



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de Itapeva

**ALEF CHUVUKIAN PETRUCI**

**Análise do comportamento da oxidação isotérmica da superliga  
MAR-M246 em elevadas temperaturas**

Itapeva - SP  
2022

ALEF CHUVUKIAN PETRUCI

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA OXIDAÇÃO ISOTÉRMICA DA  
SUPERLIGA MAR-M246 EM ELEVADAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Conselho de Curso de Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Câmpus de Itapeva, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Renato Baldan

Itapeva - SP  
2022

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P498a | <p>Petruci, Alef Chuvukian</p> <p>Análise do comportamento da oxidação isotérmica da superliga MAR-M246 em elevadas temperaturas / Alef Chuvukian Petruc. -- Itapeva, 2022</p> <p>34 f. : il., tabs.</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva</p> <p>Orientador: Renato Baldan</p> <p>1. Ligas de níquel. 2. Ligas resistentes ao calor. 3. Oxidação. 4. Dureza. 5. Superligas. I. Título.</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**ALEF CHUVUKIAN PETRUCI**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA OXIDAÇÃO ISOTÉRMICA DA  
SUPERLIGA MAR-M246 EM ELEVADAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

**BANCA EXAMINADORA**

*Renato Baldan*

Orientador: Prof. Dr. Renato Baldan  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

*Mérlin G.S. Fernandes*

2º Examinador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mérlin Cristina dos Santos Fernandes  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

*Carlos Manuel Romero Luna*

3º Examinador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 15/08/2022.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela oportunidade de correr atrás de todos os meus sonhos e objetivos.

À minha mãe, pai, avó e irmã por todo o apoio e carinho durante esses anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato Baldan, pelo trabalho, atenção e orientação.

Aos meus amigos, por todos os momentos que me ajudaram a me tornar quem eu sou.

Ao PIBIC-Reitoria Unesp, pelo apoio financeiro em minha iniciação científica realizada em 2018.

## RESUMO

Atualmente, os ambientes em que os materiais são expostos vêm se tornando cada vez mais agressivos, devido ao fato de serem submetidos em locais com elevada pressão e altas temperaturas, onde estão propensos a sofrer com o fenômeno da oxidação. Em virtude disso, novos materiais vêm sendo estudados a fim de serem adaptados a essas condições. Além disso, novas ligas metálicas estão sendo criadas e modificadas e ganhando cada vez mais espaço tanto comercialmente quanto cientificamente. As superligas são um grupo de materiais que possuem propriedades voltadas para aplicações que exigem alta resistência mecânica e à oxidação/corrosão. Esses materiais possuem diversos componentes nos mais variados teores. Atualmente, a superliga à base de níquel MAR-M246 é aplicada em rotores para turbo-compressores automotivos. Nos últimos anos, a resistência à oxidação em altas temperaturas e o conhecimento dos aspectos básicos durante a oxidação tornou-se um fator primordial para os requisitos de projeto e aplicação destes materiais. Por esses motivos, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o comportamento durante os ensaios de oxidação isotérmica a 800 e 1000 °C por até 240 horas da superliga MAR-M246. Os resultados evidenciaram pequenos teores de óxido nos ensaios a 800 °C e quantidades mais significativas nos ensaios a 1000 °C. Por fim, puderam-se observar oscilações nos valores de dureza das amostras oxidadas a 800 e 1000 °C, provavelmente devido à formação de óxidos complexos durante os ensaios de oxidação em diferentes condições.

**Palavras chave:** MAR-M246, oxidação isotérmica, superliga.

## **ABSTRACT**

Currently, the environments in which materials are exposed are becoming increasingly aggressive, due to the fact that they are submitted in places with high pressure and high temperatures, where they are prone and suffer from the phenomenon of oxidation. As a result, new materials have been studied in order to be adapted to these conditions. In addition, new metal alloys are being created and modified and gaining more and more space both commercially and scientifically. Superalloys are a group of materials that have properties for applications that require high mechanical resistance and oxidation/corrosion. These materials have several components in the most varied contents. Currently, the MAR-M246 nickel-based superalloy is applied to rotors for automotive turbochargers. In recent years, oxidation resistance at high temperatures and knowledge of the basic aspects during oxidation has become a key factor for the design and application requirements of these materials. For these reasons, the objective of this study was to evaluate the behavior during isothermal oxidation tests at 800 and 1000°C for up to 240 hours of the MAR-M246 superalloy. The results showed small oxide contents in the assays at 800°C and more significant quantities in the assays at 1000°C. Finally, it was possible to observe oscillations in the hardness values of the oxidized samples at 800 and 1000°C probably due to the formation of complex oxides during oxidation tests under different conditions.

**Keywords:** MAR-M246, oxidation isothermal, superalloy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Estrutura cristalina da fase $\gamma'$ .....                                                                                                                                                                                                                      | 13 |
| Figura 2 - Microestrutura típica de uma superliga à base de níquel.....                                                                                                                                                                                                      | 14 |
| Figura 3 - Microestrutura da superliga MAR-M246 obtida por MEV.....                                                                                                                                                                                                          | 17 |
| Figura 4 - Molde cerâmico antes (esquerda) e depois (direita) do vazamento do material.....                                                                                                                                                                                  | 18 |
| Figura 5 - Amostra lixada e polida para a caracterização microestrutural do material de partida (amostra 1), amostra antes do ensaio de oxidação (amostra 2), amostra após o ensaio de oxidação (amostra 3) e o conjunto cadinho + amostra utilizado para os ensaios de..... | 20 |
| Figura 6 - Comportamento do forno durante os ensaios de oxidação isotérmica a 800°C por 120h, evidenciando os períodos de abertura e fechamento da porta do forno .....                                                                                                      | 23 |
| Figura 7 - Comportamento do forno durante os ensaios de oxidação isotérmica a 800°C por 240h, evidenciando os períodos de abertura e fechamento da porta do forno .....                                                                                                      | 23 |
| Figura 8 - Microestrutura da superliga MAR-M246 no estado bruto de fusão .....                                                                                                                                                                                               | 24 |
| Figura 9 - Variação de massa por unidade de área em função do tempo de oxidação a 800°C para a liga MAR-M246.....                                                                                                                                                            | 26 |
| Figura 10 - Óxido descolado da amostra e no fundo do cadinho após o ensaio de 1000°C.....                                                                                                                                                                                    | 27 |
| Figura 11 - Variação de massa por unidade de área em função do tempo de oxidação a 1000°C para a liga MAR-M246 .....                                                                                                                                                         | 29 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Efeitos da adição dos principais elementos de liga na microestrutura das superligas.....                                                                                                                                                            | 12 |
| Tabela 2 - Composição nominal (% peso) da superliga MAR-M246.....                                                                                                                                                                                              | 16 |
| Tabela 3 - Massa das amostras antes e depois do ensaio (mg), variação de massa (mg), área das amostras (cm <sup>2</sup> ) e variação de massa por unidade de área (mg/cm <sup>2</sup> ) da superliga MAR-M246 após ensaio de oxidação isotérmica a 800°C ..... | 25 |
| Tabela 4 - Massa das amostras antes e depois do ensaio (mg), variação de massa (mg), área das amostras (cm <sup>2</sup> ) e variação de massa por unidade de área (mg/cm <sup>2</sup> ) da superliga MAR-M246 após ensaio de oxidação isotérmica a 1000°C..... | 28 |
| Tabela 5 - Média e o desvio padrão (em HV) dos valores de dureza das amostras oxidadas a 800°C por até 240h .....                                                                                                                                              | 30 |
| Tabela 6 - Média e o desvio padrão (em HV) dos valores de dureza das amostras oxidadas a 1000°C por até 240h.....                                                                                                                                              | 31 |

## SUMÁRIO

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                        | <b>9</b>  |
| 1.1 Objetivos gerais                                        | 10        |
| 1.2 Objetivos específicos                                   | 10        |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                             | <b>11</b> |
| 2.1 Superligas                                              | 11        |
| 2.2 O fenômeno da oxidação em superligas                    | 14        |
| 2.3 A superliga MAR-M246                                    | 16        |
| <b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>                         | <b>18</b> |
| 3.1 Produção da superliga MAR-M246                          | 18        |
| 3.2 Caracterização da microestrutura do material de partida | 19        |
| 3.3 Ensaios de oxidação isotérmicos                         | 19        |
| 3.4 Medidas de dureza                                       | 21        |
| 3.5 Massa específica                                        | 21        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                           | <b>22</b> |
| 4.1 Massa específica da liga                                | 22        |
| 4.1 Monitoramento da temperature nos ensaios de oxidação    | 22        |
| 4.2 Caracterização da microestrutura do material de partida | 24        |
| 4.3 Ensaios de oxidação isotérmica a 800 °C                 | 25        |
| 4.4 A Ensaios de oxidação isotérmica a 1000 °C              | 27        |
| 4.5 Ensaios de dureza                                       | 29        |
| <b>5. CONCLUSÃO</b>                                         | <b>32</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                        | <b>33</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

As superligas têm sido cada vez mais utilizadas nas últimas décadas pelo fato de trabalharem em condições extremas e em ambientes que podem ser muito agressivos para os materiais. Produzir e otimizar essas ligas vem sendo um grande desafio nos dias de hoje, devido a esses materiais apresentarem propriedades para trabalharem em alto desempenho, como alta resistência mecânica mesmo em elevadas temperaturas, além de elevada resistência à corrosão/oxidação em faixas de temperaturas próximas ao ponto de fusão, resistência à ambientes marítimos, entre outras propriedades encontradas apenas nessa classe seleta de materiais (EZUGWU, 2004).

Muitas ligas metálicas sofrem com o fenômeno da oxidação quando submetidas à altas temperaturas. Para suprir essa necessidade, na década de 30, nos Estados Unidos da América, novas ligas começaram a ser desenvolvidas, principalmente à base de níquel e ferro que, posteriormente, foram denominadas de superligas (BALDAN, 2009).

Uma das propriedades muito importante para a escolha de ligas para determinadas aplicações é a resistência mecânica. Nos dias atuais, as superligas à base de níquel começaram a ganhar muito espaço no mercado e no meio acadêmico pois geralmente apresentam elevada resistência mecânica inclusive em altas temperaturas, alta resistência à tração/ruptura, elevado módulo de elasticidade e grande solubilidade de elementos de liga que podem agregar uma gama de propriedades. As superligas de níquel possuem resistência mecânica muito elevada, devido a sua estrutura CFC (cúbica de face centrada), mesmo em temperaturas elevadas, permitindo que as superligas continuem com uma resistência a tração e a ruptura em ambientes de condições adversas (BHADESHIA, 2018).

O fenômeno da oxidação pode ser observado em metais e ligas metálicas quando a estrutura é exposta a atmosferas oxidantes. Nesse processo, na maior parte dos casos, é possível observar a formação de óxidos, proveniente da reação do metal com o oxigênio, na superfície do metal/liga. A formação desses óxidos pode interferir diretamente nas propriedades do material, tais como: diminuir a capacidade da liga de resistir a carregamentos mecânicos; diminuir a resistência à

fadiga; perda de óxidos protetores da camada superficial da liga, o que acelera ainda mais a velocidade de oxidação (BOWMAN, 2018).

As diferentes condições adversas a serem superadas fazem com que novas superligas sejam criadas e ganhem cada vez mais espaço no mercado, com composições químicas diferentes que possam agregar novas propriedades para essas ligas. A superliga MAR-M246, criada pela *Martin-Marietta Corporation*, é uma das ligas que vem sendo utilizada em motores de turbinas aeronáuticas, devido as suas propriedades de alta dureza e resistência a oxidação elevada (REIS, 2020).

A complexidade das superligas de níquel e a heterogeneidade da sua microestrutura faz com que seja difícil traçar o comportamento dessas ligas em relação aos diferentes ambientes em que serão utilizadas, tanto no aspecto mecânico quanto em relação a oxidação. Dadas às circunstâncias, é fundamental o estudo dessas ligas e correlacionar com os diferentes elementos de ligas presentes para que seja possível entender melhor essa superliga nos mais diferentes cenários. Em virtude do exposto, o presente trabalho tem como objetivos analisar o comportamento durante a oxidação isotérmica da superliga MAR-M246 em diferentes condições de temperatura e tempo.

### **1.1 Objetivos gerais**

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o desempenho da superliga MAR-M246 no estado bruto de fusão após ensaios de oxidação isotérmica à 800°C e 1000°C em diferentes intervalos de tempo.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Determinação a massa específica da superliga MAR-M246 no estado bruto de fusão;
- Avaliação do comportamento do material e a formação de óxido através do ganho de massa por área após os ensaios de oxidação isotérmica;
- Determinação da dureza da superliga no estado bruto de fusão e após os ensaios de oxidação isotérmica.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Superligas**

As superligas, principalmente a base de Níquel, começaram a ser mais estudadas e utilizadas após a Segunda Guerra Mundial, a fim de se obter materiais a serem utilizados em motores aeronáuticos, devido ao fato de ser um ambiente mais agressivo, exigindo que o material dessas aplicações continuem com um alto rendimento, como resistência a oxidação e dureza elevadas, em faixas de temperaturas acima de 650°C. A combinação das superligas a base de Níquel, Ferro e Cobalto com diversos elementos de liga, vem produzindo novos materiais que vem ganhando espaço nos mais diversos ramos do mercado, como turbinas a gás, motores de foguete, ambiente marítimos, entre outros (BALDAN, 2013).

Uma técnica que permite alcançar as mais diversas propriedades dentro de uma liga é a adição de elementos de liga em diferentes teores a fim de se obter algumas alterações na estrutura da superliga e por consequência nas suas propriedades. Alguns dos principais elementos de ligas e os seus respectivos efeitos são apresentados na Tabela 1. Os elementos de liga proporcionam diferentes efeitos para as superligas, podendo aumentar a densidade do material, a resistência a oxidação e também causar uma alteração na microestrutura, como formação de carbeto e outras fases. Porém, alguns elementos de liga podem gerar alguns efeitos negativos às propriedades dos materiais quando adicionados à composição da liga (REIS, 2020).

Tabela 1 - Efeitos da adição dos principais elementos de liga na microestrutura das superligas.

| Elemento | Resistência da matriz ( $\gamma$ ) | Aumento na fração em volume da $\gamma'$ | Outros Efeitos                                                                                                              |
|----------|------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Al       | Moderado                           | Muito grande                             | Resistência à oxidação                                                                                                      |
| Mo       | Alto                               | Moderado                                 | Aumenta a densidade                                                                                                         |
| W        | Alto                               | Moderado                                 | Promove a formação das fases TCP ( $\sigma$ e $\mu$ ).                                                                      |
| Ta       | Alto                               | Grande                                   | Promove a formação das fases $\gamma'$                                                                                      |
| Nb       | Alto                               | Grande                                   | Promove a formação das fases $\gamma'$                                                                                      |
| Cr       | Moderado                           | Moderado                                 | Melhora a resistência à corrosão e promove formação de fases TCP.                                                           |
| Ti       | Moderado                           | Muito grande                             | Melhora a resistência à corrosão.                                                                                           |
| Co       | Leve                               | Moderado                                 | Pode aumentar ou diminuir as temperaturas da linha solvus.                                                                  |
| Re       | Moderado                           |                                          | Retarda crescimento de grãos.                                                                                               |
| C        | Moderado                           |                                          | Formação de carbeto                                                                                                         |
| B, Zr    | Moderado                           |                                          | Inibem crescimento de carbeto; melhoram a resistência do contorno de grão; melhoram a ductilidade e resistência à fluência. |

Fonte: Reis (2020)

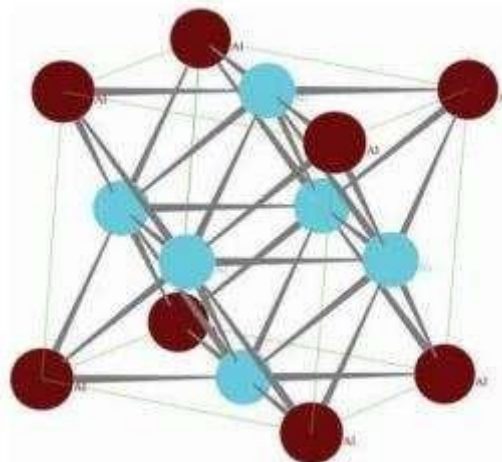
Nos dias atuais, as superligas mais utilizadas em temperaturas acima de 500°C são as ligas à base de Cobalto, Ferro e Níquel, principalmente pelos fatores já citados anteriormente: elevada resistência mecânica nessas faixas de temperatura, até mesmo próximo ao ponto de fusão da liga; capacidade de trabalhar em ambientes que outros materiais não suportam (corrosivos, marítimos, oxidantes, etc) e elevada resistência à oxidação (REED, 2006).

Para entender melhor as propriedades desses materiais, é preciso observar e entender melhor a sua microestrutura. Na maior parte das superligas à base de Níquel, a estrutura é composta por uma matriz austenítica, chamada de fase  $\gamma$ . Essa fase apresenta uma estrutura cúbica de face centrada (CFC) e apresenta diversos elementos de liga, entre eles: Cromo, Molibdênio, Tungstênio, Titânio, Tântalo e Cobalto (AQUINO, 2014).

A fase  $\gamma'$ , composto principalmente por  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Ta}, \text{Nb})$ , também possui estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e é responsável pelo fortalecimento e endurecimento das ligas de Níquel (AQUINO, 2014).

Essa fase geralmente possui orientação similar com a matriz  $\gamma$ , mesma orientação. Está diretamente ligada ao endurecimento das superligas de Níquel pelo fato de alterar a matriz do material. Pode apresentar tanto a morfologia esferoidal, cuboidal ou outras. Na Figura 1, os átomos de níquel estão representados pelas esferas azuis no centro das faces, enquanto os átomos de alumínio (elemento de liga) são representados pelas esferas vermelhas nos vértices (REIS 2020).

*Figura 1 - Estrutura cristalina da fase  $\gamma'$*

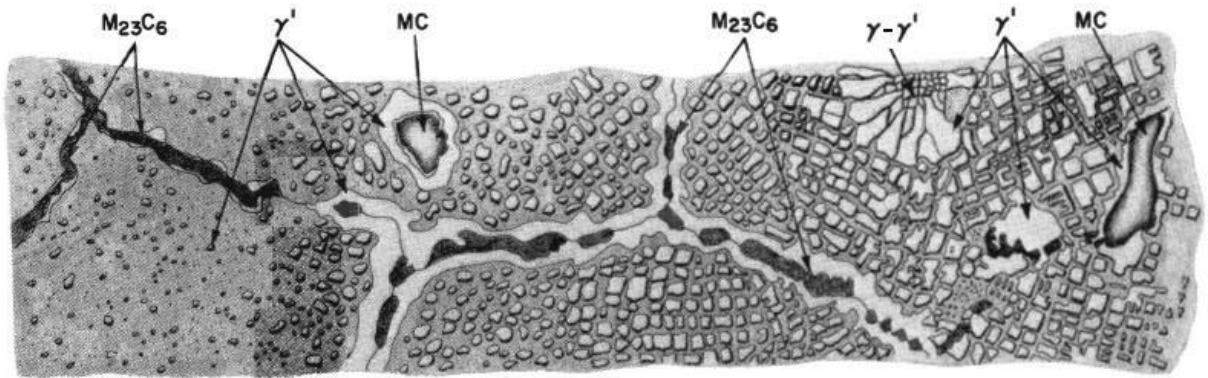


Fonte: Reis (2020).

A adição de Carbono em teores até 0,2% em massa faz com que o elemento reaja com os elementos de liga, como Titânio, Tântalo, Cromo, Nióbio e Molibdênio, devido a afinidade desses metais com o carbono, formando carbeto  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{MC}$ ,  $\text{M}_6\text{C}$  e  $\text{M}_7\text{C}_3$ . Esses carbeto apresentam diferentes morfologias e geralmente estão presentes nos contornos de grãos do material. Há também a formação de boreto ( $\text{MB}_2$  e  $\text{M}_3\text{B}_2$ ) de reações provenientes do Boro com outros elementos de liga como o Cromo. Esses boreto costumam ser mais duros e resistentes, com formação nos contornos de grãos da fase matriz. Na Figura 2 é

possível notar as principais fases de uma superliga, assim como a formação de alguns Carbeto e das fases  $\gamma$  e  $\gamma'$  (AQUINO, 2014).

Figura 2 - Esquema da microestrutura típica de uma superliga à base de níquel



Fonte: HUANG; KOO (2004) apud VARAVALLO (2012).

## 2.2 O fenômeno da oxidação em superligas

O processo de oxidação pode ser compreendido pela relação do metal da superfície com o oxigênio presente no ambiente, gerando formação de óxido na superfície do material. Nos últimos anos, a resistência à oxidação em elevadas temperaturas e o conhecimento dos aspectos básicos durante a oxidação tornou-se um fator primordial para os requisitos de projeto e aplicação das superligas.

A formação de óxido no metal ocorre quando parte desse material está se transformando em óxido, aumentando a massa da liga, diminuindo a área de seção reta e afetando diretamente nas suas propriedades mecânicas. No caso da oxidação interna, as propriedades mecânicas são ainda mais comprometidas, pois nesse caso a oxidação pode continuar ocorrendo devido a presença de porosidade no óxido formado, possibilitando que a formação continue na parte interna do material, diminuindo a resistência a carregamentos no material (TRINDADE, 2013).

Em algumas ligas metálicas é possível observar o fenômeno de descolamento do óxido da superfície do material. Isso pode ocorrer devido ao crescimento heterogêneo do óxido, gerando um desajuste cristalográfico na superfície da liga. Também há casos de vaporização do óxido, pois em alguns casos, a perda

do revestimento externo de materiais como o óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) faz com que a velocidade de oxidação possa crescer ainda mais (BALDAN, 2013).

Ensaaios de oxidação são realizados a temperatura e pressão controladas, para que seja possível simular alguns cenários onde a superliga estará submetida em diversas aplicações. Esses ensaios permitem ter uma ideia inicial de como o material se comportará em ambientes agressivos, podendo ou não alterar a sua estrutura a fim de se obter outras propriedades (MALAFAIA, 2013).

O melhor método para avaliar a oxidação de uma liga é medir sua massa e sua área superficial antes e após os ensaios, geralmente com a utilização de um sistema que não deixe o óxido se perder por descolamento (cadinhos). A comparação de massa/área antes e após dos ensaios indica o quanto de óxido foi formado ou perdido durante os ensaios.

Esses ensaios são realizados para que seja possível entender melhor o comportamento térmico dos materiais e podem ser feitos em diferentes faixas de temperaturas, para a determinação das propriedades do material em diferentes cenários. Os ensaios geralmente ocorrem em fornos e são executados a temperaturas superiores a  $500^\circ\text{C}$  e é importante que o ambiente seja monitorado para que a temperatura não oscile da faixa estipulada. Os ensaios em que não há variação de temperatura durante o processo são denominados de ensaios isotérmicos. Nesses ensaios é de extrema importância que a temperatura seja mantida no valor alvo durante todo o processo. Para isso, a mufla ou o equipamento a ser utilizado é aquecido até a temperatura estipulada e após isso as amostras são adicionadas ao sistema. O monitoramento é necessário para analisar se não houve oscilação durante o processo. Existem também os ensaios cíclicos, onde o material é submetido a aquecimentos seguido de resfriamentos, a fim de simular alguns cenários encontrados no dia a dia desses materiais (MALAFAIA, 2013).

Muitos elementos de liga são adicionados para minimizar os efeitos da oxidação. O cromo, por exemplo, possui maior afinidade com oxigênio em relação aos outros elementos da liga, formando uma camada aderente, estável e protetora na superfície da liga. No entanto, a quebra da camada de óxido ("*spalling*") e a oxidação interna ocorrem mesmo para tempos curtos de exposição e em virtude das tensões térmicas desenvolvidas durante o resfriamento do material (STASZEWSKA, 2016).

### 2.3 A superliga MAR-M246

A superliga MAR-M246 é uma liga fundida desenvolvida pela *Martin-Marietta Corporation* amplamente utilizada em aplicações do dia a dia que necessitam materiais de alta resistência mecânica e à corrosão em faixas de temperaturas elevadas. A massa específica da superliga MAR-M246 é 8,44g/cm<sup>3</sup> e a temperatura de fusão está entre 1.315 e 1.343°C. A Tabela 2 apresenta a composição nominal da superliga MAR-M246 (RESENDE, 2022).

*Tabela 2 - Composição química (% peso) da superliga MAR-M246*

| Elemento | MAR-M246 |
|----------|----------|
| Ni       | Balanço  |
| Co       | 10,0     |
| W        | 10,0     |
| Cr       | 9,0      |
| Al       | 5,5      |
| Mo       | 2,5      |
| Ti       | 1,5      |
| Ta       | 1,5      |
| C        | 0,15     |
| Zr       | 0,05     |
| B        | 0,015    |

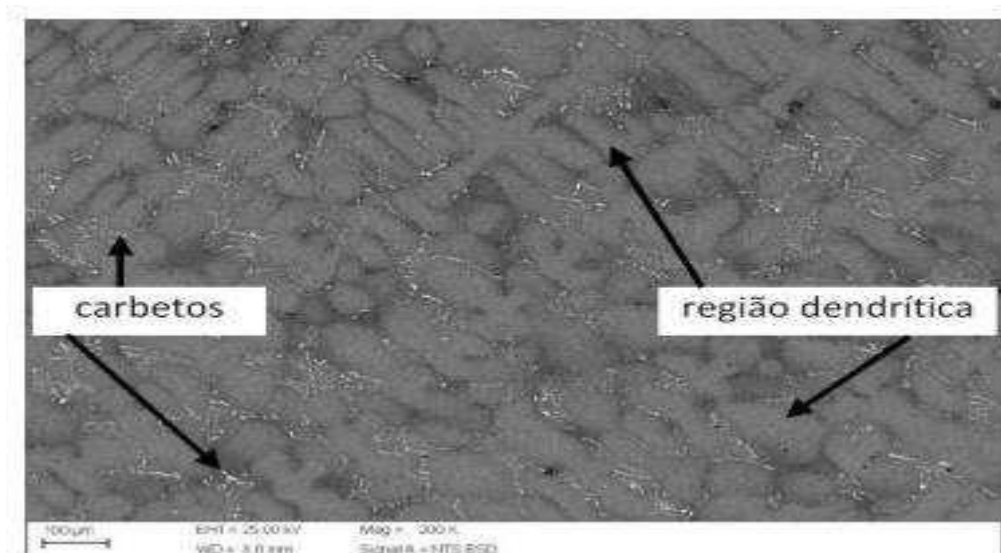
Fonte: Adaptado de ZHAO et al (2008).

A superliga MAR-M246 possui elevados teores de Níquel e presença significativa de Cromo, dois elementos metálicos que possuem elevada resistência à corrosão em diversos ambientes para a superliga, além de uma alta resistência ao descolamento dos óxidos que são formados em altas temperaturas. O níquel também tem a função de evitar a fratura devido aos íons de cloro. O molibdênio, por sua vez, é um endurecedor por solução sólida, fortalecendo a matriz da superliga e proporciona uma resistência mecânica elevada, mesmo sem a realização de ensaios térmicos na liga, podendo ainda formar carbonetos na matriz da liga. O molibdênio em maiores teores fornece maior resistência contra a corrosão em frestas e furos para a liga (ANTOSZCZYSZYN, 2014).

Devido a suportar temperaturas acima de 1000°C, a superliga MAR-M246 vem tomando o lugar de outras ligas, como o caso da IN713C, que era amplamente utilizada em pás de turbinas. Com essas turbinas passando da faixa de 1080° em algumas seções durante a operação, a MAR-M246 juntamente da MAR-M247 começaram a virar preferencia para essas aplicações (RESENDE, 2022)

A MAR-M246 tem sua estrutura dendrítica, uma das formas mais comuns das ligas se solidificarem, com uma matriz  $\gamma$  e uma fase  $\gamma'$ , presente nas ligas a base de Níquel. A composição da matriz possui diversos elementos, como Co, Mo, W, Cr, Ta, Zr e B. Alguns desses elementos são responsáveis pela formação de carbeto e boretos. Na Figura 3 é possível notar a presença de carbeto e da região dendrítica da superliga MAR-M246.

*Figura 3 - Microestrutura da superliga MAR-M246 obtida por MEV.*



Fonte: RESENDE (2022).

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Produção da superliga MAR-M246

A superliga MAR-M246 foi produzida pela técnica de fusão por indução a vácuo e vazada em moldes cerâmicos. Cada molde cerâmico possuía 14 barras em formato cilíndrico com 15 mm de diâmetro e 130 mm de comprimento. A Figura 4 apresenta um molde cerâmico antes e após o vazamento do material.

*Figura 4 - Molde cerâmico antes (direita) e depois (antes) do vazamento do material*



Fonte: BALDAN (2013)

As barras foram cortadas no formato adequado para cada experimento. Optou-se por cortar as amostras pela técnica de eletroerosão a fio devido à grande dificuldade encontrada no corte mecânico, além de evitar o aquecimento excessivo do material, que poderia causar modificações microestruturais no mesmo. Após o corte, as amostras apresentaram 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, aproximadamente.

### **3.2 Caracterização da microestrutura do material de partida**

Uma amostra foi preparada para análise microestrutural do material no estado bruto de fusão. Essa amostra foi embutida a quente com resina fenólica, lixada com lixas à base de carbetto de silício (SiC) (#320, #400, #600, #800, #1200) e polida com alumina de 1 e 0,3  $\mu\text{m}$  e sílica coloidal 0,04 e 0,02  $\mu\text{m}$  (diluída 50% em volume em água destilada). A amostra foi caracterizada com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi modelo TM 3000, através de trabalho em cooperação com o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João Del Rei (DEMEC-UFSJ).

### **3.3 Ensaios de oxidação isotérmicos**

Para os ensaios de oxidação isotérmica, todas as amostras foram lixadas com lixas à base de carbetto de silício (#320, #600), colocadas em ultrassom por 15 minutos, desengorduradas com álcool isopropílico e secas ao ar livre.

As amostras foram colocadas dentro de cadinhos de alumina para evitar que algum pedaço de óxido fosse perdido caso descolasse da amostra durante o ensaio de oxidação. Os cadinhos (11 mm de altura, 10mm de diâmetro inferior e 11 mm de diâmetro superior) foram fornecidos pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos do DEMAR – EEL/USP (Departamento de Engenharia de Materiais - Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo). Cada amostra foi inserida cuidadosamente no cadinho de modo que a sua superfície inferior não ficasse em contato com o fundo do cadinho. A Figura 5 apresenta uma amostra lixada e polida para a caracterização microestrutural do material de partida (amostra 1), uma amostra antes do ensaio de oxidação (amostra 2), uma amostra após o ensaio de oxidação (amostra 3) e o conjunto cadinho + amostra utilizado para os ensaios de oxidação isotérmica (amostra 4).

*Figura 5 - Amostra lixada e polida para a caracterização microestrutural do material de partida (amostra 1), amostra antes do ensaio de oxidação (amostra 2), amostra após o ensaio de oxidação (amostra 3) e o conjunto cadinho + amostra utilizado para os ensaios de oxidação (amostra 4)*



Fonte: Autoria própria (2022)

Os conjuntos cadinho + amostra foram inseridos em um forno tipo mufla em condições isotérmicas a 800°C em um período de até 240 horas e ao ar estático. As amostras foram retiradas a cada 24 horas até o período de 120 horas e a última amostra foi retirada após 240 horas de ensaio. Com o intuito de verificar a resistência à oxidação das superligas em temperaturas mais altas e tentar obter uma variação de massa significativa, foram realizados ensaios a 1000 °C. Além disso, as temperaturas de 800 e 1000 °C são próximas da temperatura de aplicação destas ligas nos turbo-compressores de motores a diesel e a gasolina, respectivamente. Foi utilizada uma amostra para cada condição de tempo e temperatura. Após os ensaios, todas as amostras foram resfriadas ao ar.

A massa das amostras antes e depois dos ensaios foi medida com o auxílio de uma balança analítica modelo ATX224 da marca Shimadzu (precisão de  $\pm 0,1$  mg) e, de posse destes valores, foi possível calcular a variação de massa por unidade de área ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) em função do tempo de oxidação para a superliga MAR-M246.

A caracterização microestrutural das amostras oxidadas utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura foi realizada através da cooperação com o Prof. Dr. Artur Mariano de Sousa Malafaia, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João Del Rei (DEMEC-UFSJ).

### 3.4 Medidas de dureza

A amostra no estado bruto de fusão e todas as amostras oxidadas foram submetidas a medidas de microdureza Vickers utilizando um microdurômetro modelo HMV-2T da marca Shimadzu. A carga utilizada foi de 2kgf e o tempo de carga foi de 20 segundos. Foram realizadas 5 medidas em posições aleatórias de cada amostra. O valor médio da dureza com o respectivo desvio padrão foi calculado para cada condição de ensaio. O valor da dureza destas amostras foi calculado através da fórmula  $HV = \frac{1,8544 * F}{d_m^2}$ , onde  $d_m$  é a média das duas diagonais e F é a força aplicada.

### 3.5 Massa específica

Para a determinação da massa específica, uma amostra que passou pela preparação metalográfica foi pesada com o auxílio de uma balança analítica modelo ATX224 Shimadzu, precisão de  $\pm 0,1\text{mg}$ . Após isso, foi calculado o volume da amostra com o auxílio de um paquímetro com precisão de 0,05 mm.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Massa específica da liga**

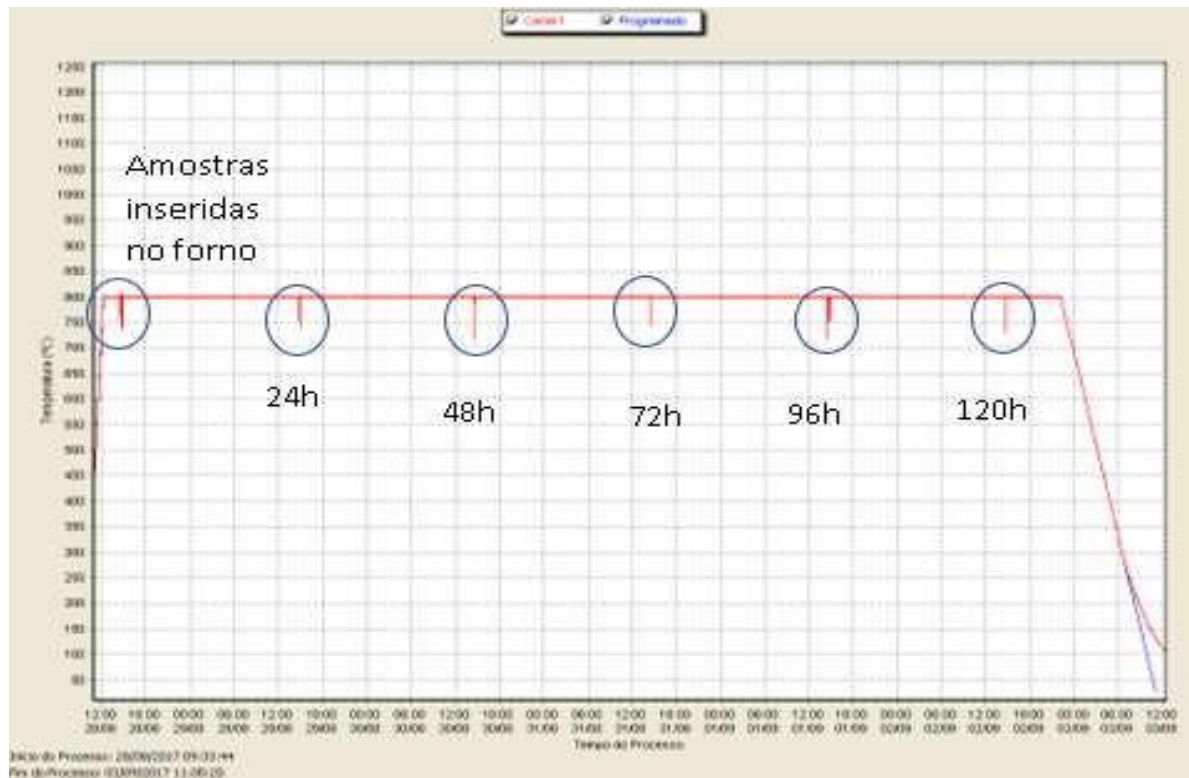
A massa específica da superliga MAR-M246 foi calculada com base em uma amostra representativa, dividindo-se a massa da amostra pelo seu volume. Para a superliga MAR-M246 com massa de 0,8394 g e volume de 0,1059 cm<sup>3</sup>, o valor da massa específica calculada foi de 7,93 g/cm<sup>3</sup>. O valor encontrado, quando comparado com o valor teórico de 8,44 g/cm<sup>3</sup>, apresenta uma diferença de 0,51 g/cm<sup>3</sup>, com percentual de 6,43% (RESENDE, 2022).

Isso pode ser devido aos defeitos e porosidade que podem estar presentes no material fundido, interferindo diretamente no cálculo da massa específica experimental.

### **4.1 Monitoramento da temperatura nos ensaios de oxidação**

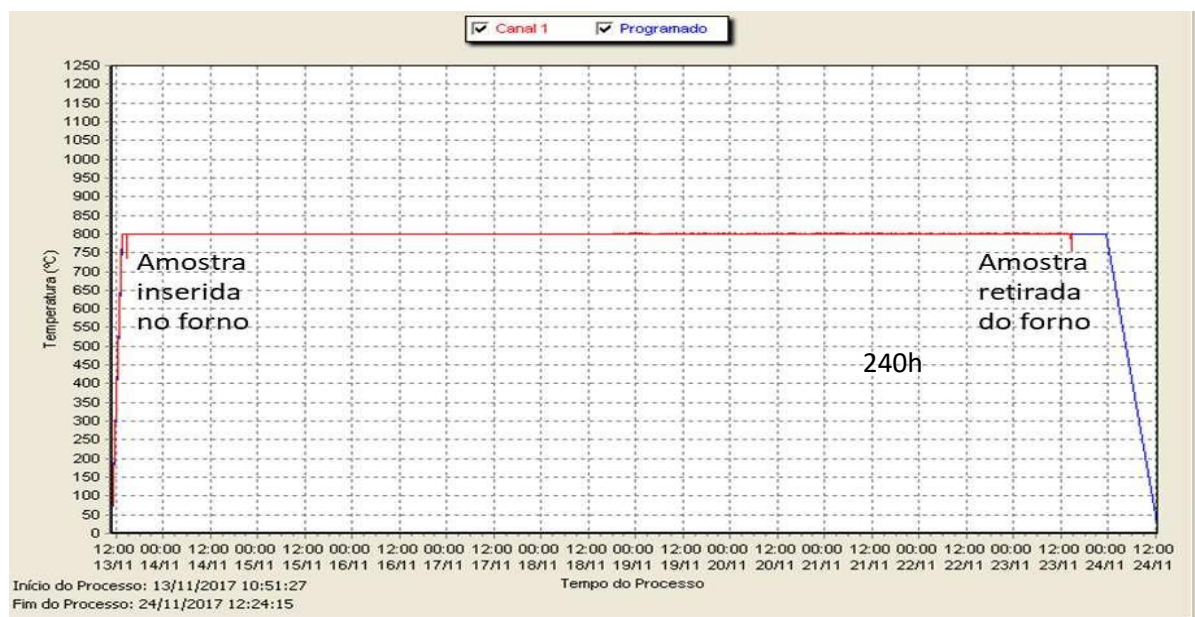
As Figuras 6 e 7 apresentam o gráfico de monitoramento da temperatura durante os ensaios a 800 °C obtido através do software próprio da mufla que controla o equipamento. O forno foi programado para aquecer gradualmente até a temperatura desejada a uma taxa de 10 °C/minuto. Podem-se observar as pequenas variações de temperatura quando a porta do forno foi aberta para inserir e retirar as amostras. Podem-se observar também a estabilidade térmica do forno e a ausência de flutuações térmicas durante os ensaios. Os gráficos de monitoramento a 1000 °C possuem o mesmo comportamento dos registrados a 800 °C.

Figura 6 - Comportamento do forno durante os ensaios de oxidação isotérmica a 800°C por 120h, evidenciando os períodos de abertura e fechamento da porta do forno.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 7 - Comportamento do forno durante os ensaios de oxidação isotérmica a 800°C por 240h, evidenciando os períodos de abertura e fechamento da porta do forno.

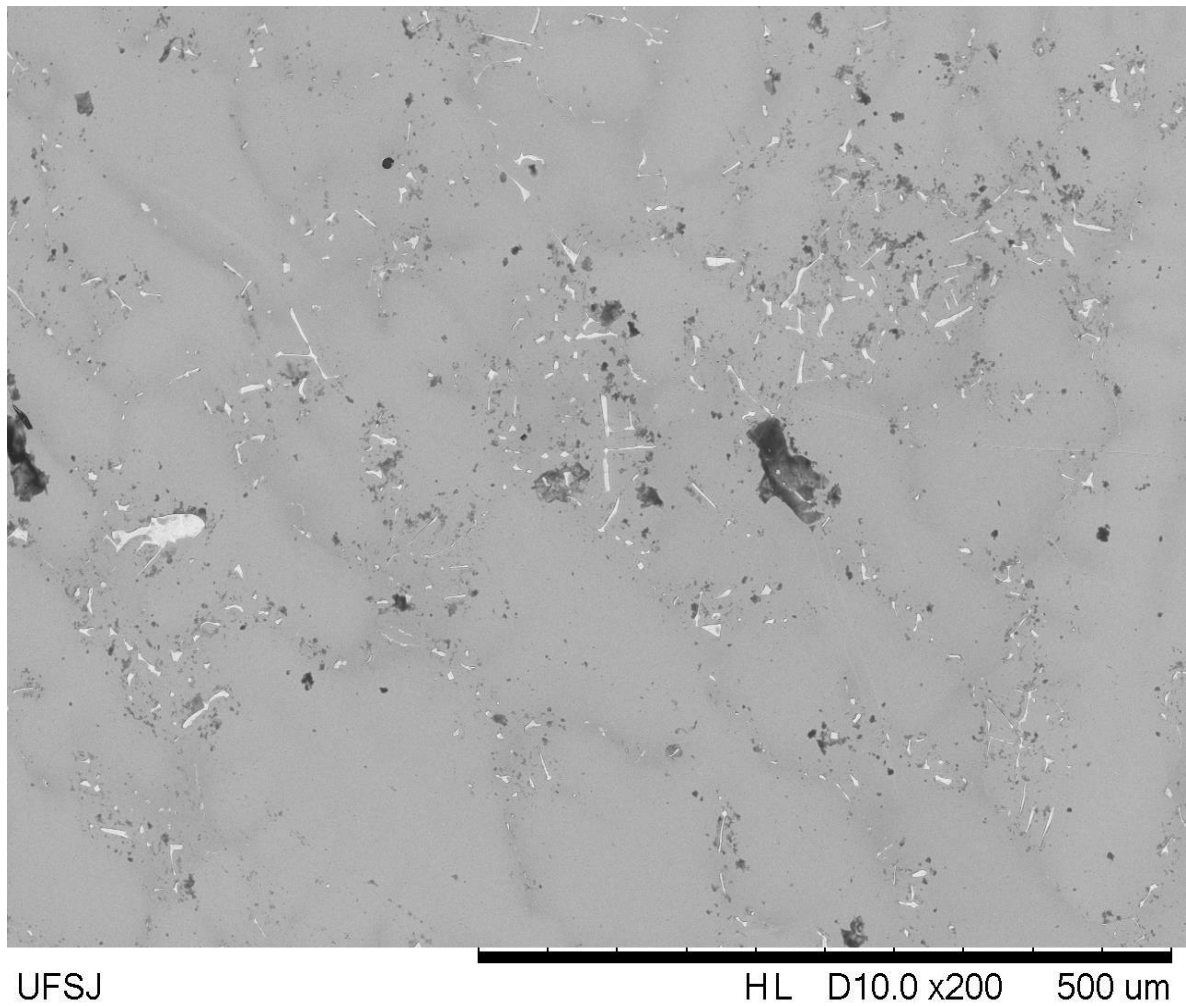


Fonte: Autoria própria (2022)

## 4.2 Caracterização da microestrutura do material de partida

A Figura 8 apresenta a microestrutura da superliga MAR-M246 no estado bruto de fusão. É possível verificar uma microestrutura dendrítica contendo, provavelmente, carbeto com diferentes tamanhos e morfologias na região interdendrítica. Os pontos pretos podem ser poros presentes no material fundido.

*Figura 8 - Microestrutura da superliga MAR-M246 no estado bruto de fusão.*



Fonte: Autoria Própria (2022).

### 4.3 Ensaios de oxidação isotérmica a 800 °C

A Tabela 3 apresenta as massas das amostras antes e depois do ensaio, a respectiva variação de massa ( $\Delta m$ ), a área e variação de massa por unidade de área ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) da superliga MAR-M246 após ensaio de oxidação isotérmica a 800°C. A área de cada amostra foi calculada através da relação  $A = 2\pi r(r+h)$ , onde “h” é a espessura e “r” é o raio da amostra.

*Tabela 3 - Massa das amostras antes e depois do ensaio (mg), variação de massa (mg), área das amostras ( $\text{cm}^2$ ) e variação de massa por unidade de área ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) da superliga MAR-M246 após ensaio de oxidação isotérmica a 800°C.*

| <b>Tempo de oxidação (h)</b> | <b>Massa da amostra antes do ensaio (mg)</b> | <b>Massa da amostra depois do ensaio (mg)</b> | <b><math>\Delta m</math> (mg)</b> | <b>Área da amostra (<math>\text{cm}^2</math>)</b> | <b>Variação de massa por unidade de área (<math>\text{mg}/\text{cm}^2</math>)</b> |
|------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 24                           | 843,7                                        | 844,0                                         | 0,30                              | 1,5496                                            | 0,1936                                                                            |
| 48                           | 832,2                                        | 832,8                                         | 0,60                              | 1,5444                                            | 0,3885                                                                            |
| 72                           | 839,4                                        | 839,9                                         | 0,50                              | 1,5442                                            | 0,3238                                                                            |
| 96                           | 840,3                                        | 840,8                                         | 0,50                              | 1,5504                                            | 0,3225                                                                            |
| 120                          | 886,5                                        | 886,9                                         | 0,50                              | 1,5991                                            | 0,3126                                                                            |
| 240                          | 851,8                                        | 852,3                                         | 0,50                              | 1,5649                                            | 0,3195                                                                            |

Fonte: Autoria própria (2022).

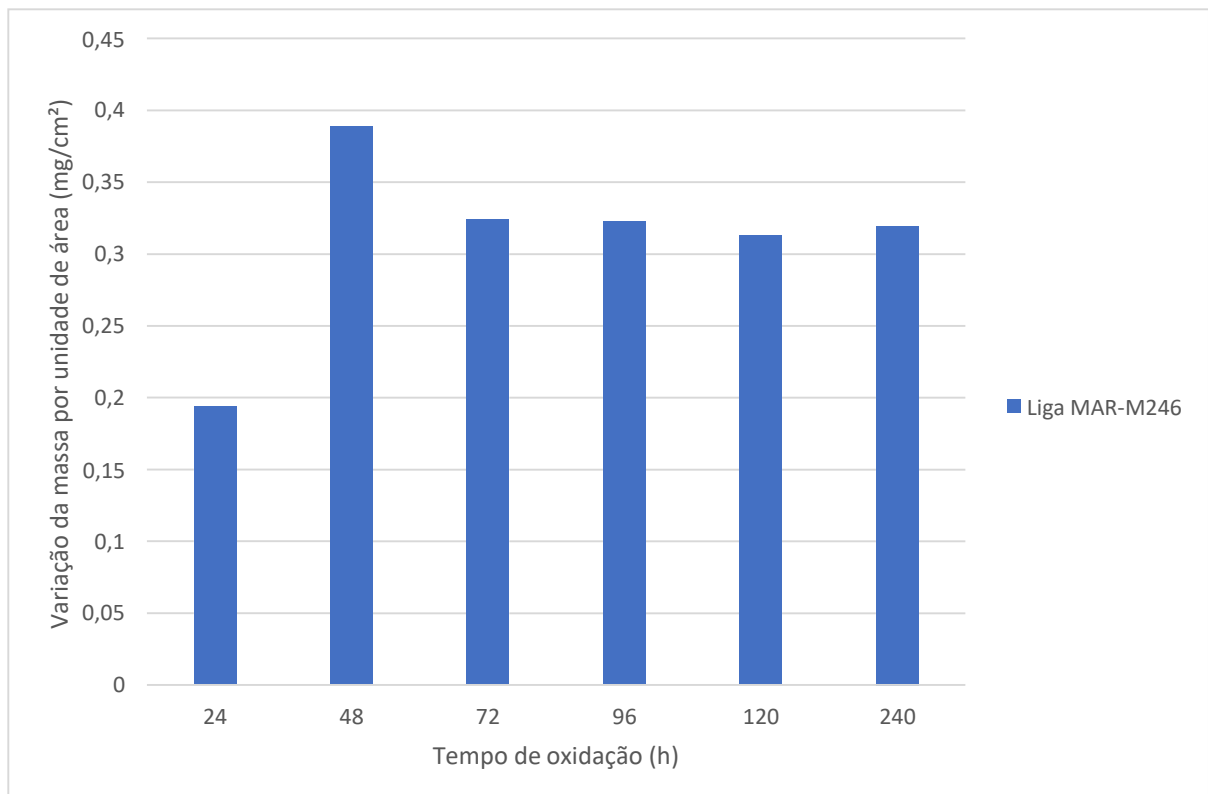
A partir dos dados obtidos da Tabela 3, foi possível traçar um gráfico para comparar as respectivas variações de massas por unidade de área em função do tempo de oxidação para a liga, apresentado na Figura 9.

É possível observar que a variação de massa por unidade de área caracteriza-se por uma evolução complexa não linear com um aumento nas primeiras horas de oxidação seguida de uma estabilização até 96 horas e uma diminuição no final dos testes.

Tal comportamento pode indicar que um regime misto de oxidação é estabelecido devido a um crescimento simultâneo da camada de óxidos e sua perda

por evaporação dos produtos de oxidação. A maior variação de massa por unidade de área a 800°C foi observada para a liga MAR-M246 após 48 horas (0,3885 mg/cm<sup>2</sup>). A diminuição aparente na taxa de oxidação no final do teste de oxidação pode ser também uma consequência da perda de produtos de oxidação por descamação (*spallation*) devido à diferença entre os coeficientes de expansão do substrato e da camada de óxido em crescimento. Nesta fase do estudo, julgou-se não necessário tentar identificar uma lei de oxidação para esta liga, dada a complexidade da cinética registrada, as pequenas variações de massa e as imprecisões experimentais relacionadas à medição da massa. Outras investigações usando uma termobalança com alta precisão para medição de massa (análise de termogravimetria - precisão de 1 µg) são necessárias para esclarecer o comportamento dessas ligas frente à oxidação nestas condições experimentais.

Figura 9 - Variação de massa por unidade de área em função do tempo de oxidação a 800°C para a liga MAR-M246.



Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.4 A Ensaios de oxidação isotérmica a 1000 °C

A Tabela 4 apresenta as massas das amostras antes e depois do ensaio, a respectiva variação de massa ( $\Delta m$ ), a área e variação de massa por unidade de área ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) da superliga MAR-M246 após ensaio de oxidação isotérmica a 1000°C. Como foi observada a presença de óxidos no fundo do cadinho para esta temperatura (Figura 10), todas as medidas foram realizadas em utilizando o conjunto cadinho + amostra, considerando que toda a variação de massa é decorrente da amostra, ou seja, o cadinho de alumina não influenciou nas variações de massa.

*Figura 10 - Óxido descolado da amostra e no fundo do cadinho após o ensaio de 1000°C.*



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 4 - Massa das amostras antes e depois do ensaio (mg), variação de massa (mg), área das amostras (cm<sup>2</sup>) e variação de massa por unidade de área (mg/cm<sup>2</sup>) da superliga MAR-M246 após ensaio de oxidação isotérmica a 1000°C.

| <b>Tempo De Oxidação (h)</b> | <b>Massa da amostra antes do ensaio (mg)</b> | <b>Massa da amostra depois do ensaio (mg)</b> | <b><math>\Delta m</math> (mg)</b> | <b>Área da amostra (cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Variação de massa por unidade de área (mg/cm<sup>2</sup>)</b> |
|------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 24                           | 2905,1                                       | 2905,3                                        | 0,2                               | 1,5117                                  | 0,1323                                                           |
| 48                           | 2875,3                                       | 2876,3                                        | 1,0                               | 1,5456                                  | 0,6466                                                           |
| 72                           | 2916,4                                       | 2916,8                                        | 0,4                               | 1,5498                                  | 0,2581                                                           |
| 96                           | 2891,2                                       | 2890,9                                        | -0,3                              | 1,5504                                  | -0,1935                                                          |
| 120                          | 3030,7                                       | 3038,9                                        | 8,2                               | 1,5541                                  | 5,2762                                                           |
| 240                          | 2936,2                                       | 2934,1                                        | -2,1                              | 1,5463                                  | -1,3580                                                          |

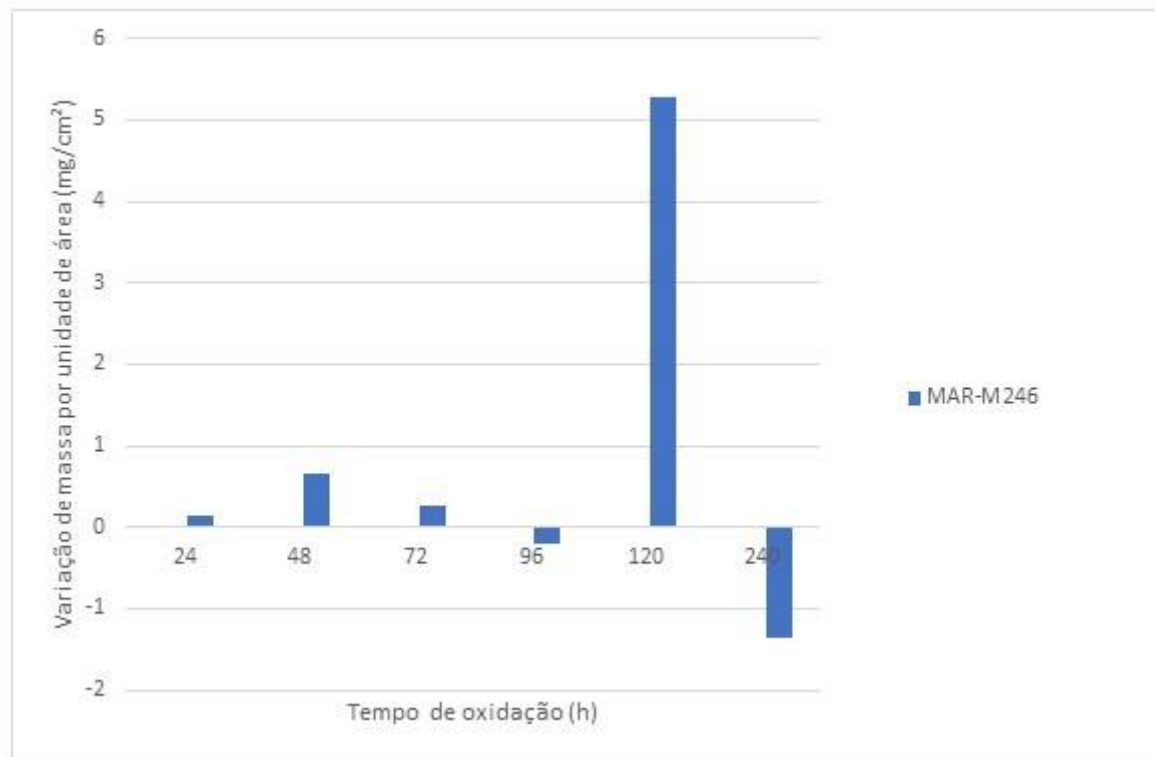
Fonte: Autoria própria (2022).

A partir dos dados obtidos da Tabela 4, foi possível traçar um gráfico para comparar as respectivas variações de massas por unidade de área em função do tempo de oxidação para a liga, apresentado na Figura 11.

Pode-se observar que as variações de massa nos ensaios de 1000°C foram significativamente maiores do que a 800°C. A maior variação de massa por unidade de área a 1000°C foi observada para a liga MAR-M246 após 120 horas (5,2762 mg/cm<sup>2</sup>).

Também é importante notar que os resultados apresentados aqui para a liga nas duas temperaturas são relativos à oxidação de curto prazo (240 horas) e, consequentemente, são puramente indicativos, sabendo-se que, para estes materiais, objetivam-se aplicações de longo prazo (milhares de horas em uso) em ambientes agressivos onde os produtos de combustão e tensões mecânicas podem acelerar o processo de corrosão. A diminuição aparente na taxa de oxidação no final do teste de oxidação para a liga estudada pode ser uma consequência da perda de produtos de oxidação por descamação (*spallation*) devido à diferença entre os coeficientes de expansão do substrato e da camada de óxido em crescimento.

Figura 11 - Variação de massa por unidade de área em função do tempo de oxidação a 1000°C para a liga MAR-M246.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Comparando os dados obtidos nos ensaios de oxidação com outros trabalhos na literatura, é possível observar que tanto a liga MAR-M246 quanto a liga MAR-M247, que possuem a composição química parecida (substituição dos átomos de Ta por Nb), o ganho de massa por área superficial apresentou-se mais significativo nos ensaios a 1000 °C do que os ensaios a 800 °C (Baldan et al., 2022).

Em outros estudos realizados em ligas a base de níquel, tanto em ensaios isotérmicos como cíclicos, foi possível perceber ganhos maiores a 1000 °C quando comparados a 800 °C. Em alguns desses estudos também houve perda de massa das amostras nos ensaios isotérmicos e cíclicos (REIS, 2020).

#### 4.5 Ensaios de dureza

A dureza da superliga MAR-M246 no estado bruto de fusão foi 412 ± 49,04 HV. As Tabelas 5 e 6 apresentam a média dos valores de dureza (em HV) das amostras oxidadas a 800 e 1000°C por até 240h. Cabe salientar que, para as amostras nas

condições de 800°C por 120h e de 1000°C por 240h, foi necessária a utilização do microscópio da marca ZEISS e modelo AXIO para medir as diagonais das indentações em virtude da dificuldade de visualizá-las no microdurômetro. Por fim, pode-se observar oscilações nos valores de dureza das amostras oxidadas a 800 e 1000°C provavelmente devido à formação de óxidos complexos durante os ensaios de oxidação das amostras. Analisando os valores obtidos e considerando o desvio padrão, o maior valor de dureza foi o da amostra oxidada a 1000°C por 96 horas ( $514 \pm 22$  HV).

*Tabela 5 - Média e o desvio padrão (em HV) dos valores de dureza das amostras oxidadas a 800°C por até 240h.*

| <b>Tempo<br/>(horas)</b> | <b>MAR-M246<br/>(HV)</b> |
|--------------------------|--------------------------|
| 24                       | $488 \pm 7$              |
| 48                       | $471 \pm 17$             |
| 72                       | $480 \pm 13$             |
| 96                       | $493 \pm 26$             |
| 120                      | 457                      |
| 240                      | 487                      |

Fonte: Autoria própria (2022)

*Tabela 6 - Média e o desvio padrão (em HV) dos valores de dureza das amostras oxidadas a 1000°C por até 240h.*

| <b>Tempo<br/>(horas)</b> | <b>MAR-M246<br/>convencional<br/>(HV)</b> |
|--------------------------|-------------------------------------------|
| 24                       | 473 ± 10                                  |
| 48                       | 483 ± 43                                  |
| 72                       | 500 ± 28                                  |
| 96                       | 514 ± 22                                  |
| 120                      | 419                                       |

Fonte: Autoria Própria (2018)

Comparando os resultados de dureza das amostras no estado bruto de fusão e das amostras oxidadas com algumas outras ligas de níquel, observa-se que a dureza dessas ligas não varia muito, com uma tendência de os valores encontrados para as amostras oxidadas serem maiores do que as amostras em estado bruto. Trabalhos realizados com a superliga MAR-M247, com a composição parecida com a MAR-M246, mostram que os resultados obtidos nesse trabalho estão coerentes com os da literatura (BALDAN, 2013).

## 5. CONCLUSÃO

As principais conclusões obtidas neste trabalho são:

- O valor da massa específica medida da superliga MAR-M246 foi 7,93 g/cm<sup>3</sup>;
- A caracterização microestrutural da superliga MAR-M246 no estado bruto de fusão apresentou uma microestrutura dendrítica contendo carbeto com diferentes tamanhos e morfologias na região interdendrítica;
- Os ensaios de oxidação isotérmica a 800°C apresentaram baixa variação de massa;
- Os ensaios de oxidação isotérmica a 1000°C apresentaram variações de massa nos significativamente maiores do que a 800°C;
- Nos ensaios de oxidação isotérmica a 1000°C foi possível evidenciar o descolamento do óxido, devido a presença do material no fundo do cadinho;
- A dureza das superligas MAR-M246 no estado bruto de fusão foi de 412 HV. Pôde-se observar oscilações nos valores de dureza das amostras oxidadas a 800 e 1000°C provavelmente devido à formação de óxidos complexos durante os ensaios de oxidação das amostras.

Segue como sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar a microestrutura e composição dos óxidos formados por microscopia eletrônica de varredura com EDS;
- Realizar ensaios de oxidação em outras temperaturas e tempos maiores para determinar o perfil e o comportamento durante oxidação isotérmica da superliga MAR-M246;
- Realizar análise do óxido superficial utilizando difração de raios x.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTOSZCZYSZYN, T.J. **Revestimentos de Liga de Níquel Inconel 625 por Plasma com Arco Transferido (PTA) sobre Aços API 5L X70 E AISI 316L**. 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Concentração de Manufatura, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: [http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao\\_159\\_tiago\\_jose\\_antoszczynszn.pdf](http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_159_tiago_jose_antoszczynszn.pdf). Acesso em jan. de 2022.

AQUINO, G. M. M. **Oxidação nas superligas de níquel IN939 e IN738LC em alta temperatura**. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2014.

BALDAN, R. **Processamento e caracterização de rotores automotivos da superliga MAR-M247**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena/SP, Brasil, 2009.

BALDAN, R. **Tratamento térmico, deposição por laser cladding e oxidação isotérmica da superliga à base de níquel MAR-M247 modificada com nióbio**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

BALDAN, R.; LATU-ROMAIN, L.; WOUTERS, Y.; CHAIA, N.; ALKMIN, L. B.; MALAFAIA, A. M. S. Isothermal short-term oxidation behavior of MAR-M246 nickel-based superalloy at 800° C and 1000° C. **Materials and Corrosion**, v. 73, n. 8, p. 1236-1247, 2022.

BHADESHIA, H. K. D. H. **Nickel Based Superalloys**. University of Cambridge. Disponível em: <http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2003/nickel.html>. Acesso em jan. de 2022.

BOWMAN, R. **Superalloys: a primer and history**. Disponível em: <http://www.tms.org/meetings/specialty/superalloys2000/superalloyshistory.html>. Acesso em jan. de 2022.

EZUGWU, E. O. High speed machining of aero-engine alloys. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering, v. 26, p. 1-11, 2004. HUANG, H.-E.; KOO, C.-H. **Characteristics and Mechanical Properties of Polycrystalline CM 247 LC Superalloy Casting**: MATERIALS TRANSACTIONS, v. 45, n. 2, p. 562-568, 2004.

MALAFIA, A. M. de S. **Oxidação cíclica em alta temperatura de ligas ferrosas fundidas de baixo custo**. 2013. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Oxidação Cíclica em Alta Temperatura de Ligas Ferrosas Fundidas de Baixo Custo, São Carlos, 2013.

REED, R.C. **The Superalloys**: Fundamentals and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

REIS, R de A. **Estudo do comportamento das superligas MAR-M246 convencional e modificada com nióbio oxidadas ciclicamente a 900 e 1.000 °C**. 2020. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de São João del-Rei, São João del Rei, 2020.

RESENDE, R. U. C. de. **Obtenção de camadas com alta resistência a oxidação na superliga de níquel mar-m246 a partir da co-deposição de alumínio e silício utilizando o processo "halide activated pack cementation"**. 2022. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Itajubá Programa de Pós-Graduação em Materiais Para Engenharia, Itajubá, 2022.

STASZEWSKA, K.; SCENDO, M. Mechanism and kinetics oxidation of Inconel 617 and 625 alloys. **Technical Issues**, n. 1, p. 82-89, 2016.

TRINDADE, V; B. **Corrosão de ligas metálicas em altas temperaturas**. Vila Velha: Above Publicações, 2013. 97 p.

VARAVALLO, Rogério. **Avaliação da resistência a fadiga em alta temperatura da superliga MAR-M247 (Nb)**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18150/tde-17072012-111457/pt-br.php>. Acesso em: jan. 2022.

ZHAO, K.; LOU, L. H.; MA, Y. H.; HU Z. Q. Effect of minor niobium addition on microstruture of a nickel-base directionally solidified superalloy, **Materials Science and Engineering: A**, v.476, n. 1-2, p. 372 - 377, mar. 2008.