



**FACULDADE SATC**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**



**RELATÓRIO DE ESTÁGIO DE ENGENHARIA MECÂNICA NA ÁREA DE  
PESQUISA EM UMA FUNDIÇÃO**

Júlio Cechella Demétrio

Criciúma,  
Junho, 2020



Júlio Cechella Demétrio

## RELATÓRIO DE ESTÁGIO DE ENGENHARIA MECÂNICA NA ÁREA DE PESQUISA EM UMA FUNDIÇÃO

Relatório de Estágio apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade SATC, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

---

Luiz Alberto Zaage, Eng.

---

Reginaldo Rosso Marcello, Me. Eng.

Criciúma,  
Junho, 2020

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço aos meus pais e namorada, que sempre me apoiaram e sempre me aconselharam em todas as decisões difíceis.

Agradeço à Faculdade SATC e todos seus colaboradores por proporcionarem um ensino de qualidade e a equipe Sical pela orientação neste estudo.

À família pelo incentivo e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O processo de fundição pode ser utilizado para fabricação de peças ou obtenção de lingotes em laminações de barras e perfis, esse processo envolve fabricação de ferramentais e moldes, tratamento térmico e em alguns casos usinagem. O tratamento térmico é responsável por trazer a peça características como ductilidade, tenacidade e ajustar a resistência mecânica conforme especificações de projeto. No estágio realizado na Sical, foi possível acompanhar e colaborar com o estudo de definição de peças fundidas, partindo da fusão do metal até o tratamento térmico em peças de aço inoxidável para hidrogenação. Também acompanhado estudos de melhoria de processos para redução de custos e aumento da eficiência dos processos utilizados. Neste trabalho serão apresentados resultados obtidos nos estudos e processos analisados durante o período de estágio.

Palavras-chave: Fundição, tratamento térmico, processos de fundição, aço inoxidável.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sucatas separadas para processo de limpeza (do autor, 2020).....	10
Figura 2 - Panela vazando metal liquido dentro do molde (do autor, 2020).....	12
Figura 3 – Metalografias (1) com ataque químico e (2) sem ataque químico após tratamento térmico de normalização (do autor, 2020).....	13
Figura 4 - Pá diretriz após desmoldagem com canais de alimentação (do autor, 2020).....	13
Figura 5 - Pá diretriz após corte dos canais com lança (do autor, 2020).....	14
Figura 6 - Peça após corte de canais com pó de ferro (do autor, 2020).....	15
Figura 7 - Curva de aquecimento do tratamento de austenitização (do Autor, 2020).	16
Figura 8 - Peças recém tiradas do forno (do autor, 2020).....	17

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Composição química aço inoxidável martensítico ASTM A743 CA6NM.....	9
Tabela 2 – Comparativo de custo entre cortes.....	14

## **LISTA DE ABREVIações**

### **SIGLAS**

SICAL – Siderúrgica Catarinense Limitada

ASTM – Sociedade americana de testes e materiais (American Society for Testing and Materials)

SATC – Associação Benéfica da Indústria Carbonífera Catarinense

VPL – Valor presente líquido

VAUE - Valor anual uniforme equivalente

CAUE – Custo anual uniforme equivalente

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES.....</b>	<b>6</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 A EMPRESA .....</b>	<b>8</b>
<b>2. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS .....</b>	<b>9</b>
<b>3. CONCLUSÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>19</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A fundição é um processo de fabricação em que o metal é submetido a alta temperatura, logo após vazado dentro de um molde que pode ser descartável ou permanente. Apesar de ser um dos processos de fabricação mais antigos, a tecnologia de fundição está em constante evolução dos processos e ligas utilizadas, permitindo uma melhoria constante que reflete no aumento da vida útil das peças e aumento do rendimento de máquinas e equipamentos.

Uma das principais atividades da engenharia dentro de uma fundição é definir a melhor forma de fabricar determinada peça para garantir a qualidade final desejada, analisando desde a fabricação do ferramental de fundição até a usinagem ou acabamento. Dentro disso, são definidos parâmetros como temperatura de vazamento do metal, tempo de desmoldagem e tratamentos térmicos empregados de acordo com a aplicação da peça e as normas internacionais para cada tipo de metal.

Como objetivo de estudo e por ter mais disponibilidade de peças no processo de fabricação durante o período de estágio, foi acompanhado o processo de fabricação em peças de aço inoxidável martensítico, desde a preparação da carga para fundição até o tratamento térmico das peças. Neste tipo de aço, o processo de tratamento térmico tem uma função essencial de transformar a estrutura cristalina de austenita (obtida após a solidificação do metal) em estrutura martensita e atingir as propriedades mecânicas desejadas.

Serão analisados também, alguns pontos para redução de custos, tempos do processo de fabricação, eficiência dos processos utilizados e o estudo de alteração do processo de corte de canais para peças de aço inoxidável.

### 1.2 A Empresa

A Siderúrgica Catarinense (SICAL), foi fundada em 1970 em Criciúma, estado de Santa Catarina, sendo inicialmente uma empresa para reforma de tratores e fundição de peças em alumínio e bronze, mais tarde em 1972 começou a fundir peças em ferro e aço para atender empresas de mineração.

A SICAL trabalha com vendas de peças fundidas e usinadas sob encomenda em ligas de ferro fundido, aço carbono e aço inoxidável atendendo principalmente os

ramos de mineração, ferroviário e de hidrogeração. A empresa possui capacidade para fundir 300 toneladas de metal por mês e uma estrutura capaz de beneficiar toda peça fundida, embora trabalhe também com a terceirização de alguns serviços como tratamentos térmicos, termoquímicos e usinagem de peças em geral.

## **2. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS**

O principal objetivo do estágio realizado na empresa SICAL, foi o acompanhamento do processo de fusão, corte de canais e tratamento térmico em peças de aço inoxidável martensítico, assim como também a análise de melhorias para os processos acompanhados.

As turbinas utilizadas em hidroelétricas são fabricadas de material fundido que tem como característica boa resistência mecânica e elevada resistência à corrosão, devido ao contato direto com a água e partículas de areia. As peças fundidas durante o período de estágio, foram peças de bomba para hidrogeração fabricadas na liga ASTM A743 grau CA6NM. Esta liga possui baixo teor de carbono (máximo 0,06%), que exige cuidados desde a sucata que será utilizada como também na programação da carga fundida anteriormente, pois sujeiras de ligas com alto teor de carbono que ficam encrustadas no forno podem causar alterações no teor de carbono. Por ter média dureza, geralmente abaixo de 285 HB, o tratamento térmico deste material requer maior cuidado para a obtenção da dureza desejada.

A preparação de carga para um forno de fundição é definida através da porcentagem dos elementos químicos indicados na norma do material e o peso total é definido pelo peso total das peças que serão fundidas mais o peso referente aos canais de alimentação e enchimento. Portanto deve-se conhecer todo o material que está sendo utilizado na montagem da carga, para garantir que nenhum elemento químico fique fora da faixa indicada pela norma. A Tab. 1 mostra a composição química do material analisado.

Tabela 1: Composição química aço inoxidável martensítico ASTM A743 CA6NM

Elemento químico	C (máx.)	Mn (máx.)	Si (máx.)	Cr	Ni	Mo	P (máx.)	S (máx.)
Percentual	0,06	1,00	1,00	11,5-14,0	3,5-4,5	0,4-1,0	0,04	0,03

Fonte: ASTM (2011, pg. 4)

Para montar a carga deste material é utilizado sucata de aço inoxidável com baixo teor de carbono, cromo metálico, níquel, molibdênio e material de retorno que são os canais de enchimento e massalotes removidos de peças fundidas anteriormente na mesma liga.

Toda a sucata utilizada na montagem da carga passa por um processo de limpeza para remover sujeiras superficiais e retirada da umidade, a fim de evitar a presença de hidrogênio e oxigênio durante o processo de fundição, esse processo é uma prática nova adotada ao procedimento e que está ainda em processo de evolução. Anteriormente a utilização desse processo, verificava-se a formação de grande quantidade de escória no metal líquido, exigindo etapas adicionais na elaboração do metal.



Figura 1 - Sucatas separadas para processo de limpeza (do autor, 2020)

O processo de limpeza da sucata consiste em aquece-la a uma certa temperatura, em um forno de tratamento térmico, e mantê-la nessa temperatura por um determinado tempo. Esse aumento de temperatura faz com que a umidade presente na sucata seja eliminada, resolvendo o primeiro problema da presença de hidrogênio e oxigênio.

A primeira etapa do teste feito foi um ano antes do início do estágio. A sucata foi aquecida a 600 °C e mantida nessa temperatura por 2 horas e após isso deixavam a sucata resfriar ao ar livre até atingir uma temperatura de manuseio, porém foi constatado que após o material resfriar a sucata ficava com a superfície oxidada e prejudicando a fusão do material.

Com base nos gráficos de tratamento térmico e estudos da influência da temperatura nos materiais, foi definido uma nova temperatura para aquecimento da sucata. Sabe-se que ao submeter um aço a uma alta temperatura pode ocorrer alterações na estrutura do material e reações químicas entre a superfície do material e aos elementos químicos presentes no meio em que ele se encontra.

Foi então alterada a temperatura de aquecimento para 300 °C mantido por 3 horas seguido por um resfriamento ao ar livre. Com essa temperatura foi possível resolver o problema de umidade na sucata e ter maior eficiência na limpeza de sujeiras superficiais.

Com este procedimento adotado, foi possível verificar menor nível de inclusões no metal líquido, assim como também uma grande redução dos problemas gerados pela presença de hidrogênio no processo de fusão.

Durante o processo de fusão dos aços inoxidáveis, são utilizados mais dois processos que auxiliam na remoção de impurezas e desoxidação do metal líquido. Um deles é a utilização de uma pequena quantidade de alumínio e cal, que agem como formador de escória, e esta fica na superfície do metal líquido e é retirada manualmente do banho. Outro processo utilizado é a rinsagem, que consiste na injeção de gás inerte, neste caso foi utilizado argônio, após o metal líquido ser transposto para a panela de vazamento. Este processo faz com que as impurezas que ainda estão presentes no banho, sejam transformadas também em escória e fiquem na parte de cima da panela, lado oposto a válvula de saída do metal líquido (Pereira, 2009).



Figura 2 - Panela vazando metal líquido dentro do molde (do autor, 2020)

Para o processo de vazamento do metal líquido no molde são definidos pela engenharia o tipo de panela que será utilizada e a temperatura de vazamento ideal de acordo com a liga que será fundida. Os tipos de panela mais utilizados são a panela “bico de chaleira”, mais utilizada para vazamentos de ligas de ferro fundido, e panela de válvula, utilizada para vazamento de ligas de ferro e aço. A grande diferença entre ambas é o fluxo de saída do metal líquido, sendo que a panela “bico de chaleira” proporciona um fluxo turbulento e de maior velocidade devido a maior distância entre o ponto de saída do metal e o ponto de entrada no molde e a panela de válvula permite que o fluxo de saída seja menos turbulento e com menor velocidade, pois o ponto de saída do metal da panela e entrada no molde é menor. A temperatura de vazamento é definida de acordo com o diagrama de fases ferro-carbono, porém deve ser considerado uma temperatura maior no forno de indução por causa da perda de temperatura durante a passagem do metal líquido do forno para a panela de vazamento e do processo de desoxidação com gás argônio.

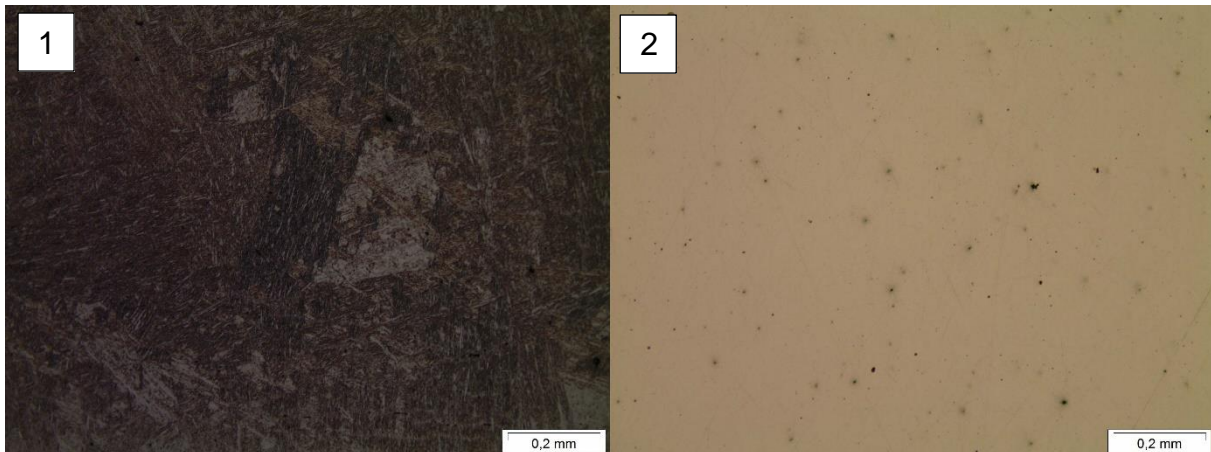


Figura 3 – Metalografias (1) com ataque químico e (2) sem ataque químico após tratamento térmico de normalização (do autor, 2020)

Após o processo de fusão as peças permanecem dentro do molde de areia por 48 horas para que o material solidifique e tenha um resfriamento lento. Apesar de tratar-se de um aço inoxidável martensítico, as peças fundidas no aço ASTM A743 grau CA6NM brutas de fundição possuem estrutura austenítica, que será posteriormente transformada para estrutura martensítica no processo de tratamento térmico, porém antes das peças serem tratadas é preciso retirar os canais de alimentação e enchimento e passar pelo processo de limpeza mecânica, feita com o jato de granalha.



Figura 4 - Pá diretriz após desmoldagem com canais de alimentação (do autor, 2020)



O corte de canais nas peças de aço inoxidável pode ser feito de três diferentes formas. O primeiro processo adotado, anteriormente ao início do estágio, era o corte com eletrodo de grafite, que tinha baixa produtividade e gerava alto nível de absorção de carbono na superfície do material retirado, impossibilitando a reutilização dos canais para futuras cargas de fundição na mesma liga.

Durante o tempo de estágio, o corte de canal era feito com lança de corte autógena, que tem por característica média produtividade e baixo nível de inclusão, permitindo a reutilização dos canais em futuras cargas de fundição da mesma liga. Para a execução do corte as peças são aquecidas a uma temperatura de 680 °C e mantidas nessa temperatura por 2 horas para facilitar o corte com a lança.



Figura 5 - Pá diretriz após corte dos canais com lança (do autor, 2020)

O corte com lança é um processo eficiente, porém tem custo alto e produtividade limitada. Na Fig. 5 é mostrado uma pá após o corte com lança, outro ponto negativo deste processo é a geração de grande quantidade de borras de metal que ficam grudadas na peça. Essas borras precisam ser removidas no processo de acabamento com discos abrasivos elevando o custo de fabricação das peças. Com intuito de reduzir os custos de processo, foi estudado a implantação de outro método de corte, o oxicorte a pó de ferro.

Tabela 2 - Comparativo de custo entre cortes

Método	Investimento	VPL	VAUE	CAUE
Lança de corte	R\$ 20.000,00	-R\$ 2.063.260,47	-R\$ 202.265,69	R\$ 202.265,69
Pó de ferro	R\$ 55.000,00	-R\$ 1.507.983,23	-R\$ 147.830,72	R\$ 147.830,72

Na Tab. 2 é mostrado uma parte do estudo de viabilidade entre os dois métodos de corte, considerando custos de investimento, consumíveis, energia, mão de obra e depreciação para 25 anos. Para fins comparativos, foi considerando que não possuíamos nenhum dos dois processos e analisado qual seria o mais viável para implantação e utilização.

Para esse estudo foi analisado uma peça de aproximadamente uma tonelada que tínhamos o consumo real da quantidade de lanças usada para corte de canal e estimado a quantidade necessária de pó de ferro para trabalhar a mesma peça. De acordo com a Tab. 2, podemos afirmar que o oxicorte a pó de ferro, apesar de ter um custo mais elevado para aquisição do equipamento, é a opção mais viável a longo prazo, pois os custos de consumíveis são mais baixos comparados com a lança de corte.

Após a apresentação do estudo de viabilidade para aquisição da máquina de oxicorte a pó de ferro, foi aprovada a compra da máquina e desativado o corte com lança. Este novo método se mostrou mais eficiente e apresentou menor retrabalho para remoção de borras.



Figura 6 - Peça após corte de canais com pó de ferro (do autor, 2020)



Após as peças passarem pelos processos de corte de canais e acabamento, elas são encaminhadas para o processo de tratamento térmico. As peças fundidas na liga ASTM A743 grau CA6NM passam pelos tratamentos de normalização, que ocorre a transformação da austenita para martensita, e revenimento que podem ser feitos duas vezes em alguns casos.

O tratamento de normalização tem como objetivo obter microestrutura homogênea e refinada em substituição de uma microestrutura grosseira oriunda da fundição e proporciona o aumento da resistência mecânica e tenacidade. Para essa liga a normalização é feita entre as temperaturas de 1030 °C e 1080 °C e a curva de aquecimento é definida de acordo com a maior espessura da peça a ser tratada. Na Fig. 7 é mostrado um exemplo de uma peça que foi tratada de acordo com a curva TT-3 com dados coletados dos sensores de temperatura do forno de tratamento.

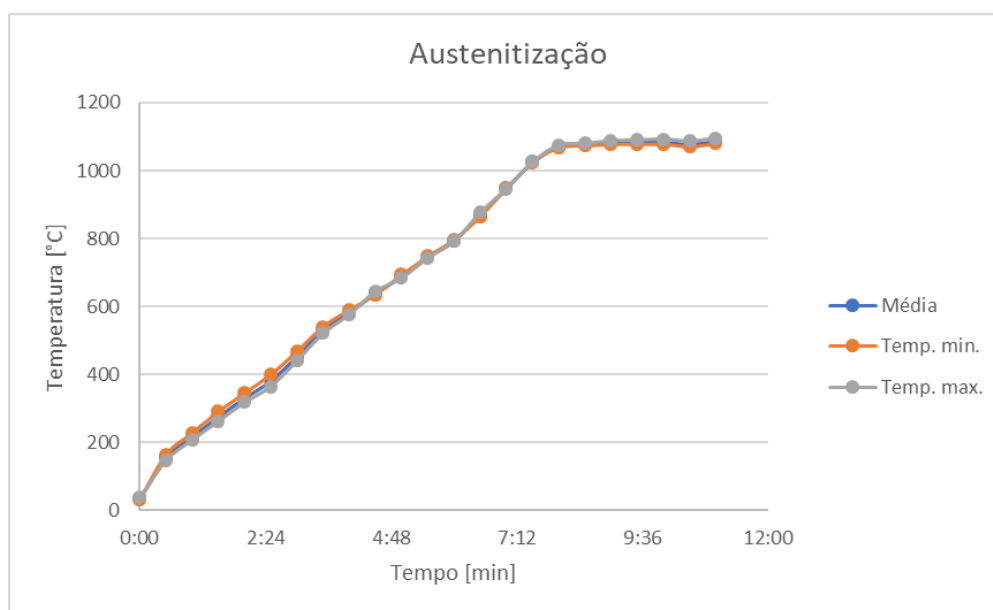


Figura 7 - Curva de aquecimento do tratamento de austenitização (do Autor, 2020).

Após atingir a temperatura estipulada, o forno de tratamento mantém essa temperatura por três horas para que a temperatura seja homogeneizada na peça. Com isso iniciasse a fase de resfriamento da peça tratada, como o objetivo deste tratamento não é aumentar a dureza da peça, é feito resfriamento lento. Logo na sequência do resfriamento, deve-se iniciar o tratamento de revenimento, para evitar trincas decorrentes da tensão de transformação da estrutura austenita para martensita.

A função do tratamento de revenimento é aliviar as tensões decorrentes da normalização, consistindo no aquecimento a temperaturas inferiores a curva Ac1 com objetivo de aumentar a ductilidade, tenacidade e ajustar, resistência mecânica para o nível desejado e reduz a dureza do material. Para as peças analisadas, o revenimento foi realizado a uma temperatura de 680 °C e após isso realizado resfriamento lento para que a dureza fique dentro do especificado na norma do material.



Figura 8 - Peças recém tiradas do forno (do autor, 2020)

Em alguns casos em que a dureza fica acima da especificada, é necessário realizar um segundo revenimento. A temperatura do segundo revenimento pode variar de 560 a 680 °C, dependendo de quanto precisa diminuir a dureza, e segue com resfriamento lento também. Um estudo de alteração no resfriamento das peças está em andamento e não foi possível finalizar no período de estágio. Está sendo estudado e realizando testes de resfriamento com as peças dentro do forno por um determinado tempo, a fim de obter uma menor taxa de resfriamento. Como os testes não foram concluídos, não foi possível avaliar se os resultados serão positivos ou negativos.

### 3. CONCLUSÃO

Com o decorrer deste estágio se fizeram necessários diversos conhecimentos técnicos e teóricos adquiridos no período de graduação, deixando clara a relevância e qualidade dos conteúdos apresentados e estudados.

Durante este período foi possível observar a importância do setor de engenharia para a definição dos processos de fabricação de peças fundidas que garantam um resultado de acordo com solicitações de normas e projetos, sendo do mais simples ao mais complexo.

Foi analisado também a importância de estar sempre atento as novas tecnologias para que possam ser adotadas ao processo de fabricação, trazendo melhores resultados, reduções de custos e simplificando processos que impactam nos resultados de uma organização. Com isso entende-se a importância da cultura de melhoria contínua e os bens que ela proporciona.

Durante as discussões de melhorias e definição de processos foi possível observar que existem competências que são fundamentais para o desenvolvimento profissional de um engenheiro, como trabalho em equipe, pro atividade e responsabilidade, comprovando a importância dos trabalhos baseados em problemas, projeto SATC2030, implantado na instituição.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM A743/A743M – 06. Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application<sup>1</sup>.

PEREIRA, R. R., 2009, “Ajuste da Composição Química do Aço CA-50 em Usina Siderúrgica Semi-Integrada”, Monografia de graduação, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 36 p.

SICAL, Empresa. Disponível em: [https://www.sical.com.br/empresa.php?id\\_e=1](https://www.sical.com.br/empresa.php?id_e=1). Acesso em: 11 de junho de 2020.

INFOMET, Normalização. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=219>. Acesso em: 17 de junho de 2020.