

ASPECTOS TÉCNICOS DA SUPERLIGA INCONEL 718 UTILIZADA PARA FABRICAÇÃO DE TUBOS CENTRIFUGADOS EMPREGADOS NA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO EM ÁGUAS PROFUNDAS¹

Ivaldo de Assis do Nascimento²
Assis Moura Nascimento³
André Luís de Brito Baptista⁴
Leandro André Chaves Baptista⁵
Rosa Maria Sales da Silveira⁶

Resumo

A Inconel 718 é uma superliga do grupo níquel – ferro consistindo, basicamente, de uma matriz austenítica γ (cfc), com fases intermetálicas e carbonetos que precipitam durante a solidificação e tratamentos térmicos. Esta liga tem inúmeras aplicações em uma ampla faixa de temperaturas, Para a maioria das aplicações ela é conformada mecanicamente em tarugos, chapas, tubos, forjados em geral e fundida. Uma das aplicações em estudos da Inconel 718 é na confecção de tubos para a indústria de petróleo e gás. No presente trabalho se faz um levantamento dos principais aspectos técnicos que envolvem esta liga.

Palavras-chave: Liga; Nickel; Inconel.

TECHNICAL ASPECTS OF INCONEL SUPERALLOY 718 USED TO CENTRIFUGALL CAST PIPE FABRICATION ON DEEP WATER OIL EXPLORATION

Abstract

Inconel 718 is a super alloy in the nickel group – iron consisting, basically, of an austenitic γ (cfc) matrix, with intermetallic and carbonites stages that precipitate during solidification and thermal treatments. This alloy has countless uses in a wide temperature range. Mostly used in mechanically shaped dowels, sheets, pipes and forgings in general. This work carried out a survey of the main technical features that evolve in this alloy.

Key words: Alloy; Nickel; Inconel.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Diretor Técnico e Coordenador, Divisão de Ensino e Pesquisa, Spectru Ltda., RJ, Brasil.

³ Técnico de Desenvolvimento Especializado em Sistemas Informatizados, Responsável Técnico, Divisão de Informática e Informações Tecnológicas, Spectru Instrumental Científico Ltda., RJ, Brasil.

⁴ Administrador de Empresas Especializado, Responsável Técnico, Lab. de Metalurgia Extrativa, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense; e Pesquisador Científico, Divisão de Metalurgia, Spectru Instrumental Científico Ltda., RJ, Brasil.

⁵ Técnico Especializado, ETPC/VR, Escola Técnica Pandiá Calogeras, Curso de Eletrônica, Pesquisador do Programa Universidade/Empresa/Escola, RJ, Brasil.

⁶ Engenheira Metalúrgica, Pesquisadora do Laboratório de Metalurgia Extrativa, EEIMVR, UFF, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Uma aplicação crítica de materiais, está em sistemas de alta temperatura, acima de 540°C, tais como: componentes para turbinas de aviões, indústrias de geração de energia elétrica, processamento químico e nuclear. As ligas usadas para estas aplicações são base; ferro, cobalto ou níquel. As ligas base níquel são as mais utilizadas.

A aplicabilidade do níquel, para tais ligas, reside nas seguintes propriedades: seu elevado ponto de fusão (1.453°C), adequada resistência à corrosão e capacidade de dissolver, de maneira limitada, um certo número de elementos metálicos, que servem para reforçar ou melhorar suas propriedades a corrosão e à altas temperaturas.⁽¹⁻⁴⁾

As ligas Níquel-Cromo-Ferro, têm sua aplicabilidade baseada na presença de cromo e outros elementos de liga. O cromo é constituinte essencial para conferir resistência à corrosão, sendo normalmente encontrado nestas ligas, com teor de 15%-30%, os outros elementos, que se presentes, estão normalmente num nível menor, variando entre 3% a 20%, e estão relacionados com o aumento da resistência à deformação em altas temperaturas, dentro desta gama estão as ligas níquel-cromo-ferro, comumente conhecidas por ligas Inconel.

A superliga Inconel 718 difere da maioria das outras pelo fato de que nela os principais elementos endurecedores não são o alumínio e o titânio. Em lugar de γ' [Ni₃ (Al, Ti)], presente na maioria das superligas, a liga 718 é endurecida pelo precipitado γ'' que contém uma quantidade considerável de Nióbio.

Desenvolvida no início dos anos 60, aproveita a baixa velocidade de envelhecimento de γ'' para ser usada em partes que necessitam de boas propriedades mecânicas à médias temperaturas e partes a serem soldadas.

Este tipo de material tem sido amplamente utilizado nas chamadas “partes quentes” de equipamentos aeronáuticos e industriais, como por exemplo em turbinas a gás (discos, palhetas, direcionadores de fluxo, etc.), trocadores de calor, válvulas de exaustão e diversos aplicativos aeronáuticos, devido às suas características de resistência à fadiga e, principalmente, resistência à corrosão em temperaturas elevadas. Com isto, pesquisas têm, cada vez mais, se voltado ao estudo das características fundamentais dos sistemas austeníticos, já que estes se caracterizam como a principal estrutura das ligas à base de níquel.

2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

2.1 Superligas Base Níquel

As ligas de níquel conhecidas possuem composição similar entre si, diferindo apenas em alguns elementos das Figuras 1 e 2. Estes elementos, no entanto, são fundamentais para a diversidade de propriedades que estas ligas podem apresentar. Estando situados entre os grupos II e VIIIA da tabela periódica, os elementos dos grupos V, VI e VIIA (Ni, Co, Fe, Cr, Mo e W) caracterizam-se como formadores da matriz cfc austenítica, os grupos III, IV e V (Al, Ti, Nb, Hf e Ta) como formadores de precipitados do tipo Ni₃X e finalmente os dos grupos II, III e IV (B, C e Zr) como aqueles que segregam nos contornos de grão.⁽¹⁾

Denominação Altona EA	Equivalência	Denomi- nação Comercial	Propriedades Mecânicas mínimas(%)								Propriedades Mecânicas Mínimas			Dureza HB
			C	Cr	Ni	Mo	V	W	Fe	Outros	Lim. Escoam. (MPa)	Lim. Resist. (MPa)	Alongam. (%)	
07920	N12MV 2.4882	Hastelloy B	≤ 0,12	≤ 1,0	Bal.	28,0	04	—	5,0	—	≥ 275	≥ 525	≥ 6,0	160 220
07955	2.4685	Hastelloy B1	≤ 0,03	≤ 1,0	Bal.	28,0	—	—	≤ 6,0	—	250	500	20,0	150 210
07948	~ 2.4617	Hastelloy B2	≤ 0,02	≤ 1,0	Bal.	28,0	—	—	≤ 2,0	—	250	500	25,0	140 200
07909	CW12MW 2.4883	Hastelloy C	≤ 0,12	16,5	Bal.	17,0	0,3	4,5	6,0	—	≥ 275	≥ 495	≥ 4,0	140 200
07924	2.4686	Hastelloy C1	≤ 0,03	16,5	Bal.	17,0	—	—	≤ 7,0	—	250	450	20,0	140 200
07946	~ 2.4610	Hastelloy C4	≤ 0,02	16,0	Bal.	16,0	—	—	≤ 3,0	—	250	450	20,0	140 200
07945	~ 2.4602	Hastelloy C22	≤ 0,02	21,5	Bal.	13,5	—	3,0	4,0	—	250	450	20,0	140 200
07934	~ 2.4819	Hastelloy C276	≤ 0,02	16,5	Bal.	16,0	—	4,0	5,0	—	250	450	20,0	140 200
07947	—	Hastelloy D	≤ 0,12	—	Bal.	—	—	—	≤ 2,0	Si 9,0 Cu 3,0	—	—	—	250 350
07941	CW6MC 2.4856	INCONEL 625	≤ 0,06	21,5	61,0	9,0	—	—	2,5	Nb+Ta 3,65	≥ 275	≥ 485	≥ 25	180 320
07906	CZ 100 2.4170	—	≤ 1,0	—	≥ 95,0	—	—	—	≤ 1,0	—	≥ 125	≥ 345	≥ 10,0	150 200

Figura 1. Composição e Propriedades.⁽²⁾

EA-07920 EA-07955 EA-07948	Ligas à base de Níquel e Molibdênio especialmente indicadas para processamento de ácido clorídrico em todas as concentrações e temperaturas, inclusive a temperatura de ebulição.
EA-07909 EA-07924 EA-07946 EA-07945 EA-07934	Ligas à base de Níquel, Cromo e Molibdênio, especialmente indicadas para ácidos oxidantes e misturas de ácidos em temperaturas elevadas.
EA-07947	Liga à base de Níquel e Silício, indicada para ácido Sulfúrico em todas as concentrações e temperaturas, e ainda a ácidos orgânicos.
EA-07941	Liga à base de Cromo-Níquel-Molibdênio com adição de nióbio, altamente resistente a corrosão por pitting e por fresta, recomendada para uso em meios extremamente corrosivos. A Liga não fragiliza em temperaturas sub-zero e mantém excelentes propriedades de fluência em altas temperaturas.
EA-07906	Liga de Níquel resistente a altas concentrações de meios alcalinos em temperaturas elevadas, inclusive soda cáustica fundida.

Figura 2. Aplicação.⁽²⁾

Comumente, as ligas à base de níquel apresentam quantidades entre 10% a 20% de cromo, um máximo de 8% de alumínio e titânio, de 5% a 10% de cobalto, pequenas proporções de boro, zircônio e cobalto e adições opcionais de molibidênio, tungstênio, nióbio e háfnio (Tabela 1). Elementos fragilizantes como silício, fósforo, oxigênio e nitrogênio, que caracterizam-se como remanescentes do processo de fabricação, devem ser severamente controlados através de tratamentos apropriados.

Tabela 1. Liga Inconel 718^(1,3)

Composição química da Inconel 718			
Composição Nominal:			
C – 0,10 máx.	Si – 0,35 máx.	Mn – 0,40 máx.	P – 0,010 máx.
S – 0,010 máx.	Cr – 19,00	Ni – Resto	Mo – 3,00
Ti – 1,00	Al – 0,60	Co – 1,0 máx.	Cu – 0,30 máx.
Fe – 18,5	Nb – 5,15		

A Tabela 2 ilustra o efeito dos elementos utilizados nas superligas de níquel.

Tabela 2. Efeito dos elementos de liga^(1,3)

EFEITO	ELEMENTOS
Aumento de resistência mecânica em solução sólida	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
Formadores de carbonetos do tipo MC	W, Ta, Ti, Mo, Nb
Formadores de carbonetos do tipo M7C3	Cr
Formadores de carbonetos do tipo M23C6	Cr, Mo, W
Formadores de carbonetos do tipo M6C	Mo, W
Formadores de carbonitretos M(CN)	C, N
Formadores de γ' Ni ₃ (Al, Ti)	Al, Ti
Eleva a temperatura solvus de γ'	Co
Formam precipitados endurecedores e/ou intermetálicos	Al, Ti, Nb
Formadores de γ'' (Ni ₃ Nb)	Nb
Aumentam a resistência à oxidação	Al, Cr
Melhoram a resistência à corrosão à quente	La, Th
Resistência à sulfetação	Cr
Aumentam a ductilidade de ruptura	B, Zr
Causam segregação nos contornos de grãos	B, C, ZR

Além disto, podemos destacar outras propriedades interessantes de alguns elementos:⁽³⁾

- W e Mo – aumentam a resistência da matriz. O Mo também auxilia os elementos formadores de γ' ;
- B e Zr – como mencionado na tabela, se em pequenas proporções (0,003% B e 0,03% Zr), estes elementos evitam a formação de carbonatos contínuos no contorno de grão, além de serem benéficos para a ductilidade e resistência à ruptura em ligas não fundidas. Em ligas fundidas, as proporções de B e Zr podem chegar até 0,01% e 0,1%, respectivamente;
- Nb – melhora as propriedades de fundição, além de formar fases intermetálicas enrijecedoras (γ'');
- Hf – em pequenas proporções (de 1,0% até 1,5%), aumentam a temperatura intermediária de ductilidade, contribuindo com isto para o desenvolvimento da solidificação direcional, diminuindo então a tendência à formação de trincas longitudinais entre grãos DS (directional solidification); e
- Rh – aumenta a resistência de ligas SC (single cristal); permite que a fração de Al e Ti no material seja aumentada, diminuindo com isto a taxa de coalescimento de precipitados na liga.

3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos também irão depender da aplicação final da peça, existindo dois ciclos mais comuns:⁽⁴⁾

- para se obter uma combinação ótima de propriedades de resistência à tração à temperatura ambiente e a alta temperatura, com ductilidade em fluência aceitável.
 - solubilização: a 950°C por 1h, resfriamento ao ar;
 - envelhecimento intermediário: aquecer até 720°C por 8h, e resfriar ao forno até 620°C a uma taxa de 50°C por hora; e
 - envelhecimento final: manter a 620°C e resfriar ao ar por 10h.
- para ductilidade em resistência à tração ótima, em barras grossas, onde ductilidade em fluência não é requerida.
 - solubilização: a 1.065°C por 1h, resfriamento ao ar;
 - envelhecimento intermediário: aquecer até 760°C por 8h, e resfriar ao forno até 650°C a uma taxa de 50°C por hora; e
 - envelhecimento final: manter a 650°C e resfriar ao ar por 10h.

4 MICROESTRUTURA

A variedade química apresentada pelas superligas em geral, possibilita uma gama de fases e, conseqüentemente, de microestruturas capazes de proporcionar a estes materiais uma ampla diversidade de propriedades termo-mecânicas. Esta diversidade de propriedades, conseguida através da relação entre as fases presentes na estrutura, é uma das características mais marcantes destes materiais (Figura 3).

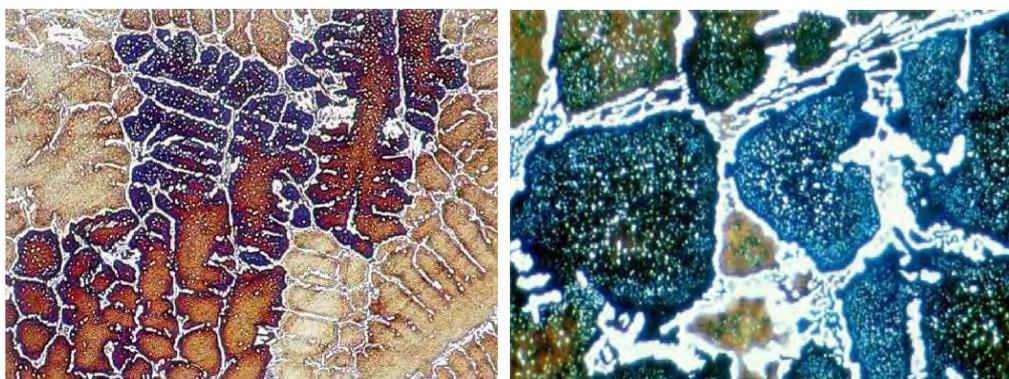


Figura 3. Aspecto micrográfico da superliga 718 bruta de fusão. (500X).⁽¹⁾

Especialmente nas superligas de níquel, podemos destacar oito estruturas características, as quais são descritas a seguir.⁽⁵⁾

- Matriz gama (γ) – a fase contínua das ligas à base de níquel caracteriza-se como uma estrutura do tipo cfc austenítica, com alta porcentagem de elementos de solução sólida como Co, Cr, Mo e W;
- Gama linha (γ') – principal fase enrijecedora das ligas à base de níquel, caracterizada como precipitados coerentes em relação à matriz gama (desajuste de 0 a 0,5% em relação à matriz austenítica), obtidos após adição de quantidades de Al e Ti. Geralmente apresenta-se em altas proporções, as quais podem alcançar valores superiores a 70% em volume em novas ligas;

- Gama duas linhas (γ'') - principal fase enrijecedora das superligas do tipo Inconel 718, caracterizada como precipitados coerentes (em forma de disco). Ocorre após adição de proporções de Nb à matriz, dando origem à Ni₃Nb;
- Fase Eta (η) – encontrada em quase todas as superligas (Fe, Co e Ni) com altos índices de Ti e Al, após longos tempos de serviço;
- Carbonetos – o carbono, em proporções de aproximadamente 0,05% a 0,2%, combina-se com elementos reativos e refratários, como por exemplo Ti, Ta e Hf, formando carbonetos do tipo MC. Estes, por sua vez, após tratamentos térmicos e certo tempo de serviço, começam a se decompor, dando origem a novas estruturas do tipo M₂₃C₆ e M₆C, que costumam segregar nos contornos de grão;
- Gama linha do contorno de grão – nas ligas de maior resistência, certos tratamentos térmicos e até mesmo o tempo de exposição em serviço podem desenvolver um filme de γ' ao longo do contorno de grão. Acredita-se que este filme melhora as propriedades de resistência à ruptura;
- Boretos – ocorrem como partículas dispersas no contorno de grão; e
- Fase do tipo TCP (*topologically close packed*) – sob certas condições, fases com estruturas aciculares, como μ , σ e Laves podem ser formada. Estas fases são prejudiciais ao material, pois diminuem a resistência à ruptura e a ductilidade dos mesmos.

5 A METALURGIA DA SUPERLIGA INCONEL 718

A liga 718 possui uma composição química relativamente complexa (Tabela 1).

A resistência a alta temperatura é obtida através de seu alto conteúdo de níquel, endurecido pela solução sólida do molibdênio e cromo. Além disso, como foi dito na introdução, a liga 718 é endurecida pela precipitação do γ'' , composto intermetálico coerente e composição básica Ni₃ (Al, Ti, Nb). Além de γ'' , a liga pode conter, também, o precipitado ortorrômbico Ni₃Nb, o qual é estável até temperatura de 1.000°C. Este precipitado, produto da transformação de γ'' , se forma após longos tempos de exposição ou acima da temperatura de envelhecimento. Desde que Ni₃Nb não é coerente com a matriz; ele é prejudicial à resistência da liga, devendo ser evitado. Podem ainda ser formados carbonetos, nitretos e fases “Laves” que são altamente prejudiciais à ductilidade e resistência da liga 718, formando-se quando não existe um controle adequado da composição química da liga, ou devido às instabilidades ocasionadas por práticas sofríveis de homogeneização de temperatura durante os aquecimentos para o forjamento.

Os carbonetos podem ser benéficos ou prejudiciais dependendo de sua composição e, posteriormente, de sua forma. Um balanço e controle rígidos da composição química são, portanto, muito importantes, daí a vantagem da fusão em forno de indução a vácuo. Outro fator que pode influenciar ainda o aparecimento de fases prejudiciais é a temperatura de solubilização no tratamento térmico, que não deve ultrapassar aquelas citadas anteriormente.

As propriedades da liga 718 são consideradas excelentes para ligas desta classe.

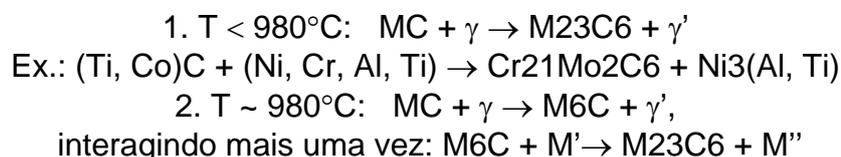
Outra característica importante na liga 718 é a sua boa soldabilidade, que se deve à baixa velocidade de envelhecimento de γ'' . Ao contrário das outras superligas endurecidas por γ' , cuja velocidade de envelhecimento é bem maior, as peças em

liga 718 podem ser soldadas sem que apareçam trincas por tensões oriundas do envelhecimento, resultante das condições de soldagem, aumentando consideravelmente o campo de aplicação da liga 718.^(1,3,5)

5.1 Tipos e Morfologia dos Carbonetos

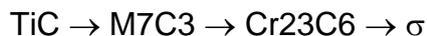
Os carbonetos nas superligas podem se dividir em três tipos, sendo MC, M₂₃C₆ e M₆C, que apresentam morfologias e características distintas.

Carbonetos do Tipo MC - Morfologia similar à estrutura cfc. Formam-se durante o resfriamento da liga como partículas discretas e heterogêneas em posições intergranulares ou transgranulares, geralmente interdendriticamente. Não possuem relação de orientação definida com a matriz. São a fonte de carbono que será usada posteriormente pela liga durante tratamento térmico ou serviço. São muito estáveis devido à estrutura densa e fechada. As reações mais comuns de transformação e decomposição de carbonetos durante serviço são abaixo relacionadas:



Obs.: Equações não balanceadas.

Reações formadoras de fases fragilizantes também podem ocorrer, como por exemplo:



A reação I se caracteriza como a mais importante pelo motivo de ocorrer mais freqüentemente e, também, por promover a formação de γ' e de carbonetos compactos, que dificultam o deslizamento dos contornos de grãos.

Carbonetos do tipo M₂₃C₆ - Ocorrem geralmente em ligas com percentagem de Cr entre moderada e alta. As posições preferenciais são os contornos de grãos, linhas de maclas, falhas de empilhamento e extremidades de maclas. Morfologia característica: ocorrem como blocos irregulares e descontínuos, mas às vezes como partículas achatadas ou formas geométricas. Formam-se a partir do MC degenerado, ou de proporções de C residual na matriz. A estrutura é cúbica complexa, similar à TCP da fase fragilizante σ .

Efeitos nas superligas:

- positivo: podem inibir o deslizamento do contorno de grão, promovendo a resistência à ruptura; e
- negativo: a falha de ruptura pode se iniciar pela fratura destas mesmas partículas ou pela decoesão das interfaces com a matriz.

Obs.: Estruturas celulares de M₂₃C₆ que também iniciam falhas de ruptura prematuras, podem ser evitadas através de tratamento térmico e controle químico.

Carbonetos do Tipo M₆C - Precipitam em forma de blocos nos contornos de grãos ou em forma de agulhas de Widmannstätten intragranular, sendo que esta última forma de carboneto deve ser evitada para se aumentar a ductilidade e a resistência à ruptura do material. Possuem estrutura cúbica complexa. Formam-se em temperaturas um pouco maiores que as de M₂₃C₆ (815°C a 980°C). Sua formação é bastante similar ao do M₂₃C₆, sendo que ocorrem quando a quantidade de W e Mo na liga é maior que o normal (superior a 6%-8%), tomando então o lugar do Cr

presente em outros carbonetos. Controlam o tamanho de grão devido à sua estabilidade em temperaturas mais elevadas nas ligas não fundidas. ^(1,3,5)

5.2 Fundição

A fabricação de componentes fundidos segue o esquema apresentado nas Figuras 4 e 5. A sucata selecionada mais as adições e ligas são cuidadosamente preparadas secas e limpas, são fundidas em fornos elétricos e vazadas em moldes de areia especiais ou em moldes metálicos (coquilhas).

O processo de fabricação de tubos centrifugados, consiste basicamente, em verter um metal em fusão no interior de uma coquilha na posição horizontal, que gira em alta velocidade. Esta coquilha internamente é pré-aquecida (em temperatura ajustada), escovada e revestida por tinta refratária (de composição específica) aplicada por spray através de uma lança, que deposita o material em espessura padronizada. O metal líquido com peso calculado é introduzido no molde através de um funil. Terminado o vazamento, a coquilha é resfriada e o tubo é retirado do seu interior por um êmbolo.

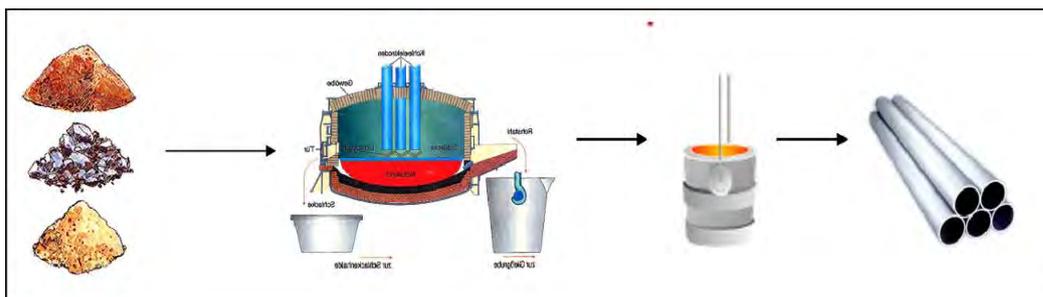


Figura 4. Esquema de fundição e vazamento da liga.

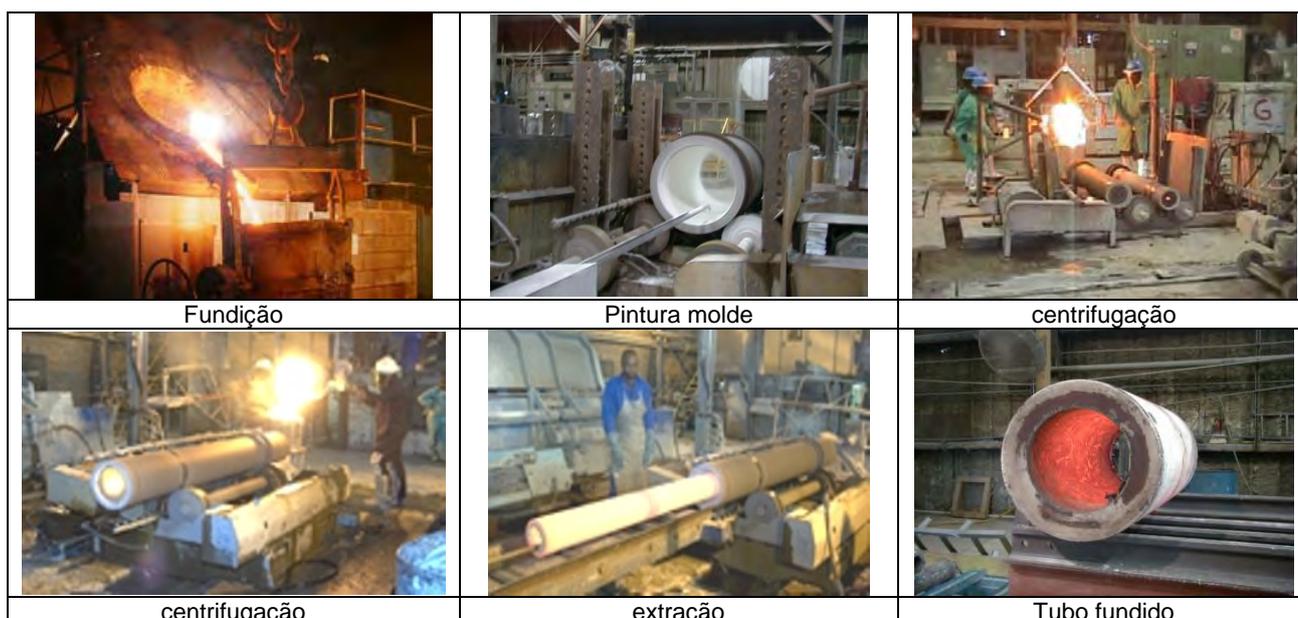




Figura 5. Fabricação de tubos centrifugados.

6 CONCLUSÃO

As condições apresentadas por esta liga , qualifica a mesma a ser utilizada em peças fundidas especiais e em tubos centrifugados, principalmente nos seguimentos químico, petrolífero e de papel e celulose.

REFERÊNCIAS

- 1 Ross, E.W. and Sims, C.T., Nickel Base Alloys - Superlloys II, Sims, Stoloff and Hage (eds) Wiley, New York, 1987 – pp-133.
- 2 Catologo Técnico Fundição Altona
- 3 Mankins, W.L., Nickel and Nickel Alloys in “Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials”, Vol.2, 10th ed., Metals Handbook, ASM International, 1990 – pp428-445.
- 4 Molloy, W.J., “The Expanding Role of Investment – Cast Nickel – Based Superalloys for High emperature Service”, Nickel Development Institute, USA,1988.
- 5 Sims, C. T. “Superalloys: Genesis and Character” - Superalloys II, Sims, Stoloff and Hage (eds.), Wiley, New York, 1987 – pp 3-28.