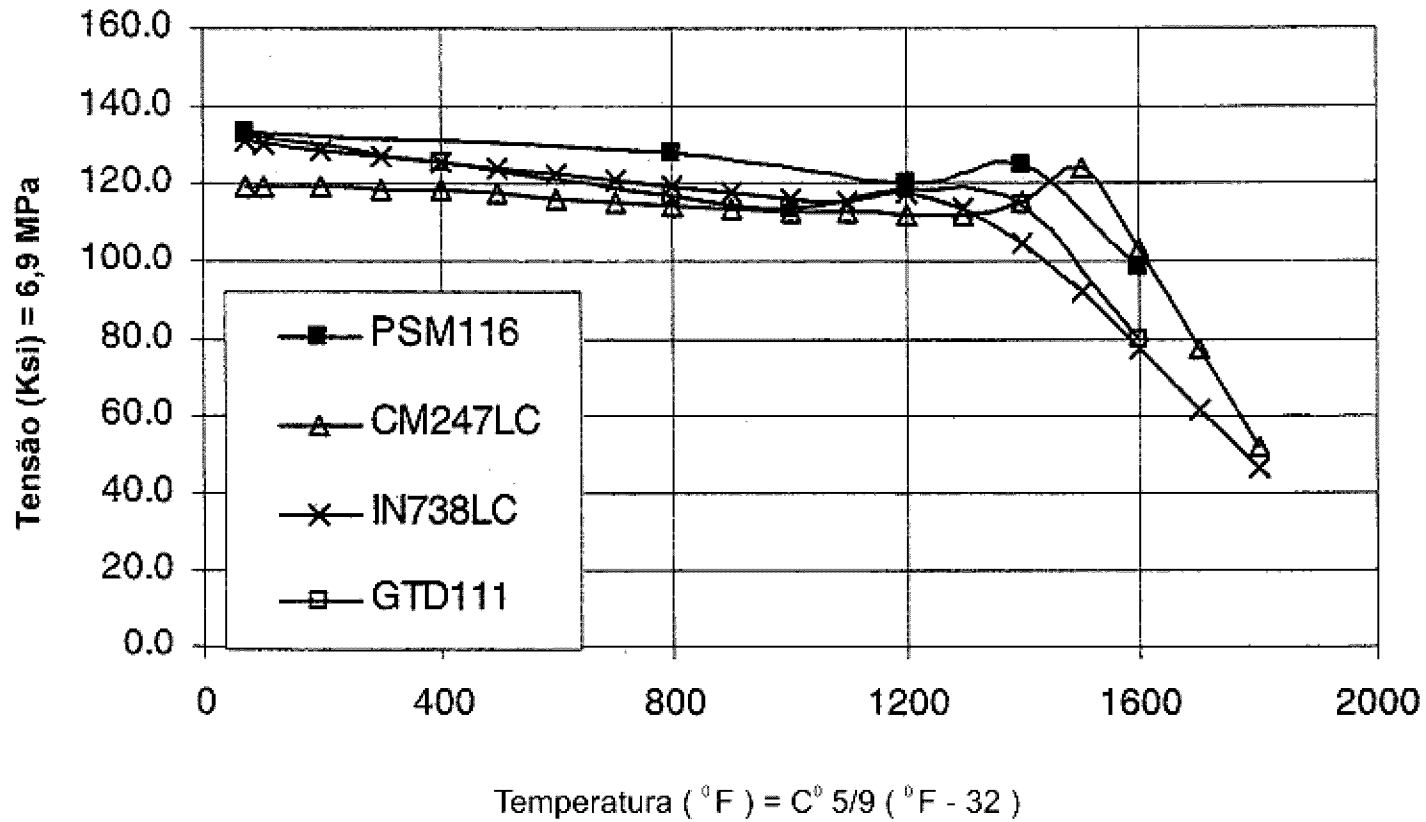


FIG. 8

**Resistência à Tração a 0,2% Vs. Temperatura
(Direcionalmente Solidificado)**

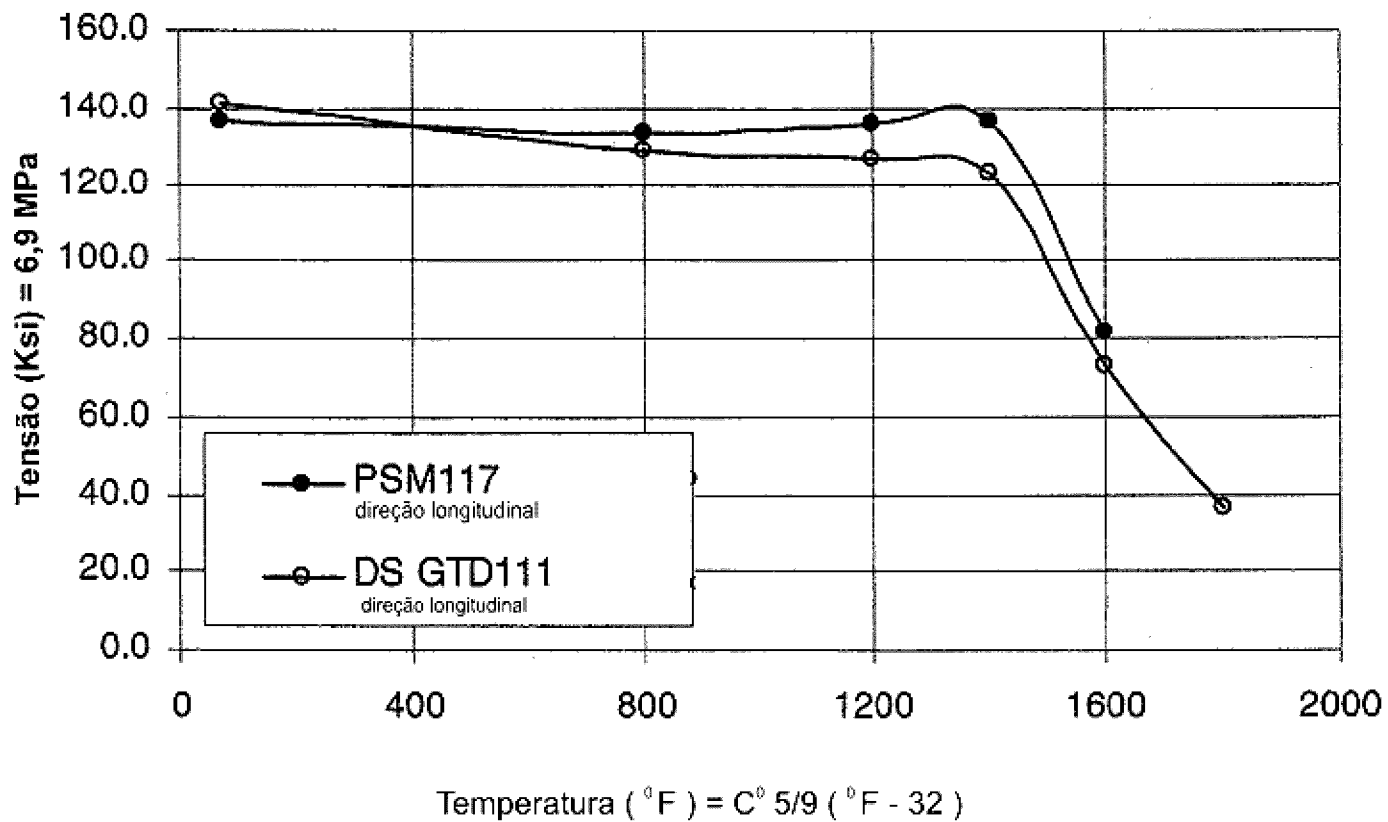


FIG. 9

% Alongamento Vs. Temperatura (Direcionalmente Solidificado)

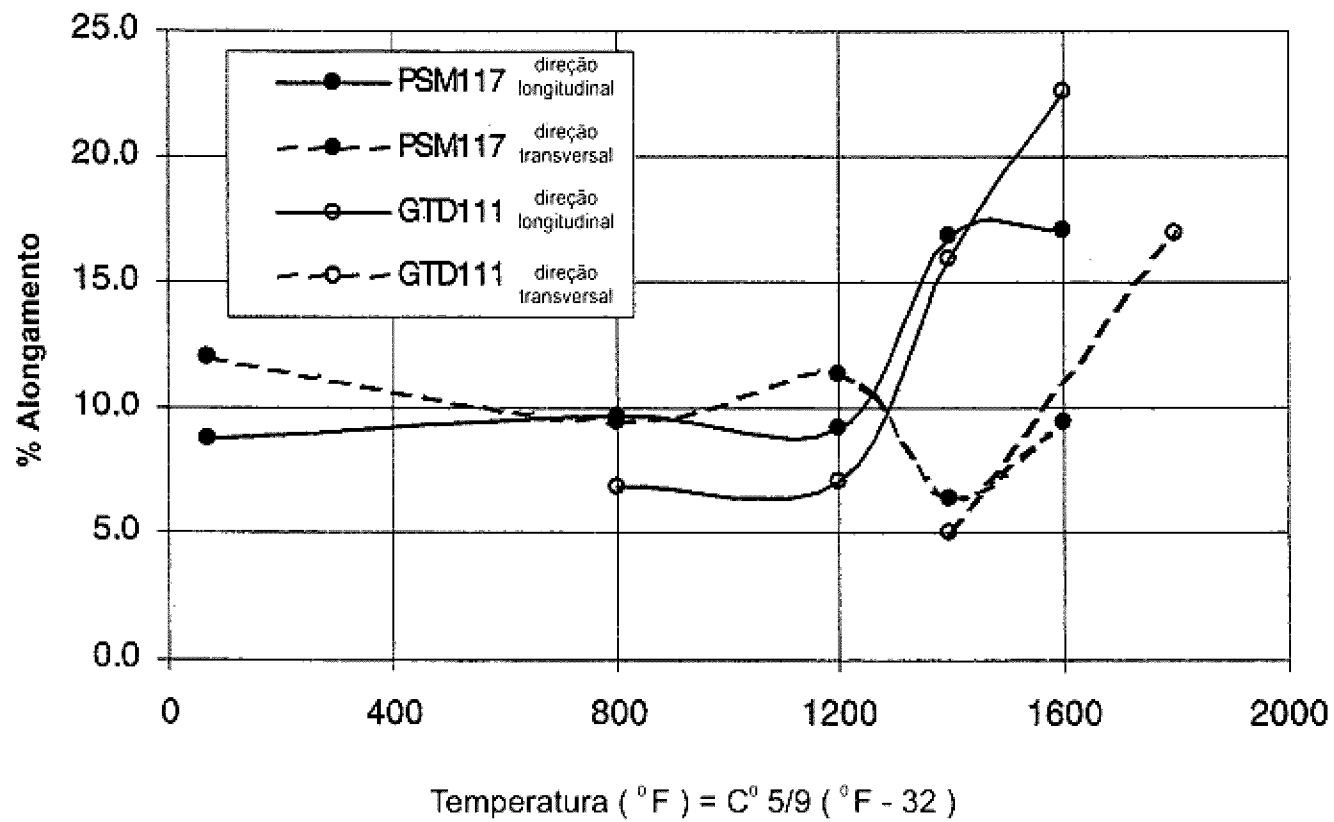


FIG.10

% Alongamento Vs. Temperatura (Direcionalmente Solidificado)

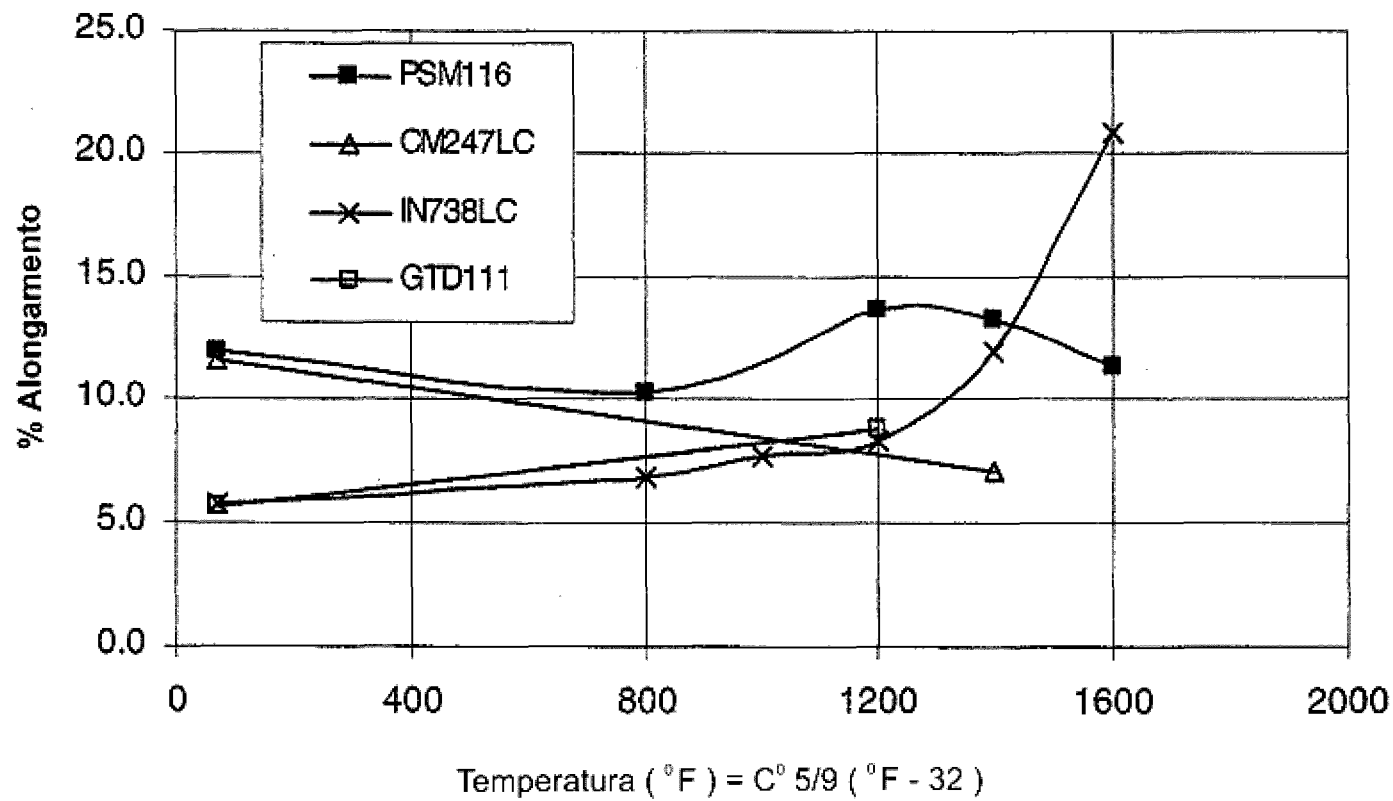


FIG.11

Vida em Ruptura por Fluência de Pá Típica (equiaxial)

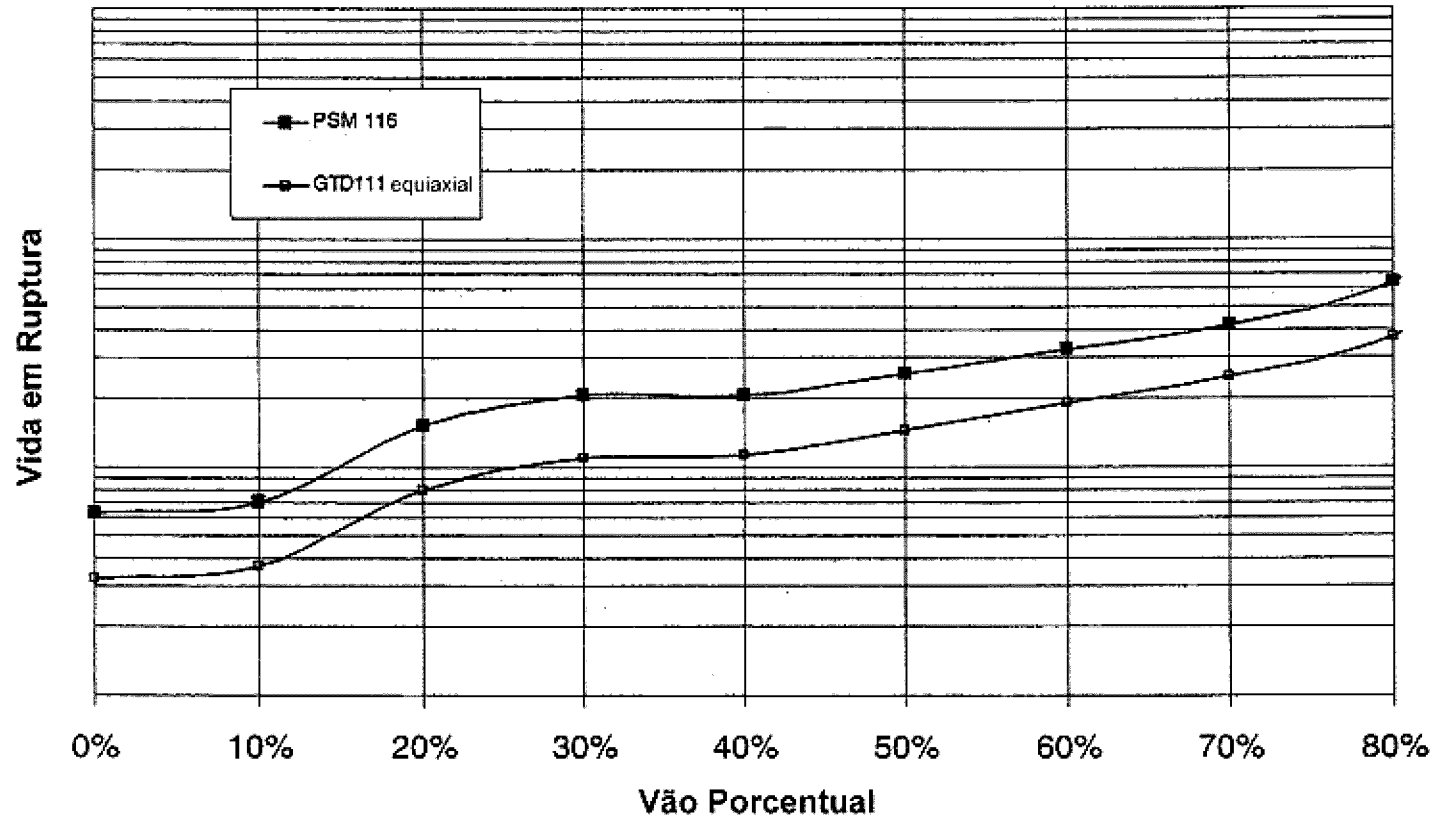


FIG.12