



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

**(11) BR 112015018367-0 B1**



**(22) Data do Depósito: 01/02/2013**

**(45) Data de Concessão: 14/05/2019**

**(54) Título:** FIO DE SOLDA E PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UM FIO DE SOLDA

**(51) Int.Cl.:** C22C 38/00; B23K 35/30; C22C 19/03.

**(73) Titular(es):** APERAM.

**(72) Inventor(es):** PIERRE-LOUIS REYDET; JEAN-LOUIS ROY; ROLAND ANDRÉ PANIER.

**(86) Pedido PCT:** PCT FR2013050224 de 01/02/2013

**(87) Publicação PCT:** WO 2014/118442 de 07/08/2014

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 31/07/2015

**(57) Resumo:** RESUMO FIO DE SOLDA, PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UM FIO DE SOLDA, PROCESSO DE SOLDAGEM, PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE UM SEGMENTO DE TUBO, PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UMA PARTE DE TANQUE, MONTAGEM SOLDADA, PARTE DE TANQUE, SEGMENTO DE TUBO E TUBO A presente invenção concerne um fio de solda destinado a ser utilizado para soldar partes de peças realizadas em liga Fe-36Ni entre si. Esse fio de solda é realizado em uma liga que compreende, em % em peso: 38,6% = Ni+Co = 45,0% traços = Co = 0,50% 2,25% = Ti+Nb = 0,8667 x (Ni+Co) - 31,20% se 38,6% = Ni+Co = 40,33% 2,25% = Ti+Nb = 3,75% se 40,33% = Ni+Co = 41,4% 0,4167 x (Ni+Co) - 15,0% = Ti+Nb = 3,75% se 41,4% = Ni+Co = 45,0% traços = Nb = 0,50% 0,01% = Mn = 0,30% 0,01% = Si = 0,25% traços = C = 0,05% traços = Cr = 0,50%, o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração.

**“FIO DE SOLDA E PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UM FIO DE SOLDA”****CAMPO DA INVENÇÃO**

[001] A presente invenção trata de um fio de solda destinado a ser usado para soldar entre si partes de peças, as quais partes apresentam a seguinte composição, em% em peso:

35,0% < Ni < 37,0%

traços < C < 0,10%

traços < Mn < 0,60%

traços < P < 0,025%

traços < S < 0,025%

traços < Si < 0,35%

traços < Cr < 0,50%

traços < Mo < 0,50%

traços < Co < 0,50%

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração.

[002] Essa composição corresponde à definição habitual das ligas chamadas Fe-36Ni.

**ANTECEDENTES DA INVENÇÃO**

[003] As ligas Fe-36Ni, tais como Invar<sup>®</sup> M93, são ligas que apresentam um baixo coeficiente de dilatação térmica, o que as torna, em particular, muito atraentes para transportar líquidos criogênicos.

[004] Em tais aplicações, elementos de liga Fe-36Ni são unidos entre si por solda.

[005] Quando as junções de elementos de liga Fe-36Ni são utilizadas em aplicações de recipientes sob pressão, tais como tubos de transporte de líquidos criogênicos ou dos tanques destinados a receber líquidos criogênicos, é desejável que essas junções satisfaçam aos critérios expostos

na seção IX consagrada às qualificações para as soldas e brasagens da norma intitulada “Código sobre as caldeiras e os aparelhos de pressão” (“Boiler and Pressure Vessel Code” em inglês) emitida pela ASME (American Society of Mechanical Engineers).

[006] Essa norma impõe, em particular, que as propriedades mecânicas da junta soldada, em particular a carga à ruptura ( $R_m$ ), sejam superiores ou iguais às do metal de base no qual são realizados os elementos unidos por essa junta soldada de modo que a junção possa ser dimensionada com base nas propriedades do metal de base, e não nas da junta soldada.

[007] Essa propriedade é qualificada pelo técnico no assunto pelo termo inglês de “overmatching” das propriedades mecânicas. Ela é considerada atendida se, durante um teste de tração em corpo de prova tomado perpendicularmente à junta soldada, a ruptura ocorre no metal de base, e não na junta soldada.

[008] Nesse caso, o metal de base é uma liga Fe-36Ni. Consequentemente, a condição de overmatching das propriedades mecânicas será preenchida se a junta soldada apresentar propriedades mecânicas superiores ou iguais às da liga Fe-36Ni.

[009] Uma solda apresenta geralmente grãos de tamanho superior aos do metal de base, em particular, devido a seus respectivos processos de obtenção. Consequentemente, uma solda homogênea, isto é, realizada com um fio de solda de composição química idêntica à do metal de base não satisfaz, em princípio, à condição de overmatching.

[010] A fim de melhorar as propriedades mecânicas da solda em relação a uma solda homogênea, foi considerado endurecer a liga que constitui o fio de solda por adição de elementos de liga tais como o nióbio, que provoca, um endurecimento de solução sólida da liga.

[011] A título de exemplo, são conhecidos fios de solda à base

de ferro que compreendem 36% de níquel, 1,6% de nióbio e 0,4% de manganês. Nesses fios de solda, o nióbio é adicionado por seu efeito de endurecimento de solução sólida e o manganês é adicionado para reter o enxofre e melhorar a resistência na solidificação e no reaquecimento.

[012] Entretanto, os inventores da presente invenção constataram que tais fios de solda não são inteiramente satisfatórios para soldar entre si peças realizadas em liga Fe-36Ni.

[013] De fato, os inventores constataram que a adição de nióbio, embora melhore efetivamente as propriedades mecânicas à temperatura ambiente da solda realizada entre elementos em liga Fe-36Ni, e em particular sua resistência à tração, degradava outras propriedades da solda. Em particular, as soldas assim obtidas são frágeis. Assim, experiências realizadas pelos inventores mostraram que tais soldas apresentam uma ductilidade a -196°C, medida por teste de impacto (KCV), inferior em 80% à do metal de base.

[014] Além disso, os inventores constataram igualmente que essas juntas soldadas são mais sensíveis à transformação martensíticas quando deformadas do que o metal de base. Ora, a presença de ilhas de martensita em uma liga ferro-níquel acelera consideravelmente a velocidade de corrosão por picadas. Adicionalmente, ela aumenta seu coeficiente de dilatação à temperatura criogênica. Uma junta soldada deformada à temperatura criogênica produziria então propriedades degradadas em relação à do metal de base. Essa situação, que é concebível em um acidente, não é, em particular, aceitável no campo dos recipientes sob pressão, em particular os que se destinam ao transporte ou ao armazenamento do gás natural liquefeito.

[015] Uma finalidade da presente invenção é fornecer um fio de solda apropriado para realizar junções soldadas em liga Fe-36Ni que satisfaçam à condição de overmatching das propriedades mecânicas da solda

com a liga Fe-36Ni, e que apresentem, ainda, melhor segurança nas aplicações que envolvem recipientes sob pressão.

### DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO

[016] Para esse fim, a presente invenção tem por objeto um fio de solda tal como precitado, o qual é realizado em uma liga que compreende, em peso:

$$38,6\% \leq \text{Ni+Co} \leq 45,0\%$$

$$\text{traços} \leq \text{Co} \leq 0,50\%$$

$$2,25\% \leq \text{Ti+Nb} \leq 0,8667 \times (\text{Ni+Co}) - 31,20\% \text{ se } 38,6\% \leq \text{Ni+Co} \leq 40,33\%$$

$$2,25\% \leq \text{Ti+Nb} \leq 3,75\% \text{ se } 40,33\% \leq \text{Ni+Co} \leq 41,4\%$$

$$0,4167 \times (\text{Ni+Co}) - 15,0\% \leq \text{Ti+Nb} \leq 3,75\% \text{ se } 41,4\% \leq \text{Ni+Co} \leq 45,0\%$$

$$\text{traços} \leq \text{Nb} \leq 0,50\%$$

$$0,01\% \leq \text{Mn} \leq 0,30\%$$

$$0,01\% \leq \text{Si} \leq 0,25\%$$

$$\text{traços} \leq \text{C} \leq 0,05\%$$

$$\text{traços} \leq \text{Cr} \leq 0,50\%$$

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração.

[017] De acordo com modos de realização particulares, o fio de solda de acordo com a presente invenção apresenta uma ou mais das características das reivindicações 2 a 7, considerada(s) isoladamente ou segundo quaisquer combinações tecnicamente possíveis.

[018] A presente invenção tem igualmente por objeto um processo de fabricação de um fio de solda tal como precitado de acordo com a reivindicação 8.

[019] De acordo com modos de realização particulares, o

processo de fabricação do fio de solda de acordo com a presente invenção apresenta uma ou mais das características das reivindicações 9 a 12, considerada(s) isoladamente ou segundo quaisquer combinações tecnicamente possíveis.

[020] A presente invenção tem igualmente por objeto um processo de solda de acordo com as reivindicações 13 e 14.

[021] A presente invenção tem igualmente por objeto um processo de fabricação de um segmento de tubo de acordo com as reivindicações 15 e 16.

[022] A presente invenção tem igualmente por objeto um processo de fabricação de um tubo de acordo com as reivindicações 17 e 18.

[023] A presente invenção tem igualmente por objeto um processo de fabricação de uma parte de tanque de acordo com a reivindicação 19.

[024] A presente invenção tem igualmente por objeto uma montagem soldada de acordo com a reivindicação 20.

[025] A presente invenção tem igualmente por objeto uma parte de tanque de acordo com a reivindicação 21. A presente invenção tem igualmente por objeto um segmento de tubo de acordo com a reivindicação 22. A presente invenção tem igualmente por objeto um tubo de acordo com a reivindicação 23.

#### **BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS**

[026] A presente invenção será mais bem entendida com a leitura da descrição a seguir, dada unicamente a título de exemplo e feita em relação aos desenhos anexos, nos quais:

- a figura 1 é um gráfico que representa o teor de titânio + nióbio do fio de solda de acordo com a presente invenção em função de seu teor de níquel + cobalto;

- a figura 2 é uma vista esquemática em seção de uma montagem soldada de acordo com a presente invenção;

- a figura 3 é uma vista esquemática de cima de uma chapa utilizada na realização do processo de fabricação de um segmento de tubo;

- a figura 4 é uma vista esquemática em perspectiva de um segmento de tubo obtido pelo processo de fabricação de um segmento de tubo de acordo com a presente invenção; e

- a figura 5 é uma vista esquemática em perspectiva de um tubo obtido pelo processo de fabricação de um tubo de acordo com a presente invenção.

#### **DESCRIÇÃO DE REALIZAÇÕES DA INVENÇÃO**

[027] O fio de solda de acordo com a presente invenção se destina a ser utilizado como fio de enchimento para soldar entre si partes de peças realizadas um metal de base que compreende, em % em peso:

$$35,0\% \leq Ni \leq 37,0\%$$

$$\text{traços} \leq C \leq 0,10\%$$

$$\text{traços} \leq Mn \leq 0,60\%$$

$$\text{traços} \leq P \leq 0,025\%$$

$$\text{traços} \leq S \leq 0,025\%$$

$$\text{traços} \leq Si \leq 0,35\%$$

$$\text{traços} \leq Cr \leq 0,50\%$$

$$\text{traços} \leq Mo \leq 0,50\%$$

$$\text{traços} \leq Co \leq 0,50\%$$

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração.

[028] Tal liga é uma liga Fe-36Ni. Ela corresponde à liga 11 definida na tabela 1 da norma ASTM A 333/A333M-99.

[029] De modo preferido, o fio de solda é utilizado para soldar

entre si partes de peças realizadas em um metal de base que compreende, em% em peso:

Ni	Mn	Si	Co	C	Cr	S	P	Mo	Fe
35,7%	0,31%	0,15%	0,01%	0,02%	0,02%	0,0002%	0,0001%	0,001%	
a	a	a	a	a	a	a	a	a	rest
36,4%	0,42%	0,25%	0,25%	0,04%	0,15%	0,0015%	0,007%	0,10%	o

o nome comercial dessa liga é Invar® M93.

[030] O uso desse fio de solda não conduz o técnico no assunto a modificar as condições habituais de realização da solda.

[031] Deve ficar claro que em todo o texto por “partes de peças” soldadas entre si, entendem-se tanto o caso em que essas partes soldadas entre si pertencem a duas peças inicialmente separadas que o caso em que essas partes são duas partes de uma mesma peça dobrada sobre si mesma, por exemplo as duas bordas longitudinais de uma chapa que são soldadas para constituir um tubo.

[032] No texto a seguir, entende-se por “líquido criogênico” um gás liquefeito conservado no estado líquido em baixa temperatura, em particular inferior a  $-150^{\circ}\text{C}$ . Tal líquido criogênico é, por exemplo, metano ou gás natural liquefeito, butano ou propano líquido. No texto a seguir, a temperatura de ebulição tal líquido criogênico é qualificada de temperatura criogênica.

[033] O metal de base definido acima, em sua forma geral ou em sua forma preferida, apresenta as propriedades indicadas a seguir.

[034] A temperatura criogênica, em particular a  $-196^{\circ}\text{C}$  (temperatura de ebulição do nitrogênio), sua resiliência é superior a  $100\text{J}/\text{cm}^2$ , e em particular superior a  $120\text{J}/\text{cm}^2$ .

[035] Ele apresenta um baixo coeficiente médio de dilatação

térmica entre -180°C e 0°C, que é, em particular, da ordem de  $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .

[036] Seu teor de martensita permanece inferior a 5% quando o metal é submetido a uma deformação plástica de 25% por tração plana interrompida à temperatura criogênica, em particular a -196 °C (temperatura de ebulição do nitrogênio).

[037] O fio de solda de acordo com a presente invenção é realizado em uma liga que compreende, em% em peso:

$$38,6\% \leq \text{Ni+Co} \leq 45,0\%$$

$$\text{traços} \leq \text{Co} \leq 0,50\%$$

$$2,25\% \leq \text{Ti+Nb} \leq 0,8667 \times (\text{Ni+Co}) - 31,20\% \text{ se } 38,6\% \leq \text{Ni+Co} \leq 40,33\%$$

$$2,25\% \leq \text{Ti+Nb} \leq 3,75\% \text{ se } 40,33\% \leq \text{Ni+Co} \leq 41,4\%$$

$$0,4167 \times (\text{Ni+Co}) - 15,0\% \leq \text{Ti+Nb} \leq 3,75\% \text{ se } 41,4\% \leq \text{Ni+Co} \leq 45,0\%$$

$$\text{traços} \leq \text{Nb} \leq 0,50\%$$

$$0,01\% \leq \text{Mn} \leq 0,30\%$$

$$0,01\% \leq \text{Si} \leq 0,25\%$$

$$\text{traços} \leq \text{C} \leq 0,05\%$$

$$\text{traços} \leq \text{Cr} \leq 0,50\%$$

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração.

[038] Quando o fio de solda de acordo com a presente invenção for utilizado como fio de enchimento para soldar partes de peças realizadas no metal de base tal como definido acima entre si, seja em sua forma particular ou em sua forme geral, as soldas obtidas apresentam as propriedades indicadas a seguir.

[039] A resiliência da solda a temperatura criogênica, em particular à temperatura de ebulição do nitrogênio (-196°C) é superior a

120J/cm<sup>2</sup>. Essa propriedade é obtida, em particular graças ao fato de que o teor de nióbio da liga que constitui o fio de solda é inferior ou igual a 0,50%. Essa resiliência da solda é similar à do metal de base.

[040] O coeficiente médio de dilatação térmica da solda entre -180°C e 0°C é inferior a  $7,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Ele é, portanto, da ordem do coeficiente médio do metal de base. Essa propriedade é obtida graças ao fato de que o teor de titânio + nióbio da liga que constitui o fio de solda é inferior ou igual a 3,75%.

[041] Os teores de cobalto, manganês, silício e cromo da liga que constituem o fio de solda são limitados a fim de não degradar o coeficiente médio de dilatação térmica entre -180°C e 0°C além de  $7,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .

[042] A solda apresenta uma estabilidade à transformação martensítica superior ou igual à do metal de base à temperatura criogênica (em particular a -196°C), ou seja, seu teor de martensita permanece inferior ou igual a 5% quando a junta soldada é submetida a uma deformação de 25% por tração plana interrompida à temperatura criogênica, em particular a -196°C, de acordo com o teste de estabilidade descrito a seguir. Essa boa estabilidade da solda à transformação martensítica é obtida graças ao fato de que o teor de titânio + nióbio do fio de solda é inferior ou igual a  $0,8667 \times (\text{Ni} + \text{Co}) - 31,20\%$ , com  $\text{Co} \leq 0,50\%$ . Nesse contexto, os inventores descobriram, de modo surpreendente, que a estabilidade à transformação martensítica da solda aumenta quando o teor de níquel + cobalto do fio de solda aumenta, com um teor de titânio + nióbio constante e com  $\leq 0,50\%$ .

[043] Os teores de manganês e de carbono do fio de solda participam igualmente da melhora da estabilidade da solda à transformação martensítica.

[044] O teor de carbono do fio de solda é limitado a fim de limitar a precipitação dos carbonitreto de Ti/Nb que degradam a resiliência a

temperatura criogênica.

[045] As propriedades mecânicas da solda, em particular a carga à ruptura ( $R_m$ ), são superiores às do metal de base a temperatura ambiente ( $25^\circ \text{C}$ ). A solda preenche, portanto, a condição de overmatching das propriedades mecânicas à temperatura ambiente. Essa propriedade é obtida graças ao fato de que o teor de titânio + nióbio do fio de solda é superior ou igual a 2,25% com  $\text{Nb} < 0,50\%$ . O titânio e o nióbio são utilizados por suas propriedades de endurecimento de solução sólida.

[046] As propriedades mecânicas da solda, em particular a carga à ruptura ( $R_m$ ) são superiores às do metal de base à temperatura criogênica. A solda preenche, portanto, a condição de overmatching das propriedades mecânicas a temperatura criogênica. Essa propriedade é obtida graças ao fato de que o teor de titânio + nióbio do fio de solda é superior ou igual a  $0,4167 \times (\text{Ni} + \text{Co}) - 15,0\%$ , com  $\text{Co} \leq 0,50\%$ .

[047] Em particular, os inventores constataram que, para um teor de titânio + nióbio dado, o aumento do teor de níquel + cobalto do fio de solda além do limite superior que corresponde à fórmula acima invertida de modo a expressar o teor de níquel+cobalto em função do teor de titânio + nióbio, isto é, além de

$$\frac{\text{Ti} + \text{Nb} + 15.0\%}{0,4167}$$

$\text{Co} \leq 0,50\%$  degrada as propriedades mecânicas da liga à temperatura criogênica. As propriedades mecânicas da solda a temperatura criogênica se tornam então inferiores às do metal de base, e a condição de overmatching a temperatura criogênica não é mais respeitada.

[048] Deve-se notar que os teores de elementos de liga do fio de solda de acordo com a presente invenção levam em conta a inevitável diluição do fio de solda por mistura com o metal de base fundido durante a solda. A

diluição média está em princípio compreendida entre 15% e 50% de acordo com a técnica de solda utilizada.

[049] As três faixas de teores de titânio + nióbio em função do teor de níquel + cobalto da liga que constituem o fio de solda de acordo com a presente invenção definidas acima na composição geral do fio de solda resultam da combinação das condições mencionadas acima.

[050] Essas faixas foram representadas graficamente na figura 1, que é um gráfico que representa o teor de titânio + nióbio em função do teor de níquel + cobalto da liga que constitui o fio de solda. Nessa figura:

- a curva designada por C1 representa a equação  $Ti+Nb = 0,8667 \times (Ni+Co) - 31,20\%$ ;

- a curva designada por C2 representa a equação  $Ti+Nb = 0,4167 \times (Ni+Co) - 15,0\%$ ;

- a curva designada por C3 representa a equação  $Ti+Nb = 3,75\%$ ;

e

- a curva designada por C4 representa a equação  $Ti+Nb = 2,25\%$ .

[051] Mais particularmente:

[052] A curva C1 delimita a faixa de teores de níquel + cobalto (com  $Co < 0,50\%$ ) mínimas na qual a solda obtida a partir do fio de solda apresenta uma estabilidade a transformação martensítica à temperatura criogênica superior ou igual à do metal de base.

[053] A curva C2 delimita a faixa de teores de níquel + cobalto (com  $Co < 0,50\%$ ) máximas na qual é obtido um overmatching das propriedades mecânicas da solda à temperatura criogênica.

[054] A curva C3 delimita a faixa de teores de titânio + nióbio (com  $Nb < 0,50\%$ ) máximas para a qual o coeficiente de dilatação térmica da solda entre  $-180^{\circ}C$  e  $0^{\circ}C$  é inferior a  $7,5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ .

[055] A curva C4 delimita a faixa de teores de titânio + nióbio

(com Nb < 0,50%) mínimas para a qual é obtido um overmatching das propriedades mecânicas da solda à temperatura ambiente.

[056] Além disso, deve-se notar que na liga que constitui o fio de solda:

- o teor de silício superior ou igual a 0,01% permite assegurar a desoxidação da liga;

- o teor de cromo inferior ou igual a 0,50% melhora a resistência da liga à corrosão atmosférica;

- o teor de cobalto inferior ou igual a 0,50% melhora a resiliência das soldas.

[057] De modo preferido, o teor de nióbio do fio de solda é inferior ou igual a 0,01% em peso de forma a evitar ou limitar a formação de carboneto de nióbio suscetível de fragilizar a solda.

[058] De modo preferido, o teor de cobalto do fio de solda é inferior ou igual a 0,10% em peso de forma a tornar a solda ainda menos sensível à transformação martensítica à temperatura criogênica.

[059] De modo preferido, o teor de carbono do fio de solda é inferior ou igual a 0,015% em peso a fim de limitar a fração volúmica de carboneto de Ti/Nb suscetível de fragilizar a solda.

[060] De modo preferido, o teor de cromo do fio de solda é inferior ou igual a 0,10% de forma a reduzir ainda mais o coeficiente de dilatação térmica da solda e a tornar a solda ainda menos sensível à transformação martensítica.

[061] De modo ainda mais preferido, o fio de solda é realizado em uma liga que compreende, em% em peso:

$$40,0\% \leq \text{Ni} + \text{Co} \leq 42,0\%$$

$$2,60\% \leq \text{Ti} + \text{Nb} \leq 3,40\%$$

$$\text{traços} \leq \text{Nb} \leq 0,01\%$$

$\text{traços} \leq \text{Co} \leq 0,10\%$

$0,01\% \leq \text{Mn} \leq 0,10\%$

$0,01\% \leq \text{Si} \leq 0,10\%$

$\text{traços} \leq \text{C} \leq 0,015\%$

$\text{traços} \leq \text{Cr} \leq 0,10\%$

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração.

[062] Esta composição preferida é representada por um retângulo na figura 1.

[063] Um fio de solda que possui essa composição é particularmente vantajoso. De fato, ele permite obter um excelente equilíbrio entre das diversas propriedades da junta soldada formada entre partes de peças realizadas no metal de base, isto é, uma resiliência (KCV) a  $-196^{\circ}\text{C}$  superior ou igual a  $130 \text{ J/cm}^2$ , um coeficiente médio de dilatação térmica entre  $180^{\circ}\text{C}$  e  $0^{\circ}\text{C}$  inferior a  $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , uma baixíssima sensibilidade à transformação martensítica a  $-196^{\circ}\text{C}$  e o overmatching das propriedades mecânicas da solda com o metal de base a  $-163^{\circ}\text{C}$  e  $25^{\circ}\text{C}$ .

[064] Ele apresenta, ainda, uma soldabilidade melhorada graças a seu teor de titânio + nióbio inferior a 3,40%.

[065] De modo ainda mais preferido, o fio de solda apresenta a seguinte composição, em porcentagem em peso:

$41,0\% \leq \text{Ni} + \text{Co} \leq 42,0\%$

$2,60\% \leq \text{Ti} + \text{Nb} \leq 3,40\%$

$\text{traços} \leq \text{Nb} \leq 0,01\%$

$\text{traços} \leq \text{Co} \leq 0,10\%$

$0,01\% \leq \text{Mn} \leq 0,10\%$

$0,01\% \leq \text{Si} \leq 0,10\%$

$\text{traços} \leq \text{C} \leq 0,015\%$

traços  $\leq Cr \leq 0,10\%$

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração.

[066] Esse fio de solda é particularmente vantajoso. De fato, além das vantagens mencionadas acima, a junta soldada obtida soldando entre si partes de peças realizadas no metal de base apresenta uma estabilidade à transformação martensítica ainda melhor. De fato, o teor de martensita da junta soldada permanece inferior ou igual a 3% quando a junta soldada é submetida a uma deformação de 25% por tração plana interrompida à temperatura criogênica, em particular a  $-196^{\circ}\text{C}$ , de acordo com o teste de estabilidade descrito a seguir. Assim, as juntas soldadas obtidas entre peças realizadas no metal de base utilizando esse fio de solda como fio de enchimento apresentam uma resistência à corrosão por picadas ainda melhor. Além disso, a redução da taxa de martensita homogeneiza o coeficiente de dilatação térmica na junta soldada e permite reduzir ainda mais as diferenças de dilatação térmica locais ligadas à presença de martensita.

[067] A presente invenção tem igualmente por objeto um processo de fabricação de um fio de solda tal como descrito acima.

[068] Esse processo compreende uma etapa de elaboração da liga que constitui o fio de solda. A liga descrita acima é elaborada de modo convencional, por exemplo em um forno elétrico a arco elétrico ou um forno de indução sob vácuo.

[069] Durante a elaboração da liga que constitui o fio de solda, procura-se reduzir ao máximo os teores de elementos tais como o enxofre e o fósforo, em particular a fim de evitar qualquer sensibilidade da liga à fissuração na solidificação e no aquecimento e favorecer assim a transformação a quente e a soldabilidade do fio de solda. Esses elementos residuais fazem parte das impurezas que resultam da elaboração.

[070] Depois que a liga foi elaborada, produtos semiacabados são formados a partir dessa liga. Para esse fim, a liga é vazada em lingotes, quer vazada diretamente em forma de biletas, em particular por meio de um vazamento contínuo. Os produtos semiacabados obtidos no fim dessa etapa são, portanto, vantajosamente lingotes ou biletas.

[071] Opcionalmente, esses produtos semiacabados são fundidos novamente sob vácuo ou sob escória autocondutora. Essa etapa tem por efeito diminuir o teor de elementos residuais indesejáveis, e melhora, portanto, a pureza da liga.

[072] Em seguida, os produtos semiacabados são transformados por transformação a quente entre 1050°C e 1250 °C para formar um fio.

[073] Em particular, durante essa etapa de transformação a quente, os produtos semiacabados, isto é, em particular os lingotes ou biletas, são transformados a quente de forma a reduzir sua seção, conferindo-lhes, por exemplo, uma seção quadrada, de aproximadamente 100mm a 200mm de lado. É obtido assim um produto semiacabado de seção reduzida. O comprimento desse produto semiacabado de seção reduzida está, em particular, compreendido entre 10 metros e 20 metros.

[074] Vantajosamente, a redução da seção dos produtos semiacabados é realizada por uma ou mais passagens sucessivas de laminação a quente.

[075] Os produtos semiacabados de seção reduzida são, em seguida, novamente transformados a quente para obter o fio. O fio pode ser, em particular, um fio máquina. Ele apresenta, por exemplo, um diâmetro compreendido entre 5mm e 21 mm, e em particular aproximadamente igual a 5,5mm.

[076] Vantajosamente, durante essa etapa, o fio é produzido por laminação a quente sobre um trem de fio-máquina.

[077] O fio é então decapado, e depois enrolado em forma de bobina.

[078] Ele é então trefilado por meio de uma instalação de trefilação de tipo conhecido para obter o fio de solda. Esse fio de solda apresenta um diâmetro inferior ao do fio de partida. Seu diâmetro está, em particular, compreendido entre 0,5mm e 1,5mm. Ele está vantajosamente compreendido entre 0,8mm e 1,2mm.

[079] A presente invenção tem igualmente por objeto o uso do fio de solda tal como definido acima para soldar entre si pelo menos duas partes de peças realizadas no metal de base definido acima.

[080] A presente invenção tem igualmente por objeto um processo de solda para soldar entre si pelo menos duas partes de peças 12 realizadas no metal de base definido acima de modo a realizar uma montagem soldada 10 (Figura 2).

[081] Inicialmente, um fio de solda tal como descrito acima é fornecido. Partes de peças 12 realizadas no metal de base que vão ser soldadas entre si por meio do processo de solda são também fornecidas.

[082] Então, as partes de peças 12 são soldadas entre si usando o fio de solda como fio de enchimento.

[083] Durante essa etapa, é realizada, por exemplo, seja uma solda de ângulo em junta sobreposta, quer uma solda topo a topo. A escolha do tipo de solda depende, em particular da natureza e da forma das partes de peças 12 a ser soldadas e da forma desejada da montagem soldada 10.

[084] A etapa de solda pode compreender uma ou mais passagens de solda. Classicamente, ela compreende uma primeira passagem de solda denominada passagem de raiz, seguida de uma ou mais passagens de solda adicionais, denominadas passagens de enchimento.

[085] Cada uma das passagens de solda est realizada utilizando

como fio de enchimento o fio de solda de acordo com a presente invenção, tal como descrito acima. Assim, a diluição desse fio de solda é limitada à diluição pelo metal de base fundido que resulta da solda.

[086] A solda é realizada de modo manual ou automático.

[087] Vantajosamente, a solda é realizada por um processo de solda em baixa energia de tal forma que a área afetada termicamente das partes de peças 12 a ser soldadas seja tão pequena quanto possível. De fato, o aumento dos grãos do metal na área afetada termicamente provoca um enfraquecimento mecânico dessa área, e é, portanto, importante minimizar sua largura tanto possível.

[088] A solda é, por exemplo, realizada por solda plasma ou por solda TIG (“Tungsten Inert Gas” em inglês) ou MIG (“Metal Inert Gas” em inglês) utilizando o fio de solda de acordo com a presente invenção como fio de enchimento.

[089] De preferência, a passagem de raiz é realizada por solda plasma, e as passagens de enchimento são realizadas por solda MIG ou TIG, e vantajosamente por solda TIG. De fato, os processos de solda MIG e TIG são processos de solda de energia mais baixa que a solda plasma.

[090] No fim desse processo, uma montagem soldada 10 é obtida que compreende as partes de peças 12, ligadas entre si por um cordão de solda 13 obtido a partir do fio de solda tal como descrito acima. Tal montagem soldada 10 está ilustrada na figura 2.

[091] Mais particularmente, esse processo de solda pode ser utilizado para fabricar um segmento de tubo realizado no metal de base tal como definido acima.

[092] Assim, a presente invenção tem igualmente por objeto um processo de fabricação de tal segmento de tubo.

[093] O processo compreende o fornecimento de uma chapa 1

realizada no metal de base. Tal chapa 1 está representada na figura 3. Ela se estende em uma direção longitudinal L e apresenta bordas longitudinais 3 sensivelmente paralelas à direção longitudinal L. Ela apresenta, por exemplo, uma espessura compreendida entre 2 mm e 18mm.

[094] O processo compreende, ainda, uma etapa que consiste em dobrar essa chapa 1 de modo a posicionar as duas bordas longitudinais 3 uma em oposição à outra, seguida de uma etapa que consiste em soldar entre si as duas bordas longitudinais 3 em oposição utilizando o processo de solda definido acima.

[095] Nesse caso, as partes de peças 12 descritas no âmbito do processo de solda compreendem as bordas longitudinais 3 da chapa 1.

[096] A solda realizada durante essa etapa é uma solda longitudinal.

[097] De preferência, trata-se de uma solda topo a topo.

[098] No fim desse processo, um segmento de tubo 5 é obtido, tal como ilustrado na figura 4, no qual a chapa 1 é dobrada em forma de tubo, e as bordas longitudinais 3 da chapa 1 estão ligadas entre si por um cordão de solda 6 obtido a partir do fio de solda tal como definido acima.

[099] Em uma variante, pelo menos as bordas longitudinais 3 da chapa 1 são realizadas no metal de base. O resto da chapa 1 pode ser fabricado em qualquer material.

[0100] O processo de solda de acordo com a presente invenção pode igualmente ser utilizado para fabricar um tubo 7 a partir de segmentos de tubo realizados no metal de base tal como definido acima.

[0101] Assim, a presente invenção tem igualmente por objeto um processo de fabricação de um tubo 7. Tal tubo 7 está ilustrado na figura 5.

[0102] Durante esse processo, pelo menos dois segmentos de tubos 5 são fornecidos. Esses segmentos de tubo são, por exemplo,

segmentos de tubo 5 obtidos por meio do processo de fabricação tal como descrito acima.

[0103] Cada segmento de tubo 5 é sensivelmente cilíndrico com um eixo M, e apresenta duas extremidades longitudinais 10, espaçadas entre si de ao longo da direção do eixo M.

[0104] Os dois segmentos de tubo 5 são então posicionados de modo que suas extremidades longitudinais 10 estejam dispostas frente a frente ao longo da direção do eixo M desses segmentos de tubo, e então as extremidades longitudinais 10 dos dois segmentos de tubo 5 são soldadas entre si por meio do processo de solda tal como definido acima.

[0105] Nesse caso, as partes de peças 12 definidas no âmbito do processo de solda que compreende as extremidades longitudinais 10 dos segmentos de tubo 5.

[0106] Vantajosamente, nessa etapa, uma solda topo a topo é realizada entre as extremidades longitudinais 10 dos segmentos de tubo 5.

[0107] Quando a etapa de solda é realizada na oficina, uma solda circular é realizada de preferência. Por solda circular, entende-se, de modo clássico, uma solda obtida girando os segmentos de tubo 5 a ser soldados em relação à ferramenta de solda, em particular em relação às tochas de solda.

[0108] Quando a etapa de solda é realizada fora da oficina, por exemplo no sítio de implantação do tubo 7, uma solda orbital é realizada, de preferência. Por solda orbital, entende-se uma solda realizada girando a ferramenta de solda, isto é, em particular as tochas de solda, em relação aos segmentos de tubo 5 a ser soldados.

[0109] Essa etapa de solda é realizada um número de vezes igual ao número de segmentos de tubo 5 a ser soldados para formar o tubo 7 menos um.

[0110] Em variante, esse processo pode ser realizado com

qualquer tipo de segmento de tubo cujas extremidades longitudinais são realizadas no metal de base, qualquer que seja o processo de obtenção do segmento de tubo.

[0111] Opcionalmente, uma linha de fusão é adicionalmente realizada no reverso da solda, isto é, no interior do tubo 7. Essa etapa adicional permite, de modo clássico, melhorar a geometria da solda.

[0112] No fim dessa ou dessas etapas de solda, o tubo 7 é obtido. Esse tubo 7 compreende pelo menos dois segmentos de tubos 5 sucessivos unidos entre si por um cordão de solda 11 obtido a partir do fio de solda tal como definido acima.

[0113] Tal tubo 7 é, por exemplo, um tubo interno de um conduto de transporte de um líquido criogênico, em particular de um conduto de transporte submarino.

[0114] Exemplos de gases naturais transportados são o metano, o gás natural liquefeito, o butano e o propano líquido.

[0115] O processo de solda de acordo com a presente invenção pode igualmente ser utilizado para a fabricação de uma parte de tanque realizada no metal de base.

[0116] A presente invenção tem, portanto, igualmente por objeto um processo de fabricação de pelo menos uma parte de tanque realizada no metal de base tal como definido acima por solda de peças realizadas no metal de base entre si.

[0117] Por parte de tanque, entende-se, por exemplo, uma membrana de revestimento interno de um tanque, ou uma parte de tal membrana.

[0118] As peças utilizadas foram, por exemplo, fabricadas anteriormente por formagem de chapas. Pode se tratar igualmente de chapas cortadas, por sua vez, a partir de tiras apropriadas. As chapas utilizadas

possuem, por exemplo uma espessura compreendida entre 0,2 mm e 10 mm, e vantajosamente compreendida entre 0,5 mm e 1,5 mm.

[0119] As peças são soldadas entre si por meio de processo de solda tal como definido acima.

[0120] Uma parte de tanque que compreende pelo menos duas peças ligadas entre si por um cordão de solda obtido a partir do fio de solda tal como definido acima, é obtida.

[0121] Tal tanque é, por exemplo, um tanque destinado a conter um líquido criogênico, tal como gás natural liquefeito.

### **EXEMPLOS**

[0122] Fios de solda de acordo com a presente invenção foram fabricados utilizando o processo de fabricação do fio de solda descrito acima.

[0123] A tabela 1 resume as experiências que foram realizadas.

[0124] Nessa tabela, os fios de solda que não estão de acordo com presente invenção estão marcados com um asterisco. Assim, nos exemplos 1 a 4 e 12 a 14, a composição química do fio de solda não está de acordo com a presente invenção. Nos exemplos 5 a 11, a composição química do fio de solda está de acordo com a presente invenção.

**TABELA 1**

<b>Composição química do fio de solda em porcentagem em peso</b>									
<b>Exemplo</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>C</b>	<b>Fe</b>
1*	36,0	vestí- gios	1,5	vestí- gios	0,07	0,05	0,02	0,005	resto
2*	36,0	vestí- gios	2,8	vestí- gios	0,08	0,05	0,02	0,004	resto
3*	38,8	vestí- gios	2,8	vestí- gios	0,09	0,05	0,03	0,004	resto
4*	43,2	vestí- gios	2,5	vestí- gios	0,07	0,04	0,02	0,005	resto
5	42,2	vestí- gios	2,8	vestí- gios	0,1	0,05	0,05	0,01	resto
6	42,2	vestí- gios	2,5	0,3	0,09	0,05	0,05	0,004	resto
7	41,2	vestí- gios	3,1	vestí- gios	0,07	0,05	0,02	0,007	resto

<b>Composição química do fio de solda em porcentagem em peso</b>									
<b>Exemplo</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>C</b>	<b>Fe</b>
8	41,2	0,5	3,1	vestí- gios	0,06	0,03	0,02	0,005	resto
9	39,0	vestí- gios	2,5	vestí- gios	0,05	0,02	0,02	0,006	resto
10	40,4	vestí- gios	3,5	traços	0,05	0,03	0,02	0,004	resto
11	43,7	0,3	3,2	0,3	0,07	0,04	0,02	0,004	resto
12*	44,0	vestí- gios	4,5	vestí- gios	0,07	0,02	0,02	0,004	resto
13*	41,5	vestí- gios	1,5	vestí- gios	0,07	0,04	0,02	0,006	resto
14*	41,2	vestí- gios	traços	3,1	0,05	0,04	0,03	0,004	resto

[0125] As composições de níquel + cobalto e titânio + nióbio dos fios de solda de acordo com os exemplos 1 a 13 são mostradas na figura 1. Deve-se notar que os fios de solda de acordo com os exemplos 1 a 4 e 12 e 13 estão fora da área delimitada pelas curvas 01 a 04, ao passo que os fios de solda de acordo com os exemplos 5 a 11 estão dentro dessa área.

[0126] Cada um dos fios de solda de acordo com os exemplos 1 a 14 foi, em seguida, utilizado para realizar uma solda entre duas peças realizadas em um metal de base, cuja composição química é definida na tabela 2 a seguir, e os teores estão expressos em% em peso.

**Tabela 2**

Ni	Mn	Si	Co	C	Cr	S	P	Mo	Fe
36,0	0,34	0,20	0,03	0,0290	0,04	0,0005	0,0022	0,02	resto

[0127] As condições de solda são habituais para a realização de soldas por meio dos tipos de processos de solda descritos acima.

[0128] As propriedades da solda obtida respectivamente com um fio de solda de acordo com cada um dos exemplos 1 a 14 foram medidas. Os resultados dessas medidas estão resumidos na tabela 3 a seguir.

**TABELA 3**

<b>Exemplo</b>	<b>Área de ruptura a 25 °C</b>	<b>Área de ruptura a -163°C</b>	<b>Teor de martensita (%)</b>	<b>Coefficiente médio de dilatação da solda entre -180°C e 0°C (10<sup>-6</sup>/°C)</b>	<b>Resiliência (Kcv) a -196°C (J/cm<sup>2</sup>)</b>
1*	Zona	Zona	>20%	1,7	-

Exemplo	Área de ruptura a 25 °C	Área de ruptura a -163°C	Teor de martensita (%)	Coefficiente médio de dilatação da solda entre -180°C e 0°C ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	Resiliência (Kcv) a -196°C (J/cm <sup>2</sup> )
	fundida	fundida			
2*	Metal de base	Metal de base	>30%	2,3	-
3*	Metal de base	Metal de base	>10%	3,0	-
4*	Metal de base	Zona fundida	<5%	5,4	160
5	Metal de base	Metal de base	<5%	4,9	145
6	Metal de base	Metal de base	<5%	5,0	125
7	Metal de base	Metal de base	<3%	4,5	138
8	Metal de base	Metal de base	<3%	4,6	130
9	Metal de base	Metal de base	<5%	2,6	126
10	Metal de base	Metal de base	<5%	3,6	133
11	Metal de base	Metal de base	<5%	4,2	149
12*	Metal de base	Metal de base	<5%	7,9	-
13*	Zona fundida	Zona fundida	<5%	4,4	135
14*	Metal de base	Metal de base	<5%	4,4	80

[0129] Nessa tabela:

- As duas primeiras colunas indicam a área da montagem soldada na qual ocorre a ruptura durante um ensaio de ruptura sob tração plana realizado de acordo com a norma ASTM E8, respectivamente a uma temperatura de 25°C e a uma temperatura de -163°C.

- A terceira coluna intitulada "Taxa de martensita" contém a fração volumica de martensita da solda, medida após uma deformação da solda de 25% por tração plana interrompida a -196°C em um banho de nitrogênio líquido. Os resultados indicados nessa coluna traduzem a estabilidade da solda à transformação martensítica.

[0130] Mais particularmente, nesse ensaio, são tomados corpos

de prova perpendicularmente à junta soldada, e em seguida duas impressões de microdureza na seção de calibre dos corpos de prova. A distância entre essas duas impressões foi medida antes do ensaio de tração interrompido de modo a obter um comprimento  $L_0$  do corpo de prova, e após o ensaio de tração interrompido de modo a obter um comprimento  $L_1$  do corpo de prova. A deformação plástica gerada a  $-196^\circ\text{C}$  pela máquina de tração é calibrada de tal forma que o alongamento distribuído, dado pela fórmula

$$\frac{L_1 - L_0}{L_1}$$

esteja compreendido entre 22,5% e 27,5%. É realizada, em seguida uma dosagem padrão  $\alpha/\gamma$  por difração dos raios X. A fração volúmica de martensita (designada por  $\tau\%$ ) desenvolvida na seção de calibre do corpo de prova deformado a  $-196^\circ\text{C}$  é medida pela razão

$$\frac{I(110)}{I(110) + I(111)}$$

em que  $I(111)$  é a intensidade integrada do pico de austenita (111), e  $I(110)$  é a intensidade integrada do pico de martensita);

[0131] Deve-se notar que a taxa de martensita  $\tau\%$  do metal de base utilizada definida na tabela 3 permanece inferior a 5% após uma deformação plástica de 25% por tração a  $-196^\circ\text{C}$  tal como definida acima.

- A quarta coluna contém o coeficiente médio de dilatação térmica da solda entre  $-180^\circ\text{C}$  e  $0^\circ\text{C}$  expresso em  $10^{-6}/^\circ\text{C}$ .

[0132] Esse coeficiente foi determinado medindo a variação de comprimento em micrometros entre  $-180^\circ\text{C}$  e  $0^\circ\text{C}$  de um corpo de prova de 50 mm de comprimento a  $0^\circ\text{C}$ . O coeficiente médio de dilatação térmica é então obtido por aplicação da seguinte fórmula:

$$\frac{1}{L_0} \times \frac{L_0 - L_1}{T_0 - T_1}$$

na qual  $L_0 - L_1$  representa a variação de comprimento em micrômetros entre

0°C e -180°C, T<sub>0</sub> est igual a 0 <C e T<sub>I</sub> est igual a -180°C.

- A quinta coluna contém a energia de ruptura por impacto da solda (designada por K<sub>cv</sub>), medida de acordo com a norma NF EM 10045-1. Essa energia de ruptura é expressa em J/cm<sup>2</sup>. Ela traduz a resiliência da solda.

[0133] A tabela 3 mostra que as soldas obtidas por meio dos fios de solda de acordo com os exemplos 5 a 11 apresentam o conjunto das características desejadas, descritas acima em relação à composição do fio de solda.

[0134] De fato, em cada um desses exemplos, a ruptura é feita no metal de base, e não na área fundida, ao mesmo tempo à temperatura ambiente (25°C) e à temperatura criogênica (-163°C). Esses resultados mostram que as propriedades mecânicas da área fundida, isto é, da solda, são superiores às do metal de base (overmatching das propriedades mecânicas) ao mesmo tempo à temperatura ambiente e à temperatura criogênica. É, portanto, possível dimensionar a montagem soldada levando em conta unicamente propriedades do metal de base.

[0135] Ao contrário, nos exemplos 1 e 13 não de acordo com a presente invenção, no qual o teor de titânio + nióbio do fio de solda é igual a 1,5%, e, portanto, inferior a 2,25%, a ruptura ocorre na área fundida à temperatura ambiente. Não há, portanto, o overmatching das propriedades mecânicas da solda à temperatura ambiente nesse caso.

[0136] No exemplo 4 não de acordo com a presente invenção, o teor de níquel+cobalto do fio de solda está compreendido na faixa de acordo com a presente invenção, mas o teor de titânio + nióbio é inferior ao valor limite inferior obtido por aplicação da relação  $0,4167 \times (\text{Ni}+\text{Co}) - 15,0\%$ , que vale 3,01%. Em outras palavras, para o teor de titânio + nióbio do fio de acordo com o exemplo 4, o teor de níquel+cobalto é superior ao valor limite superior definido pela curva C2. Ora, pode-se constatar que a ruptura da montagem

soldada ocorre na área fundida à temperatura criogênica. Não há, portanto, o overmatching das propriedades mecânicas da solda à temperatura criogênica nesse caso.

[0137] No exemplo 13 não de acordo com a presente invenção, o teor de titânio + nióbio é inferior ao limite inferior definido pela relação  $0,4167 \times (\text{Ni} + \text{Co}) - 15,0\%$  que vale 2,31%. Em outras palavras, para o teor de titânio + nióbio do fio de acordo com o exemplo 13, o teor de níquel + cobalto é superior ao valor limite superior definido pela curva C2. Ora, pode-se constatar que a ruptura da montagem soldada ocorre na área fundida à temperatura criogênica. Não há, portanto, o overmatching das propriedades mecânicas da solda à temperatura criogênica.

[0138] Para os exemplos 5 a 11 de acordo com a presente invenção, a taxa de martensita ( $\tau\%$ ) após uma deformação por tração de 25% a  $-196^\circ\text{C}$  é inferior a 5%. Assim, a estabilidade à transformação martensítica da solda de acordo com os exemplos 5 a 11 é pelo menos igual à do metal de base utilizado.

[0139] Nos exemplos 1 a 3, nos quais o teor de níquel + cobalto do fio de solda é inferior ao limite inferior de acordo com a presente invenção, delimitado pela curva 01 para os teores de Ti + Nb respectivos desses fios, é também constatado que a taxa de martensita após uma deformação de 25% a  $-196^\circ\text{C}$  é muito superior a 5%. Assim, a estabilidade à transformação martensítica da solda de acordo com os exemplos 1 a 3 é estritamente inferior à do metal de base utilizado.

[0140] Além disso, em cada um dos exemplos 5 a 11, foi medido um coeficiente médio de dilatação térmica da solda inferior a  $7,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , isto é, próximo do coeficiente do metal de base.

[0141] No exemplo 12 não de acordo com a presente invenção, o teor de titânio + nióbio do fio de solda é superior a 3,75%. Foi constatado que o

coeficiente médio de dilatação térmica da solda obtida com o fio de solda de acordo com o exemplo 12 é superior a  $7,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

[0142] Pode-se constatar que, nos exemplos 5 a 11, a energia de ruptura por impacto do corpo de prova a  $-196^{\circ}\text{C}$  (temperatura do nitrogênio líquido) é superior a  $120 \text{ J}/\text{cm}^2$ . Assim, a solda realizada por meio do fio de solda de acordo com os exemplos 5 a 11 apresenta uma ductilidade elevada, de acordo com a ductilidade desejada, o que limita os riscos de ruptura frágil da solda.

[0143] Finalmente, o fio de solda de acordo com o exemplo 14 não de acordo com a presente invenção apresenta um teor de nióbio superior a 0,50%. Foi constatado que a solda obtida por meio desse fio apresenta uma ductilidade baixa à temperatura criogênica, uma vez que sua resiliência é igual a  $80 \text{ J}/\text{cm}^2$  a  $-196^{\circ}\text{C}$ . A solda assim formada é, portanto, frágil.

[0144] As junções de peças em liga Fe-36Ni soldadas entre si por meio do fio de solda de acordo com a presente invenção são particularmente vantajosas.

[0145] De fato, graças ao overmatching das propriedades mecânicas da solda a temperatura ambiente e criogênica, o dimensionamento da montagem pode ser realizado com base nas propriedades do metal de base, sem levar em conta as propriedades da junta soldada.

[0146] Além disso, o melhoramento das características mecânicas das juntas soldadas, devido ao uso do fio de solda de acordo com a presente invenção, melhora de modo muito significativo a resistência à fadiga das soldas à temperatura criogênica. Ensaio de fadiga realizadas em tração plana alternada em corpos de prova prismáticos usados perpendicularmente às soldas, com um razão de tração  $R = 0,1$  (razão entre a força máxima e a força mínima), mostram um aumento do tempo de vida em um fator 10 e um aumento de mais de 30% da força máxima à ruptura até 500 000 ciclos das

juntas soldadas obtida com o fio de solda de acordo com a presente invenção em relação às juntas soldadas obtidas com fios de solda conhecidos de liga Fe-36Ni.

[0147] Além disso, a junta soldada apresenta um coeficiente médio de dilatação térmica baixo, próximo do coeficiente do metal de base, o que é vantajoso quando a montagem se destina a conter um líquido criogênico. A adaptação dos coeficientes de dilatação térmica entre o metal de base e a solda atenua as tensões residuais no interior das soldas e, conseqüentemente, aumenta sua resistência à fadiga, em particular nas variações de temperaturas geradas nas fases de carregamento ou descarregamento do líquido criogênico.

[0148] Além disso, graças à ductilidade melhorada da junta soldada, o risco de ruptura frágil da montagem na junta soldada em caso de acidente e, em particular, em caso de impacto, é limitado. Essa ductilidade melhorada permite, portanto, em particular, reparar eventuais vazamentos que resultam de fissuras que aparecem na junta soldada antes da propagação dessas fissuras. A junta soldada obtida por meio do fio de solda de acordo com a presente invenção está assim de acordo com a especificação conhecida de “vazamento antes da ruptura”, geralmente designada pelo termo inglês “leak-before-break”.

[0149] Finalmente, os teores mais elevados de níquel e titânio e a estabilidade da junta soldada à transformação martensítica permitem reduzir a velocidade de corrosão atmosférica das juntas soldadas obtidas por meio do fio de solda de acordo com a presente invenção em relação às juntas soldadas realizados com fios de solda conhecidos de liga Fe-36Ni.

**REVINDICAÇÕES**

1. FIO DE SOLDA, destinado para ser utilizado para soldar partes de peças entre si, as partes apresentam a seguinte composição, em % em peso:

$$35,0\% \leq \text{Ni} \leq 37,0\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{C} \leq 0,10\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{Mn} \leq 0,60\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{P} \leq 0,025\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{S} \leq 0,025\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{Si} \leq 0,35\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{Cr} \leq 0,50\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{Mo} \leq 0,50\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{Co} \leq 0,50\%;$$

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração,

o fio de solda caracterizado por ser realizado em uma liga que consiste, em % em peso:

$$38,6\% \leq \text{Ni+Co} \leq 45,0\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{Co} \leq 0,50\%;$$

$$2,25\% \leq \text{Ti+Nb} \leq 0,8667 \times (\text{Ni+Co}) - 31,20\% \text{ se } 38,6\% \leq \text{Ni+Co} \leq 40,33\%;$$

$$2,25\% \leq \text{Ti+Nb} \leq 3,75\% \text{ se } 40,33\% \leq \text{Ni+Co} \leq 41,4\%;$$

$$0,4167 \times (\text{Ni+Co}) - 15,0\% \leq \text{Ti+Nb} \leq 3,75\% \text{ se } 41,4\% \leq \text{Ni+Co} \leq 45,0\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{Nb} \leq 0,50\%;$$

$$0,01\% \leq \text{Mn} \leq 0,30\%;$$

$$0,01\% \leq \text{Si} \leq 0,25\%;$$

$$\text{traços} \leq \text{C} \leq 0,05\%;$$

traços  $\leq$  Cr  $\leq$  0,50%;

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração.

2. FIO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo teor de nióbio do fio de solda ser inferior ou igual a 0,01% em peso.

3. FIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 2, caracterizado pelo teor de cobalto do fio de solda ser inferior ou igual a 0,10% em peso.

4. FIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo teor de carbono do fio de solda ser inferior ou igual a 0,015% em peso.

5. FIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado por ser realizado em uma liga que consiste, em % em peso:

$40,0\% \leq \text{Ni} + \text{Co} \leq 42,0\%$ ;

$2,60\% \leq \text{Ti} + \text{Nb} \leq 3,40\%$ ;

traços  $\leq$  Nb  $\leq$  0,01%;

traços  $\leq$  Co  $\leq$  0,10%;

$0,01\% \leq \text{Mn} \leq 0,10\%$ ;

$0,01\% \leq \text{Si} \leq 0,10\%$ ;

traços  $\leq$  C  $\leq$  0,015%;

traços  $\leq$  Cr  $\leq$  0,10%;

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da fabricação.

6. FIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado por ser realizado em uma liga que consiste, em % em peso:

$41,0\% \leq \text{Ni} + \text{Co} \leq 42,0\%$ ;

$2,60\% \leq \text{Ti} + \text{Nb} \leq 3,40\%$ ;

traços  $\leq$  Nb  $\leq$  0,01%;

traços  $\leq$  Co  $\leq$  0,10%;

0,01%  $\leq$  Mn  $\leq$  0,10%;

0,01%  $\leq$  Si  $\leq$  0,10%;

traços  $\leq$  C  $\leq$  0,015%;

traços  $\leq$  Cr  $\leq$  0,10%;

o restante é constituído de ferro e de impurezas inevitáveis que resultam da elaboração.

7. FIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo diâmetro estar compreendido entre 0,5 mm e 1,5 mm, e de preferência compreendido entre 0,8 mm e 1,2 mm.

8. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UM FIO DE SOLDA, conforme definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizado pelo processo compreender as seguintes etapas:

- fornecimento de um produto semiacabado realizado em uma liga que possui a composição do fio de solda, conforme definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 7;
- transformação a quente desse produto semiacabado para formar um fio; e
- transformação do fio em fio de solda, de diâmetro inferior ao do fio, a transformação compreende uma etapa de trefilação.

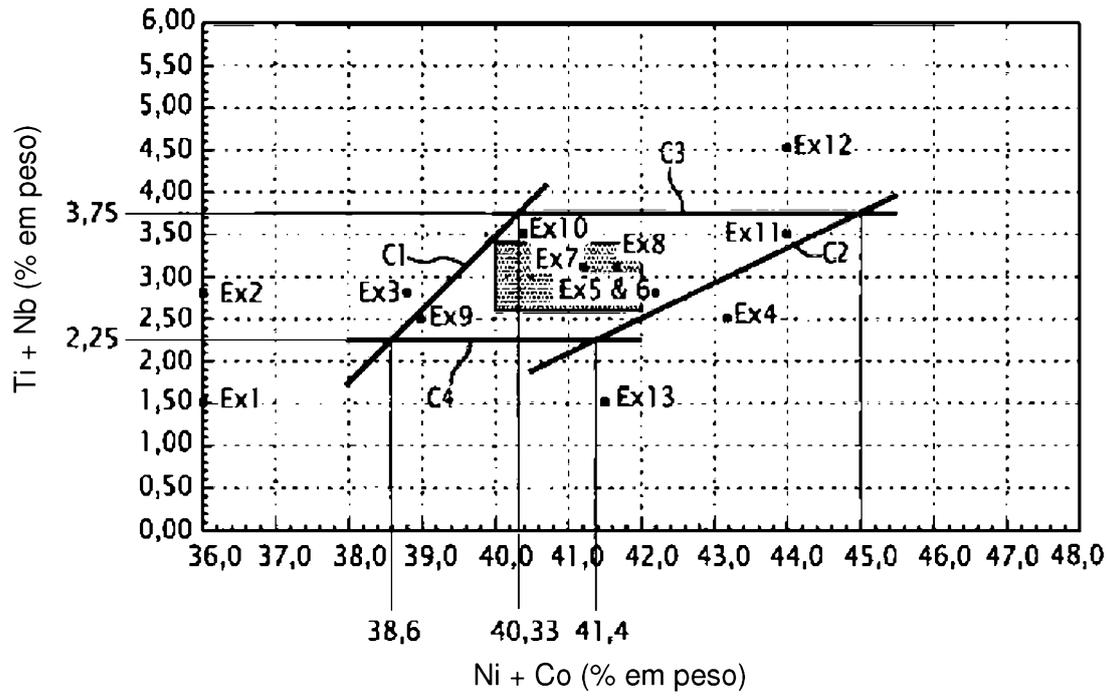
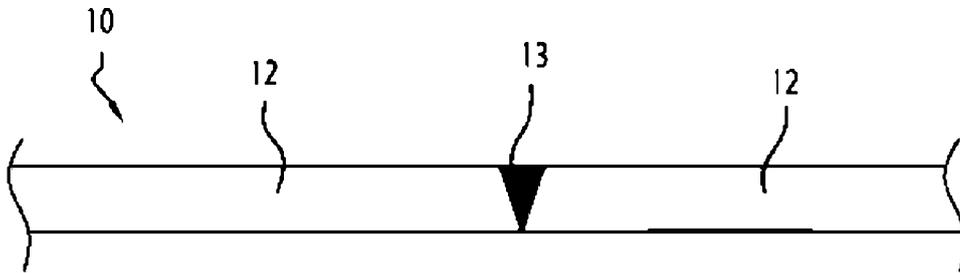
9. PROCESSO, de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pela transformação do fio em fio de solda compreender a decapagem do fio, e o enrolamento do fio decapado em bobina, e a etapa de trefilação consistir em trefilar o fio decapado enrolado em bobina.

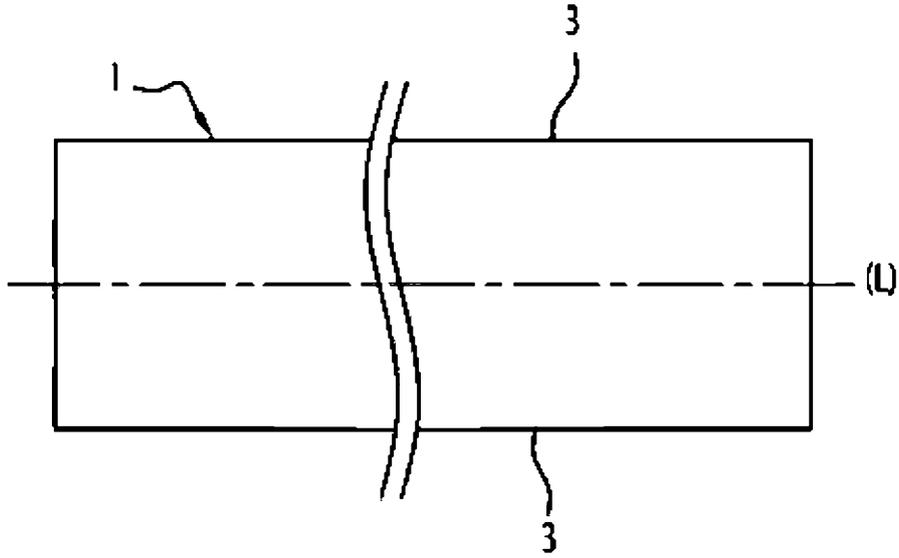
10. PROCESSO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 8 a 9, caracterizado pelo produto semiacabado ser um bilete ou um lingote.

11. PROCESSO, de acordo com qualquer uma das

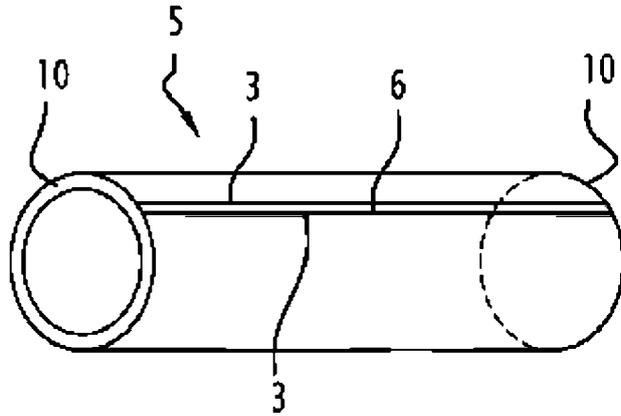
reivindicações 8 a 10, caracterizado pelo fio possuir um diâmetro compreendido entre 5 mm e 21 mm, e em particular igual a 5,5 mm.

12. PROCESSO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 8 a 11, caracterizado pela transformação a quente do produto semiacabado para formar o fio compreender a laminação a quente do produto semiacabado para reduzir sua seção e a laminação a quente do produto semiacabado a seção reduzida para formar o fio.

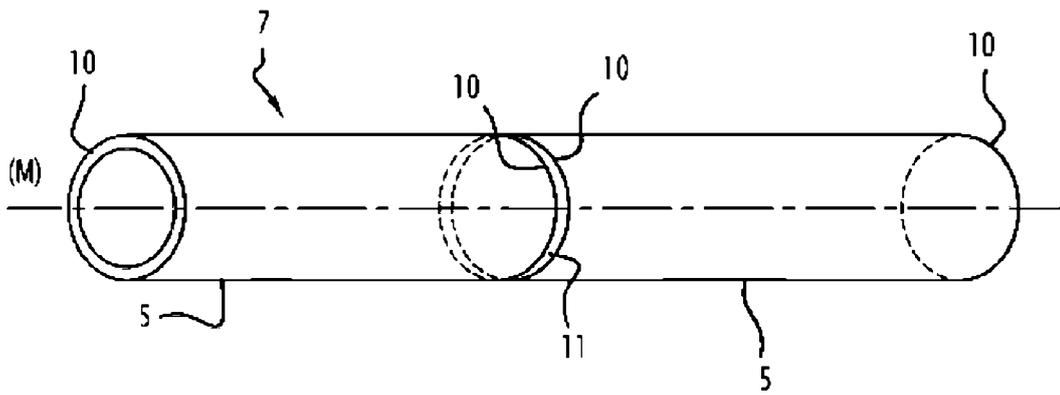
**Fig. 1****Fig. 2**



**Fig. 3**



**Fig. 4**



**Fig. 5**