

**Universidade de São Paulo (USP)**  
**Escola de Engenharia de Lorena (EEL)**  
**Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)**

***Proposta de pesquisa de doutorado***

**Análise do comportamento em fluência e de oxidação da superliga MAR-M247  
modificada com Nb e produzida por solidificação direcional**

Candidata: **Rafaela dos Santos Silva**

Orientador: **Prof. Dr. Carlos Ângelo Nunes**

**Lorena,**

**maio de 2021**

## 1 INTRODUÇÃO

As superligas surgiram na década de 1940 durante a II Guerra Mundial, sendo desenvolvidas para aplicações que exigiam elevada resistência à fadiga, à fluência e à oxidação/corrosão em altas temperaturas. Estas ligas apresentam alto desempenho em temperaturas próximas a de fusão, com maior resistência à deformação em comparação com a maioria das demais ligas. Atualmente, as superligas atendem uma ampla gama de aplicações, como em componentes de motores a jato, de motores de automóveis, veículos espaciais e também nas indústrias nucleares e químicas (AKANDE et al., 2021; GOWTHAMAN; JEYAKUMAR, 2019; REED, 2006).

As superligas são categorizadas como superligas à base de níquel, de ferro e de cobalto, sendo as superligas de níquel as mais utilizadas em altas temperaturas devido à excelente resistência mecânica e à oxidação (DAVIS, 2000). Estima-se que as superligas à base de níquel representam 40 a 50% do peso total de motores de aeronaves, sendo mais utilizadas nas seções de combustor e turbina (POLLOCK; TIN, 2006).

A superliga MAR-M247 é uma liga policristalina desenvolvida nos anos 1970, estando incluída na segunda geração de superligas à base de níquel (BOR et al., 2008; KVAPILOVA et al., 2021). Essa superliga apresenta cerca de 3% (massa) de tântalo em sua composição química, elemento que favorece a resistência mecânica e à corrosão em altas temperaturas (MENG et al., 1984). Porém, a adição de Ta, devido a sua elevada massa molar/peso atômico, implica em um aumento da densidade da liga. Além disso, este elemento é adicionado com um elevado grau de pureza durante o processo de fundição da superliga, o que eleva consideravelmente o custo de produção. Por este motivo, estudos recentes têm analisado a total

substituição do tântalo pelo nióbio (em % atômica), em virtude da similaridade química entre os dois elementos e pelo menor custo do Nb, já que o elemento pode ser adicionado à superliga na forma de uma liga mãe Ni-Nb / Fe-Nb. O Nb, assim como o Ta, é um metal refratário comumente adicionado a superligas policristalinas de níquel como formador de  $\gamma'$  (gama linha) e carbetos do tipo MC nos contornos de grão. O peso atômico do Nb (92,91 u) é aproximadamente metade do peso atômico do Ta (180,95 u), assim, a substituição atômica de Ta por Nb resulta também, benéficamente, em uma liga de menor densidade. Além disso, segundo o site Pesquisa FAPESP (2019), 98% das reservas de nióbio em operação se encontram no Brasil e o país domina 82% do mercado mundial (BOR et al., 2008; COSTA et al., 2018; DAVIS, 2000; KVAPILOVA et al., 2021; REED; RAE, 2014; ZHAO et al., 2008)

Com base nessas informações, é possível observar a importância industrial e tecnológica da análise da substituição da Ta por Nb em superligas e tal substituição vem sendo estudada ao longo dos anos. Costa et al. (2018) analisaram de maneira preliminar as propriedades em fluência da superliga MAR-M247 solidificada direcionalmente com total substituição atômica de Ta por Nb, estudo no qual foi observado que, para as temperaturas de ensaio de 750 e 850°C, ambas as ligas apresentaram comportamento em fluência similar. Entretanto, para a temperatura de 950°C, a superliga modificada apresentou propriedades em fluência inferiores comparada a MAR-M247 convencional. Segundo os autores, a diferença no comportamento em fluência pode ser explicada pela maior taxa de coalescimento de  $\gamma'$  e redução o efeito do endurecimento por solução sólida na superliga modificada. Baldan et al. (2014) avaliaram por meio de ensaios de oxidação o comportamento da superliga MAR-M247 convencional e modificada com Nb a 1000°C em ar estático por até 240h. Foi observada a presença de óxidos como NiO

na camada externa, espinélio  $(\text{Ni,Co})\text{Cr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CoO}$  na camada intermediária e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na camada intermediária, além de zona depleta de  $\gamma'$ .

Como é possível observar, nem sempre a substituição do Ta por Nb é satisfatória, sendo necessária uma avaliação aprofundada, através da realização de ensaios metodicamente realizados, para verificar as propriedades da liga modificada. Logo, o presente estudo visa analisar em profundidade as alterações microestruturais, o comportamento mecânico em fluência e a oxidação em alta temperatura da superliga MAR-M247 modificada com Nb (MAR-M247[Nb]) e solidificada direcionalmente (SD), produzida por meio da substituição total de Ta por Nb em porcentagem atômica (% at.). A análise microestrutural e os testes de oxidação serão realizados na Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP), enquanto que os ensaios de fluência serão realizados em parceria com a Escola Nacional Superior de Mecânica e Aeronáutica (ISAE-ENSMA) em Poitiers-França.

## 2 OBJETIVO GERAL

A finalidade do presente estudo é a análise do comportamento mecânico, através de ensaios de fluência, da superliga MAR-M247[Nb] SD, sendo também realizados testes de oxidação do material com o intuito de relacionar a influência da oxidação em altas temperaturas no comportamento em fluência. Para fins de comparação, os ensaios de fluência serão efetuados em amostras no estado bruto de solidificação (*as cast*) e em amostras solubilizadas, sendo executados nas condições de 800°C (475, 500 e 550 MPa), 900°C (300, 350 e 400 MPa) e 1000°C (150, 200, 225 MPa). Testes de oxidação serão realizados nas mesmas temperaturas do ensaio de fluência: 800, 900 e 1000°C. Serão efetuadas comparações dos resultados de fluência e oxidação encontrados no estudo com os

resultados encontrados na literatura referentes à superliga MAR-M247 convencional SD e com estrutura equiaxial. Pretende-se avançar significativamente no entendimento do comportamento em fluência deste material em relação aos estudos iniciais realizados por Costa (2014, 2018).

## **2.1 Objetivos Específicos**

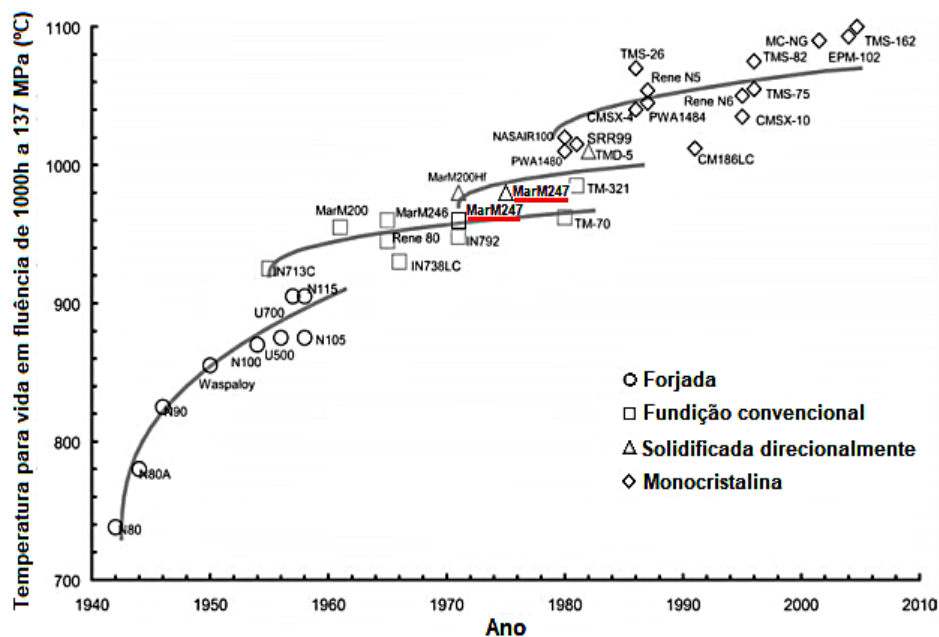
- Realizar tratamentos térmicos de solubilização da superliga MAR-M247[Nb] SD em temperaturas entre 1000°C e a temperatura de fusão incipiente;
- Caracterizar microestruturalmente a superliga MAR-M247[Nb] SD na condição bruta de solidificação e após tratamentos térmicos de solubilização;
- Realizar de ensaios de fluência na superliga MAR-M247[Nb] SD bruta de solidificação e solubilizada, nas condições de 800°C (475, 500 e 550 MPa), 900°C (300, 350 e 400 MPa) e 1000°C (150, 200, 225 MPa);
- Caracterizar microestruturalmente todas as amostras processadas, por meio de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), especialmente para verificação das fases presentes e suas composições;
- Realizar ensaios de oxidação nas superligas MAR-M247[Nb] SD nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C;
- Caracterizar microestruturalmente, por meio de microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), os produtos de oxidação;
- Analisar comparativamente o efeito da substituição do tântalo pelo nióbio na microestrutura, nas propriedades mecânicas em fluência e na oxidação da superliga MAR-M247, sendo utilizados para comparação, resultados encontrados na literatura referentes à superliga MAR-M247 convencional SD e com estrutura equiaxial.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Superliga à base de níquel MAR-M247

MAR-M247 é uma superliga obtida por fundição e que apresenta excelente resistência à fluência e à oxidação, sendo comumente aplicada em paletas de turbinas na indústria aeroespacial. Esta foi originalmente desenvolvida por fundição convencional, gerando microestrutura equiaxial, sendo posteriormente otimizada por solidificação direcional, resultando em grãos colunares, o que aumentou a vida em fluência da liga devido à ausência de contornos perpendiculares ao eixo de tensão (HARRIS; ERICKSON; SCHWER, 1990; KVAPILOVA et al., 2021; WEE et al., 2020).

A Figura 1 mostra a evolução das superligas de níquel desde 1940 até 2010. Observa-se que a superliga MAR-M247 SD suporta temperatura mais alta a 137 MPa durante 1000h de ensaio, confirmando que a liga SD possui maior vida em fluência em relação à liga obtida por fundição convencional (REED, 2006).

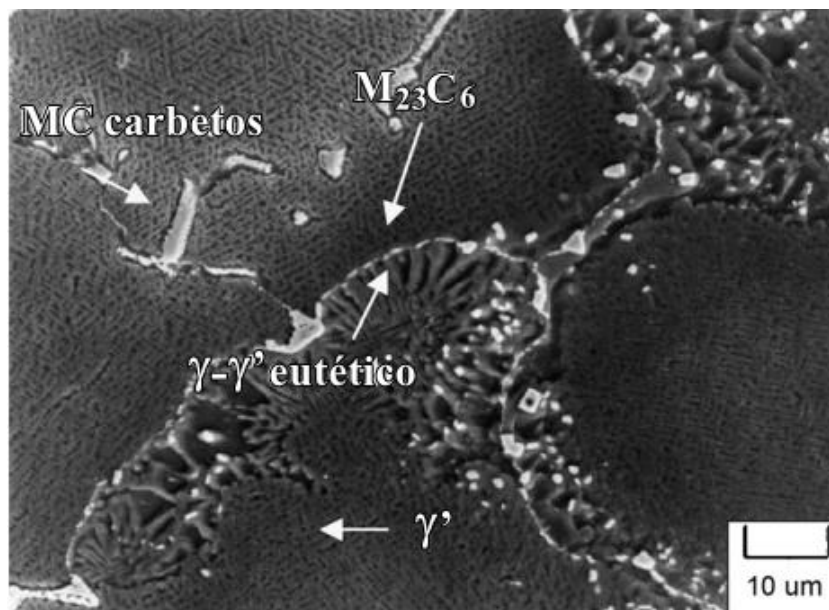


**Figura 1.** Evolução das superligas de níquel, com destaque para a superliga Mar-M247. Adaptado de Reed (2006).

Segundo Reed (2006), a microestrutura de superligas de níquel consiste em:

- fase  $\gamma$ : estrutura CFC. Forma a matriz, podendo conter concentrações de elementos como Co, Cr e Mo;
- fase  $\gamma'$ : estrutura CFC -  $\text{Ni}_3(\text{Al, Ti, Ta, Nb})$ . Fase secundária comumente formada como precipitados na matriz  $\gamma$ , atuando como fortalecedora da matriz, já que previne o movimento de discordâncias. Segundo Kvapilova et al. (2021), a estrutura da superliga MAR-M247 possui cerca de 60% de  $\gamma'$ ;
- carbetos e boretos: o elemento C presente na superliga se combina com o Ti, Ta e Hf para formar carbetos do tipo MC, que durante o processamento ou em serviço podem se decompor em carbetos do tipo  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  e  $\text{M}_6\text{C}$ , ricos em Cr, Mo e W, que residem preferencialmente nos contornos da matriz  $\gamma$ . Já o elemento B pode se combinar com elementos como Cr ou Mo formando boretos, que também residem preferencialmente nos contornos de  $\gamma$ .

A superliga MAR-M247 possui aproximadamente 3% em peso de tântalo, que é um elemento bastante eficaz no aumento de resistência da fase  $\gamma'$  (COSTA et al., 2018; TIEN; COLLIER; VIGNOUL, 1989). Apresenta também a presença de outros elementos refratários como W e Mo, além da adição de Hf. A alta porcentagem de tais elementos e a segregação elementar durante a solidificação leva à formação do eutético  $\gamma/\gamma'$ , além de carbonetos nas regiões interdendríticas (BALDAN et al., 2013). A Figura 2 mostra a microestrutura típica da superliga MAR-M247 após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, apresentando a fase  $\gamma'$  sobre a matriz  $\gamma$ , assim como a presença de carbetos do tipo MC e  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  e do eutético  $\gamma/\gamma'$  nas regiões interdendríticas.



**Figura 2.** Microestrutura típica da superliga MAR-M247. Adaptado de Bor et al. (2008).

### ***3.2 Influência da substituição do Ta por Nb em superligas à base de níquel***

O nióbio é um elemento refratário que em superligas à base de níquel desempenha funções semelhantes às do tântalo, ou seja, é utilizado como endurecedor por solução sólida, como fortalecedor dos precipitados de  $\gamma'$  e formador de carbeto do tipo MC (TIEN; COLLIER; VIGNOUL, 1989; ZHAO et al., 2008). De acordo com Zhao et al. (2008), comparado ao Ta, o Nb possui baixa influência no endurecimento por solução sólida, porém, a quantidade e estabilidade de  $\gamma'$  aumentam com a adição de Nb. Ainda segundo Zhao et al. (2008), esse elemento é também comumente utilizado em superligas como responsável pelo refino de grão e distribuição homogênea de carbeto do tipo MC.

Logo, a adição de Nb em superligas melhora a resistência mecânica, a ductilidade e a resistência à fadiga. Quando adicionado em teores acima de 5% wt, como na superliga Inconel 718, ocorre a precipitação da fase endurecedora  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb} - \text{TCC}$ ) (DAVIS, 2000; ZHAO et al., 2008). Porém, a adição de alto teor de Nb



prejudica as propriedades mecânicas devido à precipitação da fase frágil Laves ( $\text{Ni}_2\text{Nb}$ ) (ZHAO et al., 2008). Dependendo do seu teor, o Nb pode também diminuir a resistência à oxidação das superligas, já que ambos os elementos, Ta e Nb, podem formar fases intermetálicas que oxidam internamente em altas temperaturas, sendo o efeito do Nb mais acentuado (IRVING; STRINGER; WHITTLE, 1975; ZHAO et al., 2008). Por esses motivos, a adição de Nb em superligas de Ni costuma ser menor que 3% em peso (ZHAO et al., 2008).

### **3.2.1 Comportamento em fluência de superligas da família MAR-M2XX convencionais e modificadas com Nb**

Através da realização ensaios de fluência, Costa (2014) observou que a liga MAR-M247 convencional SD apresentou, em geral, melhores resultados de comportamento em fluência, comparado à liga modificada com Nb. Foi observado que a 750°C a liga convencional apresentou uma ligeira vida em fluência superior em 10 h, no entanto, os mecanismos de danos causados nas duas ligas foram muito semelhantes, como a formação e crescimento de vazios nas interfaces entre eutético  $\gamma/\gamma'$  e carbeto MC. A liga convencional também apresentou melhor comportamento em fluência no ensaio a 850°C, o que segundo Costa (2014), pode ser explicado pelo empobrecimento da matriz  $\gamma$  na liga MAR-M247[Nb] SD. Deve-se destacar que após os tratamentos de solubilização e envelhecimento de ambas as superligas, realizados antes dos testes de fluência, a homogeneização química não foi completa e observou-se a presença de poros indesejáveis (concentradores de tensão), fatores que afetam diretamente no comportamento em fluência.

Kvapilova et al. (2019) compararam o comportamento em fluência de amostras de MAR-M247 com diferentes tamanhos de grão, 5 mm e 2 mm. Os testes

de fluência foram realizados a 800, 900, 950 e 1000°C nas tensões de 150 a 700 MPa. Foram observadas diferenças insignificantes no comportamento em fluência das ligas com diferentes tamanhos de grão, com tempos de fratura quase idênticos.

Em outro estudo, Mataveli Suave et al. (2018) analisaram a influência da espessura no comportamento em fluência das amostras da superliga MAR-M200(+Hf) SD e monocristalina. Os ensaios, realizados a 900°C, mostraram que em amostras de paredes finas houve ocorrência de trincas nos carbeto e nas interfaces carbeto/  $\gamma$ - $\gamma'$  e oxidação preferencial dos carbeto nos contornos de grão, fatores que acarretaram na iniciação de trincas nestes locais durante o ensaio, consequentemente, reduzindo a vida em fluência. Nesse estudo, foram realizados também ensaios de fluência a vácuo, os quais apresentaram resultados superiores em fluência, mostrando que há influência da oxidação ao ar durante o ensaio.

Alkmin et al. (2020, 2021a), também por meio de ensaios de fluência, observaram que a substituição de Ta por Nb na superliga MAR-M246 equiaxial foi satisfatória até 800°C. A 900°C e 1000°C, a liga modificada apresentou menor vida em fluência. Foi observado também, que a superliga modificada sofreu maior dano por fluência induzido por oxidação do que a liga convencional.

### **3.2.2 Comportamento em oxidação de superligas da família MAR-M2XX convencionais e modificadas com Nb**

Costa (2014), em seus estudos, analisou o comportamento em oxidação isotérmica da superliga MAR-M247[Nb] SD. Os ensaios foram realizados em forno mufla ao ar estático a 1000°C, com tempo de exposição de até 100 h, sendo medida a alteração da massa durante determinados períodos. Foi observado que houve ganho de massa ao longo do ensaio, com a formação de óxidos do tipo NiO na

camada externa, espinélio,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na camada intermediária, além de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na camada interna.

Wang e Lin (2002) investigaram a oxidação da superliga MAR-M247 com e sem a presença de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Os ensaios de oxidação foram realizados ao ar estático nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200K por 4 a 120 h. O estudo concluiu que a presença de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  acelerou o processo de oxidação. Além disso, em ambas as ligas, com e sem a presença de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , foi observado perda de massa devido à evaporação de óxido de tungstênio.

Shirani Bidabadi et al. (2018) analisaram o comportamento de oxidação de três superligas comerciais, CrMoV, F91 e MAR-M247 tratadas termicamente, sendo a superliga MAR-M247 solubilizada a 1080°C por 4 h. Ensaio de oxidação foram realizados a 550°C ao ar por 120, 300, 500 e 1000 h. A superliga MAR-M247 foi a que apresentou menor ganho de massa e melhor resistência à oxidação devido à formação de uma incrustação de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e de uma camada fina de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) protetora, seguida pela superliga F91 e CrMoV.

Através de ensaio de oxidação a 800, 900 e 1000°C, Alkmin (2020, 2021b) observou que, em termos de produtos de oxidação formados, a 800°C o comportamento em oxidação é semelhante na superliga MAR-M246[Nb] e MAR-M246 convencional. A 900 e 1000°C a liga convencional apresentou resultados superiores em oxidação. A 900°C a liga modificada sofreu oxidação interna excessiva. A 1000°C, a liga modificada apresentou descamação da camada de óxido, enquanto a liga convencional exibiu maior resistência à oxidação devido à formação de camada de alumina protetora.

## **4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **4.1 *Análise química, solubilização e simulações termodinâmicas***

As barras da superliga MAR-M247[Nb] SD, as quais já se encontram fabricadas e disponíveis para o estudo, serão submetidas à análise química para verificação da composição química fornecida pela empresa. Serão realizados tratamentos térmicos de solubilização com o intuito de dissolver ao máximo a fase  $\gamma'$ , o eutético  $\gamma$ - $\gamma'$  e possivelmente parte dos carbeto primários. As condições de solubilização (temperatura e tempo) serão variadas para determinação da melhor condição de solubilização, sendo realizadas em temperaturas entre 1000°C até a temperatura de fusão incipiente. A partir desta melhor condição de solubilização, diversas amostras serão tratadas termicamente para realização dos ensaios de fluência.

### **4.2 *Ensaio de fluência***

Os ensaios de fluência serão realizados em parceria com a Escola Nacional Superior de Mecânica e Aeronáutica (ISAE-ENSMA) em Poitiers-França. Amostras cilíndricas serão retiradas a partir das barras de MAR-M247[Nb] SD no estado bruto de solidificação e tratadas termicamente (solubilizadas), sendo posteriormente usinadas de maneira a produzir corpos de prova de fluência conforme ilustrado na Figura 3.

Assim como no estudo realizado por Alkmin (2020, 2021a), os testes serão efetuados ao ar nas condições: 800°C (475, 500 e 550 MPa), 900°C (300, 350 e 400 MPa) e 1000°C (150, 200, 225 MPa). Com o intuito de analisar o efeito da oxidação no comportamento em fluência, serão também realizados ensaios de fluência à



temperaturas. Após a pesagem, as amostras retornarão para o forno na mesma temperatura, dando continuidade ao ensaio até o tempo de 1000 h. Esse método de ensaio foi empregado no estudo anterior realizado por Alkmin (2020, 2021b).

#### **4.4 Caracterização microestrutural e análise comparativa com a literatura**

Antes e após a realização dos tratamentos térmicos de solubilização e após os ensaios de fluência e oxidação, serão feitas caracterizações microestruturais das amostras para verificação das fases presentes. As amostras serão lixadas utilizando lixas de SiC na sequência de #320 a #1200, polidas com alumina de 1  $\mu\text{m}$  e atacadas quimicamente com reagente água régia (1/3  $\text{HNO}_3$  + 2/3  $\text{HCl}$ , partes vol.). Assim como nos estudos realizados por Alkmin (2020) e Costa (2014), a análise microestrutural será feita principalmente por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em condições de baixa e alta resolução (Field Emission Gun – FEG).

Será feita análise comparativa das alterações microestruturais das amostras após os ensaios de fluência e os ensaios de oxidação. Através de microscopia óptica e MEV, serão analisadas as superfícies de fratura após os ensaios de fluência. Utilizando o método de análise por elétrons secundário (SE) e o método de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), serão analisadas as fases presentes após ensaio de fluência. Quanto às amostras após ensaio de oxidação, serão analisados os produtos de oxidação por meio de MEV/EDS e difração de raios X (DRX).

Os resultados obtidos após os ensaios de fluência e de oxidação e após análise microestrutural serão comparados com os resultados encontrados na literatura referentes à superliga MAR-M247 convencional SD e com estrutura equiaxial. Esta análise comparativa será realizada com o intuito de analisar a

eficiência da superliga MAR-M247[Nb] SD e definir em quais condições a liga modificada pode eventualmente substituir a liga convencional.

## **5 ORIGINALIDADE E JUSTIFICATIVA**

Pode-se observar que na literatura há uma escassez de trabalhos relacionados à substituição atômica total de Ta por Nb na superliga MAR-M247. Com o projeto referente ao estudo de superligas iniciado no DEMAR-EEL-USP, foram desenvolvidos estudos relacionados a tratamentos térmicos da superliga MAR-M247[Nb] e ao comportamento em fluência e comportamento em oxidação desta superliga. Nos últimos estudos de fluência realizados no grupo de pesquisa, observou-se a necessidade da execução de um estudo mais aprofundado do que o realizado por Costa (2014, 2018) em relação à superliga MAR-M247[Nb] SD. Assim, o presente trabalho visa abranger o estudo da superliga MAR-M247[Nb] SD modificada, relacionando o comportamento em fluência com resultados de ensaios de oxidação da superliga, a fim de comparar com os resultados encontrados na literatura referentes à MAR-M247 convencional SD e com estrutura equiaxial. Em adição, serão realizados ensaios de fluência interrompidos, não cobertos no trabalho de Costa (2014, 2018), e que são fundamentais para a completa caracterização e entendimento do comportamento em fluência do material em estudo.

### **5.1 *Trabalhos anteriores do grupo na temática superligas MAR-M2XX***

Abaixo se encontram listados trabalhos relacionados à temática de superligas publicados na literatura pelo grupo liderado pelo Prof. Carlos Ângelo Nunes:

- ALKMIN, L. B. et al. High Temperature Oxidation Behavior of Conventional and Nb-Modified MAR-M246 Ni-Based Superalloy. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, p. 12, 2021.
- ALKMIN, L. B. et al. Creep behavior of conventional and Nb-modified as-cast MAR-M246 superalloy. Materials Science and Engineering: A, v. 813, p. 141170, 2021.
- GLÓRIA, R. F. et al. Aluminide coating on Mar-M246 nickel superalloy by halide activated pack cementation (HAPC). SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY, v. 411, p. 126999, 2021.
- SALGADO, M. V. S. et al. High-Temperature Oxidation Behavior of High-Aluminum (Co,Ni)-Based Superalloys for Friction Stir Welding (FSW) Tools. OXIDATION OF METALS, v. 95, p. 203-220, 2021.
- SALGADO, M. V. S. et al. Processing and characterization of high aluminum multicomponent (Co,Ni)-based superalloys for friction stir welding (FSW) tools. Materials Today Communications, v. 1, p. 101282-10, 2020.
- COSTA, A. M. S. et al. Microstructural and Mechanical Characterization of Directionally Solidified Conventional and Nb-Modified Mar-M247 Superalloy. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, v. 1, p. 1-12, 2019.
- COSTA, A.M.S. et al. Ni-based Mar-M247 superalloy as a Friction Stir Processing tool. JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, v. 262, p. 605-614, 2018.
- COSTA, A.M.S. et al. Effect of Ta and Nb additions in arc-melted Co-Ni-based superalloys: Microstructural and mechanical properties. MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING, v. 730, p. 66-72, 2018.
- COSTA, A. M. S. et al. Creep Properties of Directionally Solidified Nb-Modified Ni-Base Superalloy, Mar-M247. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, v. 1, p. 1-5, 2018.
- CALIARI, F. R. et al. Effect of Double Aging Heat Treatment on the Short-Term Creep Behavior of the Inconel 718. Journal of Materials Engineering and Performance (Print), v. 25, p. 2307-2317, 2016.
- BALDAN, R. et al. Solution and Aging of MAR-M246 Nickel-Based Superalloy. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, v. 26, p. 465-471, 2016.



- COSTA, A. M. S. et al. Thermodynamic Evaluation of the Phase Stability and Microstructural Characterization of a Cast B1914 Superalloy. *Journal of Materials Engineering and Performance* (Print), v. 23, p. 819-825, 2014.
- BALDAN, R. et al. Oxidation Behavior of the Niobium-Modified MAR-M247 Superalloy at 1,000 °C in Air. *Oxidation of Metals*, v. 1, p. 1-16, 2014.
- BALDAN, R. et al. Solutioning and Aging of MAR-M247 Nickel-Based Superalloy. *Journal of Materials Engineering and Performance* (Print), v. 1, p. 1-5, 2013.
- BALDAN, R. et al. Aging of a New Niobium-Modified MAR-M247 Nickel-Based Superalloy. *Journal of Materials Engineering and Performance* (Print), v. 22, p. 2337-2342, 2013.
- AZEVEDO E SILVA, P. R. S. et al. Solution heat-treatment of Nb-modified MAR-M247 superalloy. *Materials Characterization*, v. 75, p. 214-219, 2012.

## **6 RECURSOS NECESSÁRIOS E ÓRGÃO FINANCIADOR**

A USP-EEL dispõe da maior parte da infraestrutura necessária para execução desta proposta. As amostras da superliga MAR-M247 modificada com Nb para realização da pesquisa já se encontram disponíveis. Na USP-EEL há laboratório de preparação metalográfica, microscópios ópticos e eletrônicos, difratômetros de raios X e fornos muflas. No ISAE-ENSMA, em Poitiers-França, encontram-se as máquinas para os testes de fluência, sendo a realização dos ensaios garantida pelo professor Jonathan Cormier conforme documento anexado ao SAGE/FAPESP. A execução dos ensaios por parte da aluna será possível através da aprovação deste projeto na FAPESP, com a utilização da Bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior (BEPE), que permite estágio de pesquisa no exterior por período máximo de 12 meses.

## 7 CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES

	ANO 1		ANO 2		ANO 3		ANO 4	
Atividade	1º Sem.	2º Sem.	3º Sem.	4º Sem.	5º Sem.	6º Sem.	7º Sem.	8º Sem.
Disciplinas								
Revisão bibliográfica								
Análise química								
Tratamento térmico de solubilização								
Caracterização microestrutural: as cast e solubilizadas								
Ensaio de oxidação								
Caracterização microestrutural após oxidação								
Ensaio de fluência								
Caracterização microestrutural após fluência								
Análise comparativa com literatura								
Produção de artigos								
Finalização da tese								

## REFERÊNCIAS

- AKANDE, I. G. et al. Overview of mechanical, microstructural, oxidation properties and high-temperature applications of superalloys. *Materials Today: Proceedings*, In press, p. S2214785320402408, 2021.
- ALKMIN, L. B. Avaliação do comportamento mecânico em fluência e de oxidação da superliga MAR-M246 convencional e modificada pela substituição do Ta pelo Nb. Tese—São Paulo: Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de Lorena, 2020.
- ALKMIN, L. B. et al. Creep behavior of conventional and Nb-modified as-cast MAR-M246 superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, v. 813, p. 141170, 2021a.
- ALKMIN, L. B. et al. High temperature oxidation behavior of conventional and Nb-modified MAR-M246 Ni-based superalloy. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, p. 12, 2021b.
- BALDAN, R. et al. Solutioning and aging of MAR-M247 nickel-based superalloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 22, n. 9, p. 2574–2579, 2013.
- BALDAN, R. et al. Oxidation behavior of the niobium-modified MAR-M247 superalloy at 1,000 °C in Air. *Oxidation of Metals*, v. 83, n. 1–2, p. 151–166, 2014.
- BOR, H. Y. et al. Elucidating the effects of solution and double ageing treatment on the mechanical properties and toughness of MAR-M247 superalloy at high temperature. *Materials Chemistry and Physics*, v. 109, n. 2–3, p. 334–341, 2008.
- COSTA, A. M. S. Solidificação direcional da superliga MAR-M247 modificada com nióbio: processamentos e caracterizações microestruturais e mecânicas. Tese—São Paulo: Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de Lorena, 2014.
- COSTA, A. M. S. et al. Creep properties of directionally solidified Nb-modified Ni-base superalloy, Mar-M247. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 27, n. 11, p. 5744–5751, 2018.
- DAVIS, J. R. (ED.). Nickel, cobalt, and their alloys. Materials Park, OH: ASM International, 2000.
- GOWTHAMAN, P. S.; JEYAKUMAR, S. A review on machining of High Temperature Aeronautics Super-alloys using WEDM. *Materials Today: Proceedings*, v. 18, p. 4782–4791, 2019.
- HARRIS, K.; ERICKSON, G. L.; SCHWER, R. E, Cannon-Muskegon Corporation. Directionally solidified and single-crystal superalloys. *Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys*, p. 995–1006, 1990.
- IRVING, G. N.; STRINGER, J.; WHITTLE, D. P. The oxidation of Co-20% Cr base alloys containing Nb or Ta. *Corrosion Science*, v. 15, n. 5, p. 337–344, 1975.

KVAPILOVA, M. et al. Creep behaviour and life assessment of a cast nickel – base superalloy MAR – M247. *High Temperature Materials and Processes*, v. 38, n. 2019, p. 590–600, 2019.

KVAPILOVA, M. et al. High temperature creep behaviour of cast nickel-based superalloys INC 713 LC, B1914 and MAR-M247. *Metals*, v. 11, n. 1, p. 152, 2021.

MATAVELI SUAVE, L. et al. Thin-wall debit in creep of DS200 + Hf alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 49, n. 9, p. 4012–4028, 2018.

MENG, Z. et al. The strengthening effect of tantalum in nickel-base superalloys. Shanghai Iron & Steel Research Institute technical report: Shanghai Iron and Steel Research Institute. v. 84, p. 563–572, 1984

POLLOCK, T. M.; TIN, S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties. *Journal of Propulsion and Power*, v. 22, n. 2, p. 361–374, 2006.

REED, R. C. The superalloys: fundamentals and applications. 1 st ed. v. 1, 390 p, 2006.

REED, R. C.; RAE, C. M. F. Physical metallurgy of the nickel-based superalloys. 5 th ed. Elsevier, v.1, p. 2215–2290, 2014.

SHIRANI BIDABADI, M. H. et al. High-temperature oxidation behavior of CrMoV, F91 and Mar-M247 Superalloys Exposed to Laboratory Air at 550 °C. *Oxidation of Metals*, v. 90, n. 3–4, p. 401–419, 2018.

TIEN, J. K.; COLLIER, J. P.; VIGNOUL, G. The role of niobium and other refractory elements in superalloys. *Superalloys 718 Metallurgy and Applications*, p. 553–566, 1989.

VASCONCELOS, Y. O polêmio nióbio Pesquisa FAPESP, 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/o-polemico-niobio/#:~:text=O%20pre%C3%A7o%20dos%20produtos%20de,de%20acordo%20com%20o%20mercado.>>>. Acesso em: 23 mar. 2021

WANG, C.-J.; LIN, J.-S. The oxidation of MAR M247 superalloy with Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> coating. *Materials Chemistry and Physics*, v. 76, n. 2, p. 123–129, 2002.

WEE, S. et al. Review on mechanical thermal properties of superalloys and thermal barrier coating used in gas turbines. *Applied Sciences*, v. 10, n. 16, p. 5476, 2020.

ZHAO, K. et al. Effect of minor niobium addition on microstructure of a nickel-base directionally solidified superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, v. 476, n. 1–2, p. 372–377, 2008.