



OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDIÇÃO DE COMPONENTES PARA MINERAÇÃO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO

Desenvolvimento de liga em aço ao manganês

Dra. Bianka Nani Venturelli
e MSc. Thiago Nagasima

O QUE É O IPT?

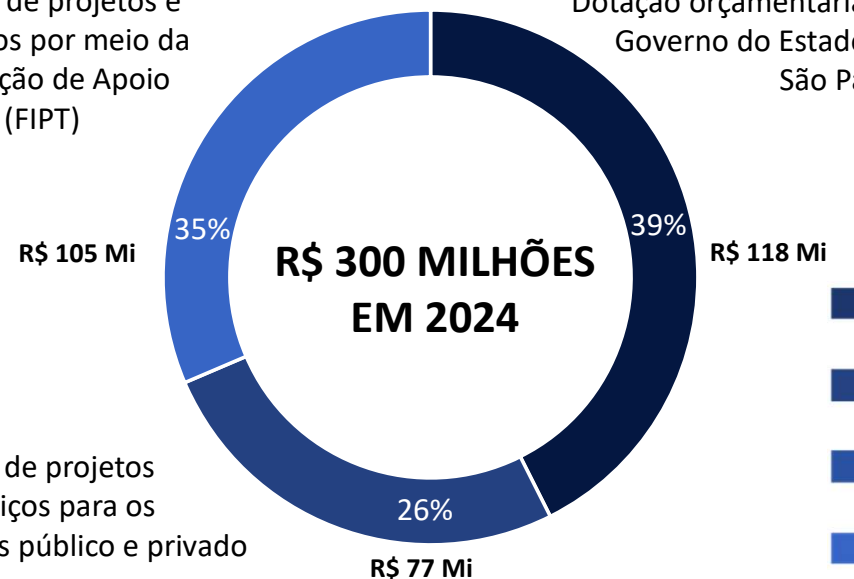
EXISTIMOS PARA PROVER SOLUÇÕES
TECNOLÓGICAS PARA A INDÚSTRIA,
OS GOVERNOS E A SOCIEDADE,
HABILITANDO-OS A SUPERAR
SEUS DESAFIOS E PROMOVENDO
QUALIDADE DE VIDA



RECEITAS

Venda de projetos e
serviços por meio da
Fundação de Apoio
ao IPT (FIPT)

Dotação orçamentária do
Governador do Estado de
São Paulo



IPT EM NÚMEROS*



125 ANOS DE
CONTRIBUIÇÕES PARA
A SOCIEDADE



> 1000
FUNCIONÁRIOS E
COLABORADORES



50% DE RECEITA
COM INOVAÇÃO



> 3.170
CLIENTES
ATENDIDOS



> 16.200
DOCUMENTOS
TÉCNICOS EMITIDOS



> 2000 PROCEDIMENTOS
DE ENSAIOS E ANÁLISES
NO PORTFÓLIO



35% DOS PROJETOS
IPT COM IMPACTO
DIRETO EM ESG

* 2024



LOCALIZAÇÃO ESTRATÉGICA

- USP
- Instituto Butantan
- Centro Tecnológico da Marinha
- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN



O QUE FAZEMOS?

PESQUISA,
DESENVOLVIMENTO
E INOVAÇÃO

PRODUTOS E PROCESSOS
SOFTWARES
DA BANCADA AO PILOTO
APOIO DE FOMENTO
EMBRAPII

TESTES, ENSAIOS
E ANÁLISES

PARECERES TÉCNICOS
AVALIAÇÃO
DE PRODUTOS
CERTIFICAÇÃO
DE PRODUTOS

INSPEÇÕES E
MONITORAMENTOS

OBRAS E ESTRUTURAS
MÁQUINAS E
EQUIPAMENTOS
ORGANISMO DE
INSPEÇÃO ACREDITADO

DESENVOLVIMENTO
METROLÓGICO,
MEDIÇÕES
E CALIBRAÇÕES

PROGRAMAS
DE PROFICIÊNCIA
DESENVOLVIMENTO
DE PADRÕES
METROLOGIA AVANÇADA

MATERIAIS DE
REFERÊNCIA
CERTIFICADOS

METAIS
CERÂMICAS
MINERAIS
VISCOSIDADE
AREIA NORMAL

ENSINO
TECNOLÓGICO

MESTRADO
PROFISSIONAL
CURSOS DE EXTENSÃO
CURSOS SOB DEMANDA



DIFERENCIAIS

#inovação



+ 120 mil m² de laboratórios
+ 1000 profissionais qualificados
Inúmeros caminhos para inovar

#qualidade



+ 2 mil ensaios e calibrações
+ 20 mil documentos técnicos por ano
Referência em qualidade dos serviços

#satisfação



Nível de excelência no NPS
NPS 84
(Net Promoter Score)

MATERIAIS AVANÇADOS

CORROSÃO E PROTEÇÃO

CORROSÃO NA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS
CORROSÃO INTERNA, CORROSÃO EXTERNA E MONITORAMENTO
REVESTIMENTOS METÁLICOS, ORGÂNICOS E NANOESTRUTURADOS
LIGAS DE ALTA RESISTÊNCIA À CORROSÃO



42

PESSOAS

PROCESSOS METALÚRGICOS

FUNDIÇÃO
MANUFATURA ADITIVA
PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO
PROCESSAMENTO MINERAL
REFINO PIROMETALÚRGICO E ELETROQUÍMICO

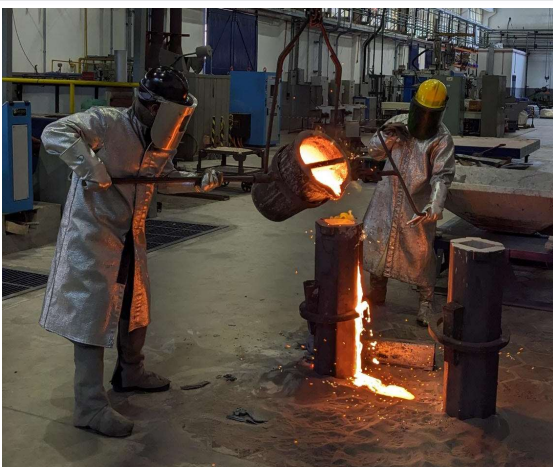


58

PESSOAS

DADOS RÁPIDOS

- UNIDADE EMBRAPII: MATERIAIS DE ALTO DESEMPENHO
- 36% DE MESTRES E DOUTORES
- CAPACITAÇÃO TÉCNICA MULTIDISCIPLINAR
- MODELAGEM FÍSICA E MATEMÁTICA
- DESENVOLVIMENTO DE CONCEITO, PROTÓTIPO E ESCALONAMENTO DE PROCESSOS
- INFRAESTRUTURA FÍSICA EM ESCALAS DE BANCADA E PILOTO



CONTEXTO

- A adição de 0,5 a 3 % de Nb em um aço Hadfield tem potencial para **aumentar a resistência ao desgaste**, devido à presença de partículas NbC de elevada dureza.
- Por isso, é importante a obtenção de microestrutura austenítica com os carbonetos de Nb bem distribuídos na matriz após tratamento térmico de solubilização.
- No entanto, o aço Hadfield com essas partículas pode apresentar **redução significativa da resistência ao impacto**.
- A viabilidade e otimização do teor de Nb adicionado ao aço Hadfield foi analisada em projetos anteriores sendo estabelecido a adição de 2%Nb para a produção do britador cônico.



AÇO HADFIELD COM NB

- aço Hadfield com adição de 2% Nb após tratamento térmico de solubilização a 1170°C.
- Dureza inicial: 280 ± 10 HV10kgf.

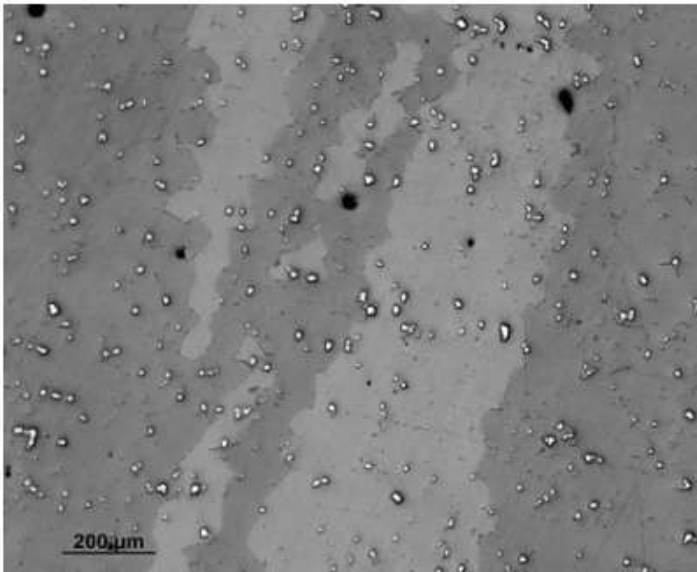


Imagem em MO. Ataque químico: Nital, 3%.
Aumento original de 100x.

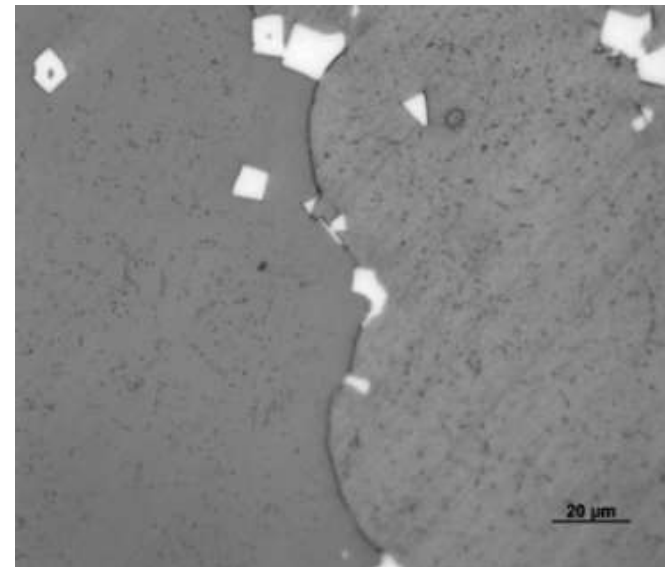
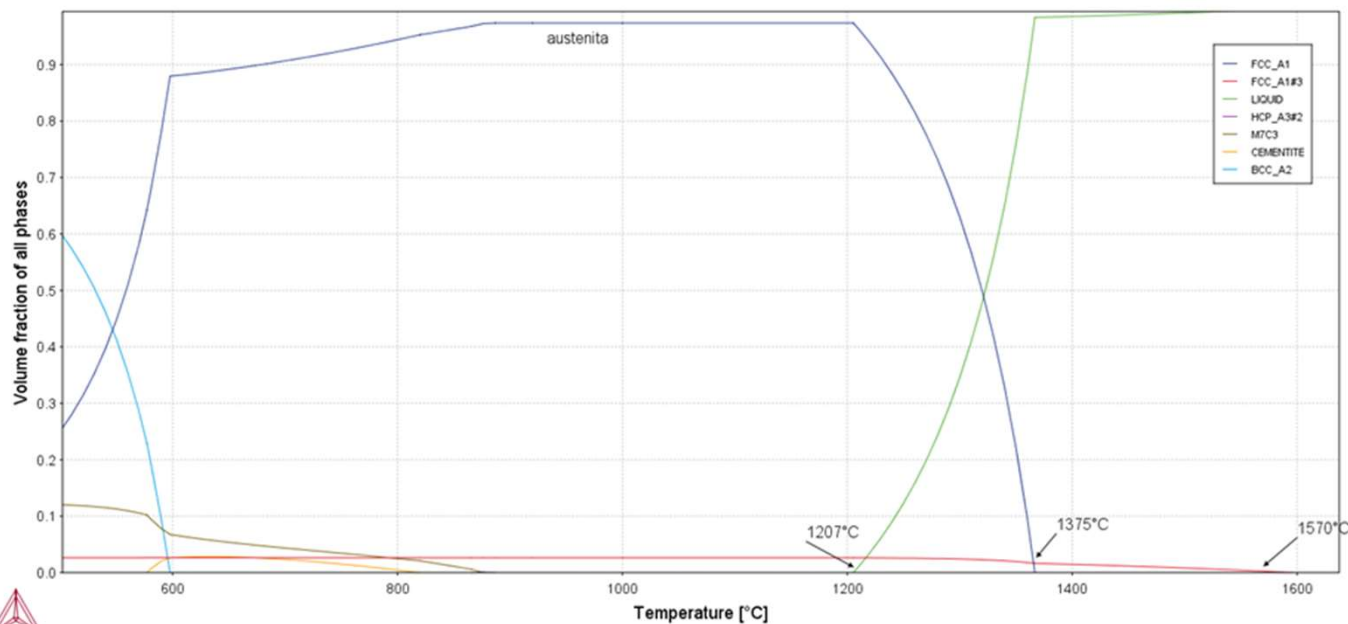


Imagem em MO. Ataque químico: Nital, 3%. Aumento original de 500x.

SEQUENCIA DE SOLIDIFICAÇÃO

- Diagrama da fração volumétrica das fases (líquido, austenita, cementita, ferrita, M_7C_3 e NbC) em função da temperatura para o aço Hadfield com adição de Nb (1,5%C, 13%Mn, 0,65%Si, 1%Mo e 2%Nb). TN1
- Fração volumétrica de NbC a 1170°C: 1,6%.



Slide 10

TN1

A liga fundida é 13% de Mn. Tá certo esses 18% aqui?

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:26:26.352

OBJETIVOS

- O MAGMASOFT® (versão 6.1) foi utilizado para a ^{TN1} otimização do projeto de fundição do revestimento e manto de britadores cônicos produzidos em aço Hadfield.
- Desenvolvimento de liga: aço Hadfield com adição de Nb.
- Objetivo: Resistência a abrasão e moderada resistência ao impacto.



Slide 11

TN1

Fiz a troca de tudo que estava como Magma e Magmasoft por MAGMASOFT®, pois nosso marketing cobra da gente kkkkk

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:03:03.502

METODOLOGIA

- Revisão do sistema de fundição (canais e massalotes) proposto pela empresa de fundição indicada pelo Cliente, utilizando o MAGMASOFT®.
- Definição de faixas de composição química dos principais elementos a serem controlados (Mn, C, Nb, Ti, P e S).
- Orientação para a técnica de adição do Ti e Nb: temperatura e tempo para obter adequada dissolução das adições; rendimentos previstos.



METODOLOGIA

- Orientação para o tratamento térmico de solubilização.
- Definição de corpo de prova representativo das peças, a ser fundido do mesmo material e submetido ao mesmo ciclo de tratamento térmico aplicado nas peças, visando a caracterização do material ao final da produção.
- Caracterização microestrutural (MO e MEV) e análise química do corpo de prova.



SIMULAÇÕES NO MAGMASOFT®

- O MAGMASOFT® foi utilizado para a otimização do sistema de fundição para produção dos protótipos de britadores cônicos (constituído de dois componentes: manto e revestimento) de modo a garantir a sanidade desses componentes.
- A apresentação será focada no desenvolvimento para o revestimento.

**Revestimento para
britador cônico**



SIMULAÇÕES NO MAGMASOFT®

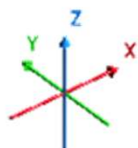
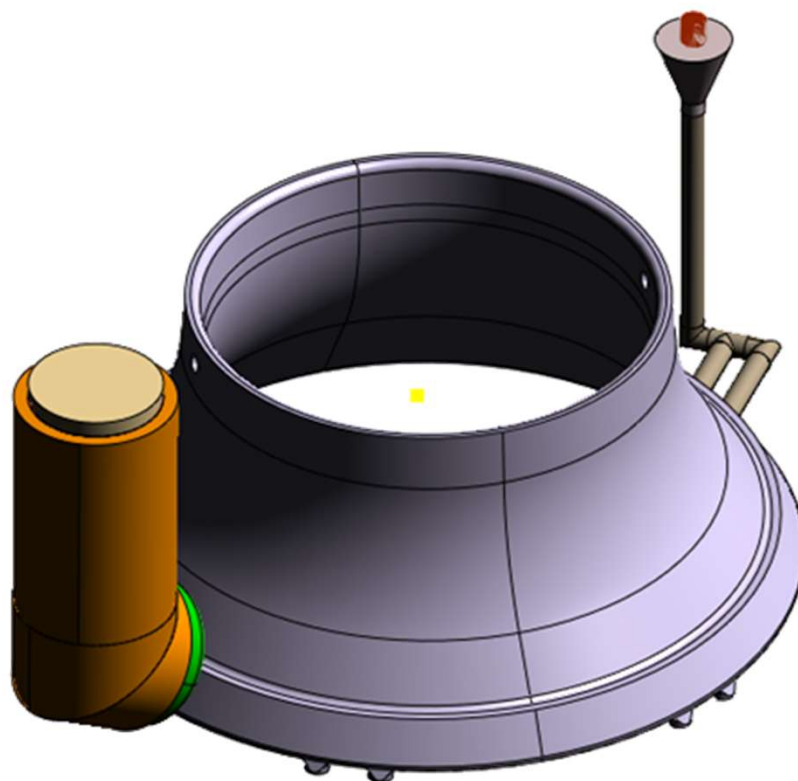
Nas simulações, as seguintes características foram avaliadas:

- Ocorrência de turbulências durante o enchimento, principalmente no canal de descida.
- Tempo de enchimento do molde e temperatura ao final do enchimento nos locais críticos das peças.
- Sequência de solidificação do conjunto peça/massalote e sistema de canais.
- Sanidade dos protótipos fundidos: presença de porosidades em regiões críticas das peças.



VERSÃO ORIGINAL – SIMULAÇÕES MAGMASOFT®

Revestimento para
britador cônico



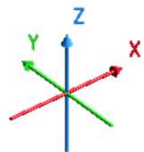
MAGMA

ipt

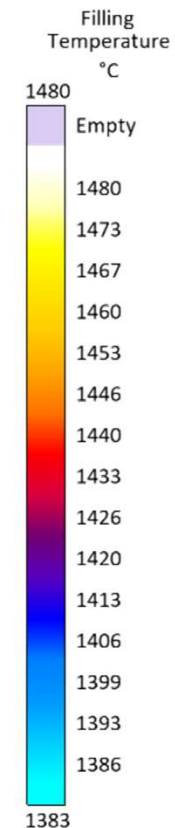
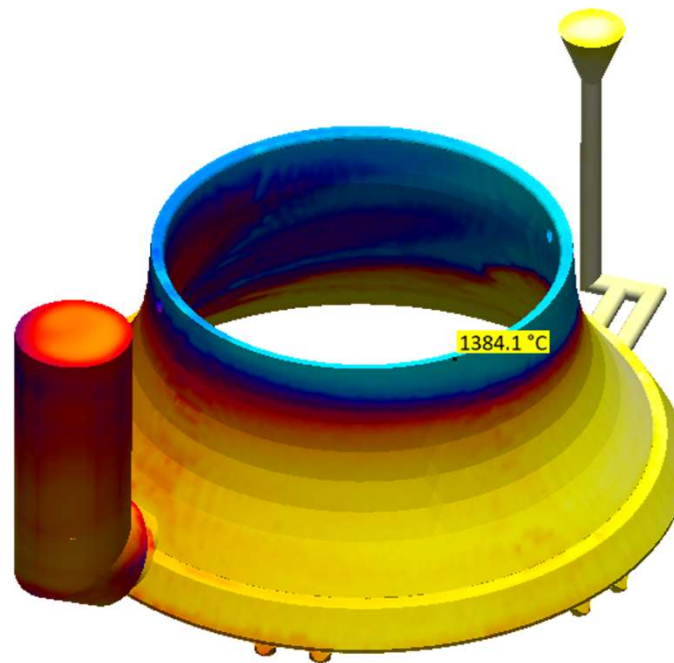
SÃO
PAULO
GOVERNO DO ESTADO

SIMULAÇÃO DO ENCHIMENTO – VERSÃO ORIGINAL

Observa-se perda de temperatura, entretanto tratando-se de uma liga com altíssimo intervalo de solidificação há fluidez para encher a peça completamente.

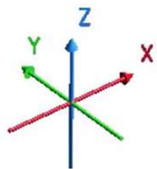


v16
Pouring, Filling Temperature
1min 12.6s
X-Ray: on

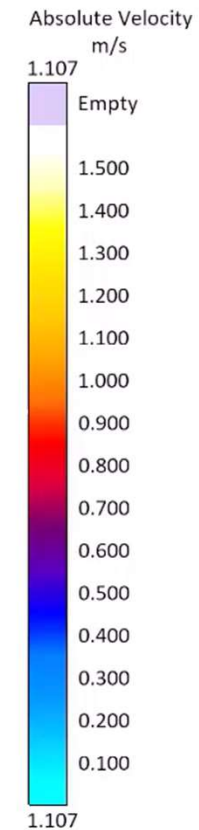


SIMULAÇÃO DO ENCHIMENTO – VERSÃO ORIGINAL

Observa-se velocidades um pouco elevadas no início do enchimento da peça, porém depois o enchimento segue tranquilo.

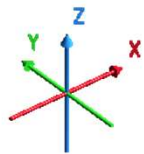


v16
Pouring, Absolute Velocity
0.0ms, 0.00 %
X-Ray: on

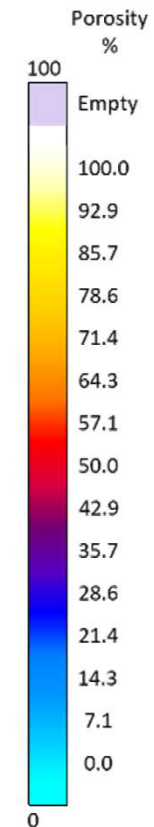


POROSIDADES/RECHUPES

Há indicações de TN1 rechupes ao longo de toda a peça, em maioria de baixa intensidade e um rechupe de maior intensidade ao lado dos ataques.



v16
Solidification & Cooling, Porosity
4h 20min 3s, 100.00 %
X-Ray: on, range [3000100000]%%



Slide 19

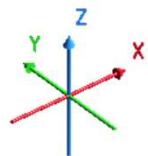
TN1

Aqui eu colocaria uma imagem com o raio-x para indicar onde temos rechupes de maior intensidade

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:06:36.856

CRITÉRIO DE NIYAMA

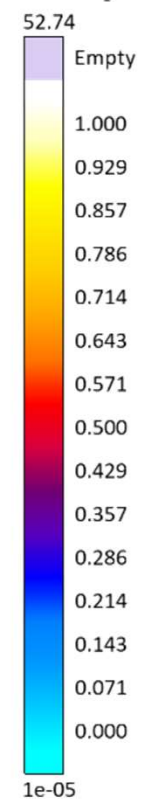
Há indicações de Niyama inferiores a 0,2 ao longo de toda a peça, indicando altas tendências de microrrechupes.



v16
Solidification & Cooling, Niyama Criterion
4h 20min 3s
X-Ray: on, range [0.00, 0.20] -



Niyama Criterion



Slide 20

TN1

Eu retiraria este valor de 0.286. Como estamos com o raio-x para 0 a 0.2, o que está na imagem não está acima de 0,2.

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:08:52.748

CONSIDERAÇÕES

- Os resultados de enchimento (*Temperature* e *Filling Temperature*) mostraram a ocorrência de uma perda de temperatura durante o enchimento, que chega a atingir valores próximos da Tliquidus na região superior da peça. Mas, o material possui elevada fluidez que propicia o enchimento, sendo verificada experimentalmente.
- Os resultados de *velocity* (enchimento) mostraram velocidades de enchimento relativamente altas no início gerando pequenas turbulências, porém o enchimento segue normalmente até o seu término.
- Presença de microporosidades na região inferior da peça – resultados de *porosity* e critério de Niyama (<0.2 na peça).

É possível melhorar o sistema de alimentação original?

Com a presença de Carbonetos de Nióbio na peça há maior resistência ao desgaste, porém há uma preocupação maior com a sanidade da peça para evitar falhas no material

TN1



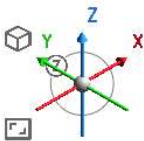
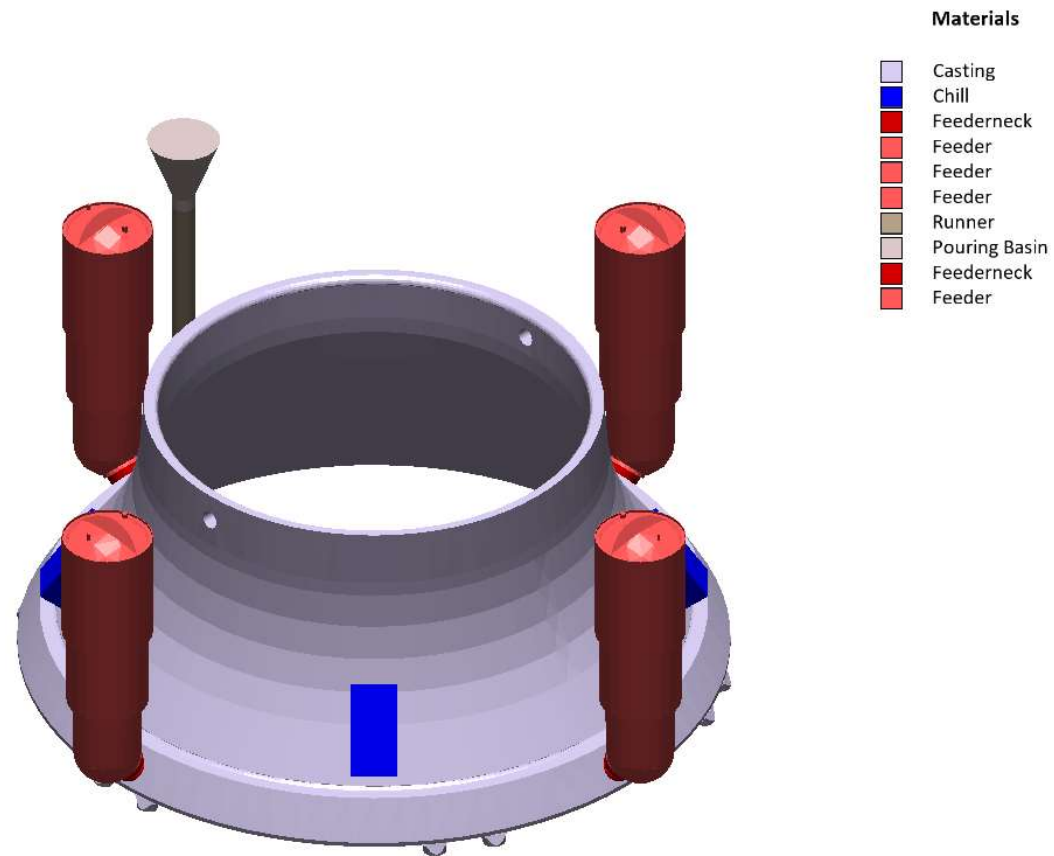
Slide 21

TN1

Coloquei esse cara aqui para motivar a peça produzida com 4 luvas e posteriormente a otimização.

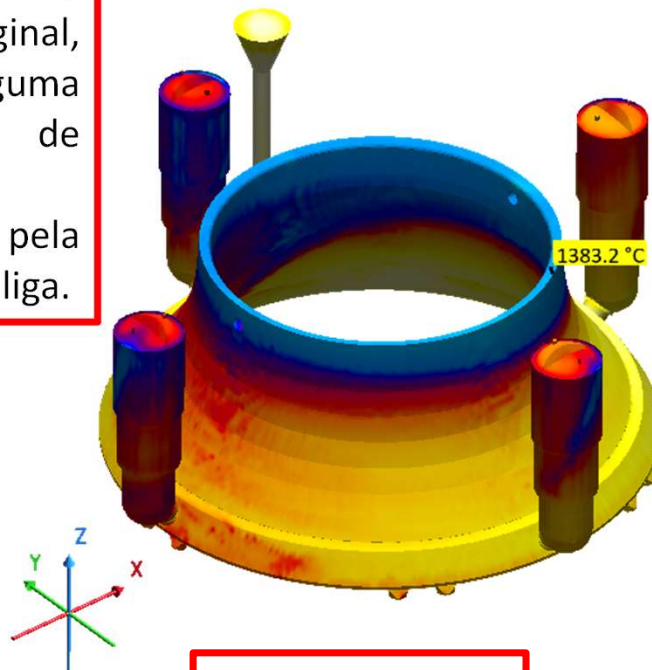
Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:12:56.984

VERSÃO PRODUZIDA – SIMULAÇÕES MAGMASOFT®



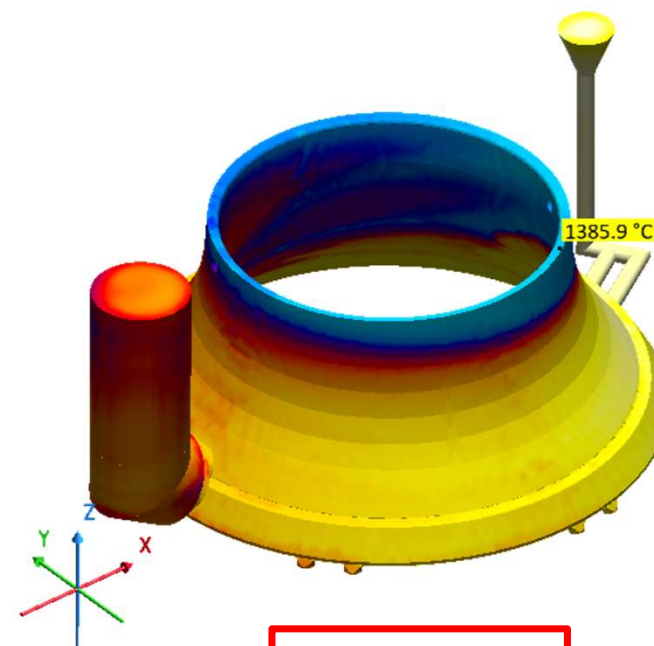
SIMULAÇÃO DO ENCHIMENTO – VERSÃO PRODUZIDA

Assim como a versão original, apresenta alguma perda de temperatura, compensada pela alta fluidez da liga.



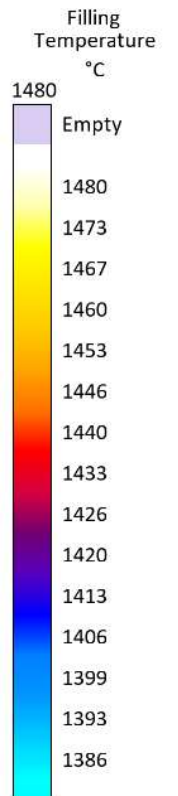
Versão Produzida

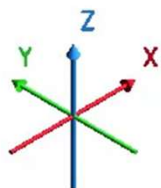
v15
Pouring, Filling Temperature
1min 13.4s
X-Ray: on



Versão Original

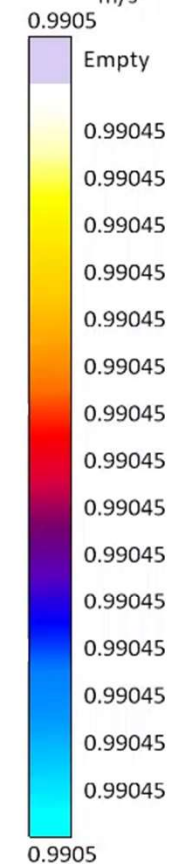
v16
Pouring, Filling Temperature
1min 12.6s
X-Ray: on





v15
Pouring, Absolute Velocity
0.0ms, 0.00 %
X-Ray: on

Absolute Velocity
m/s



Slide 24

TN1

Cuidado com as escalas: para velocidade recomendo uma entre 0,1m/s a 1,5m/s, pois tudo que é azul é um enchimento bom.

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:15:09.417

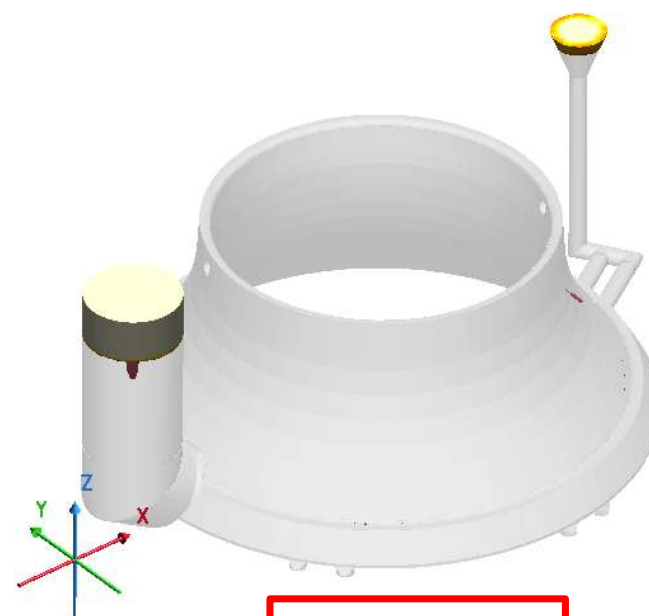
POROSIDADES/RECHUPES

Há uma menor incidência de rechupes de baixa intensidade e ambos tem rechupes de alta intensidade perto do canal de ataque.



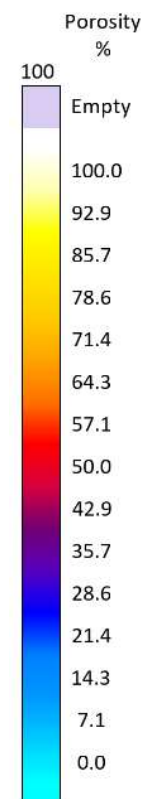
Versão Produzida

v15
Solidification & Cooling, Porosity
2h 31min 59s, 100.00 %
X-Ray: on, range [50.00, 100.00] %



Versão Original

v16
Solidification & Cooling, Porosity
4h 20min 3s, 100.00 %
X-Ray: on, range [50.00, 100.00] %



Slide 25

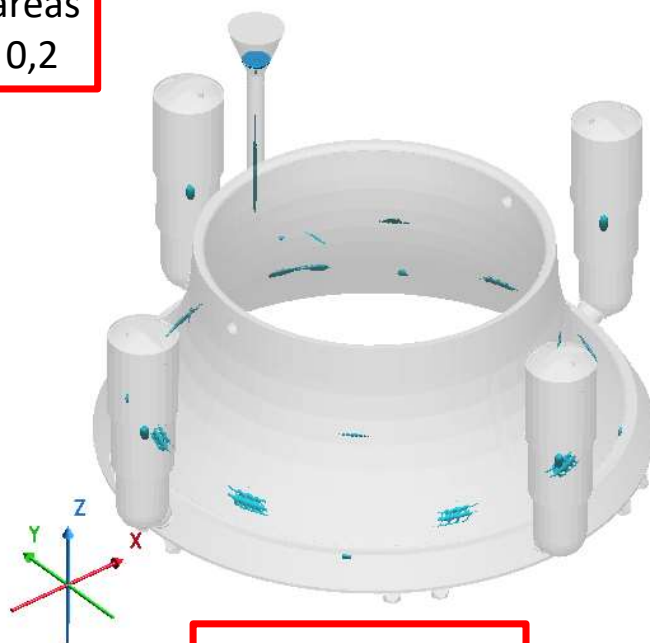
TN1

Aqui também vale fazer um raio-x em maior intensidade para vermos onde temos maiores intensidades

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:16:23.428

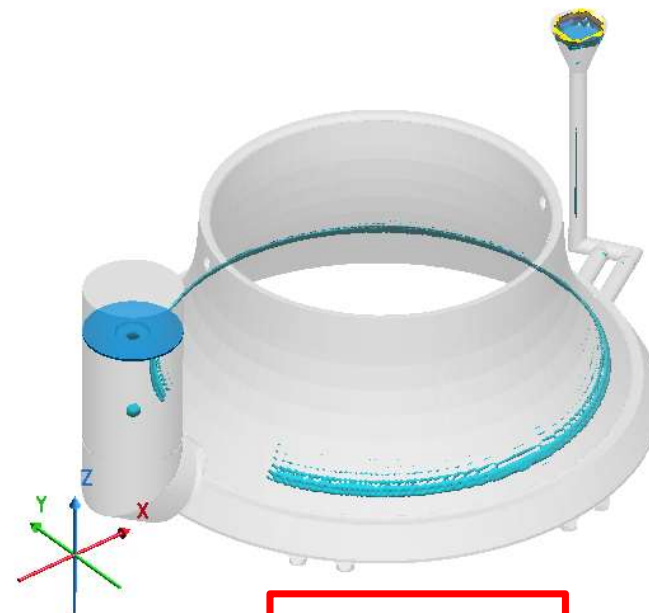
CRITÉRIO DE NIYAMA

Há uma menor incidência de áreas com $Niyama \leq 0,2$



Versão Produzida

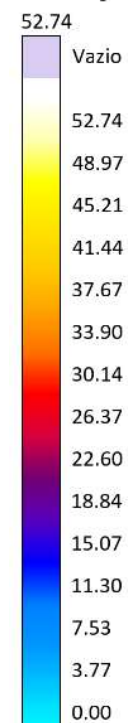
v15
Solidification & Cooling, Niyama Criterion
2h 31min 59s
X-Ray: on, range [0.00, 0.20] -



Versão Original

v16
Solidification & Cooling, Niyama Criterion
4h 20min 3s
X-Ray: on, range [0.00, 0.20] -

Niyama Criterion



TN1

Aqui temos que utilizar um raio-X para indicar onde temos Niyamas reduzidos, pois a imagem não permite ver internamente na peça.

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:15:56.721

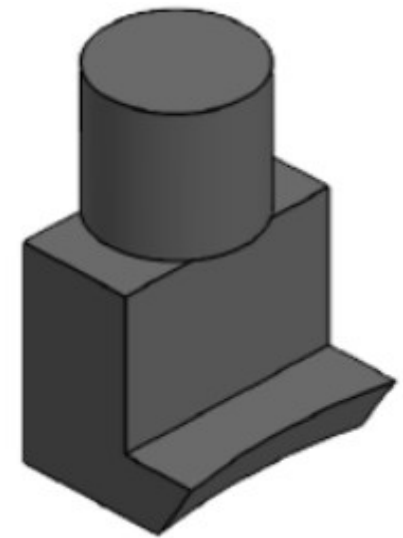
CONSIDERAÇÕES

- A adição dos resfriadores foram necessários para obtenção de peça com a melhor sanidade possível – distância de alimentação.
- Foi dimensionado um corpo de prova apenas para extração de cps para ensaios mecânicos (impacto e desgaste).
- Os resultados mostraram a importância da utilização de resfriadores entre as luvas exotérmicas, mesmo que apresente menores dimensões (150 x 120 mm²).



CORPO DE PROVA APENSO

- Corpo de prova apenso com velocidade de solidificação semelhante à da peça para caracterização microestrutural e ensaios mecânicos.
- Dimensões do corpo de prova apenso:
 - Espessura: 100 mm
 - Altura: 150 mm
 - Comprimento: 200 mm
 - Massa: 23,4 Kg.
 - Luva exotérmica com módulo de 4,13 cm, volume de 2850 cm².



MOLDAGEM

- Etapas da moldagem do revestimento para britador cônico



PEÇA FUNDIDA PARA TRATAMENTO TÉRMICO

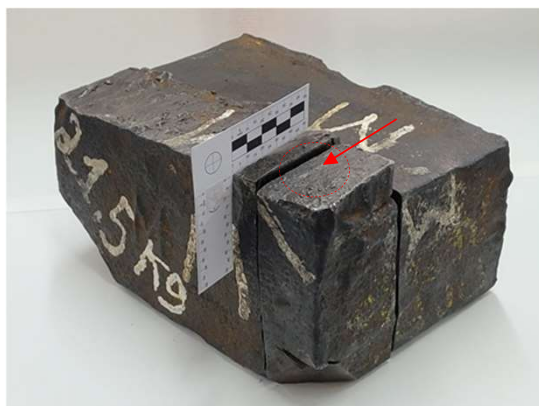


Registro do momento de imersão das peças no tanque de água , durante o tratamento térmico de solubilização.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA – ANÁLISE IPT

Liga metálica	AQ	%C	%Mn	%Si	%Mo	%Cr	%S	%P	%Nb	%Ti
Aço Hadfield com Nb	IPT	1,48	12,9	0,69	0,98	0,20	0,005	0,032	1,25	0,07

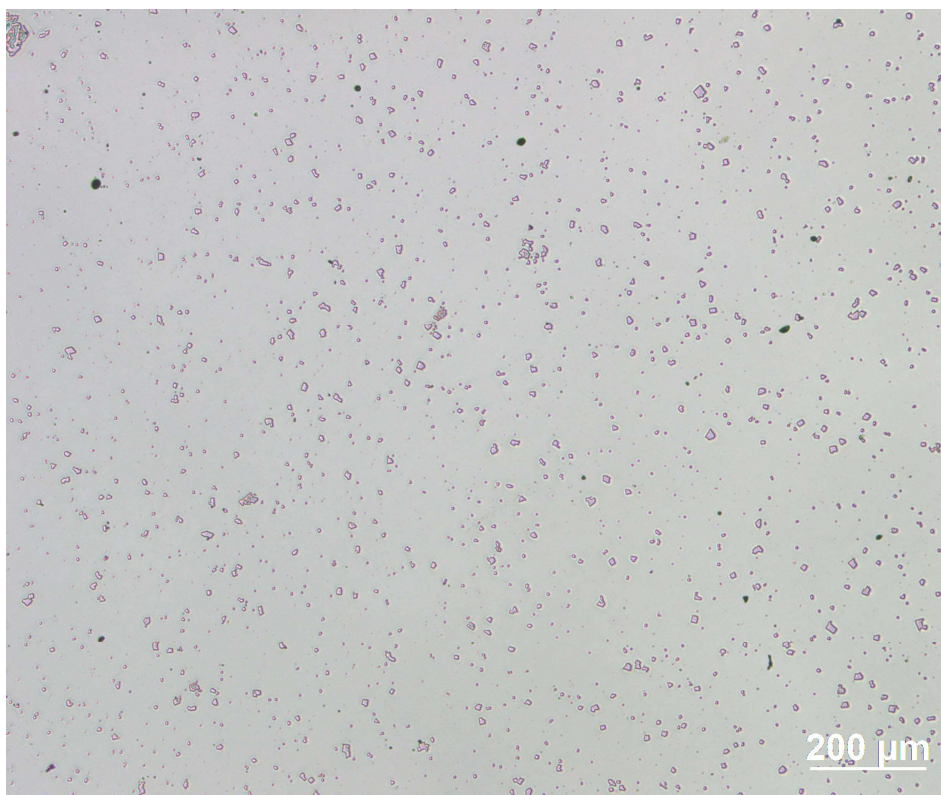
Revestimento



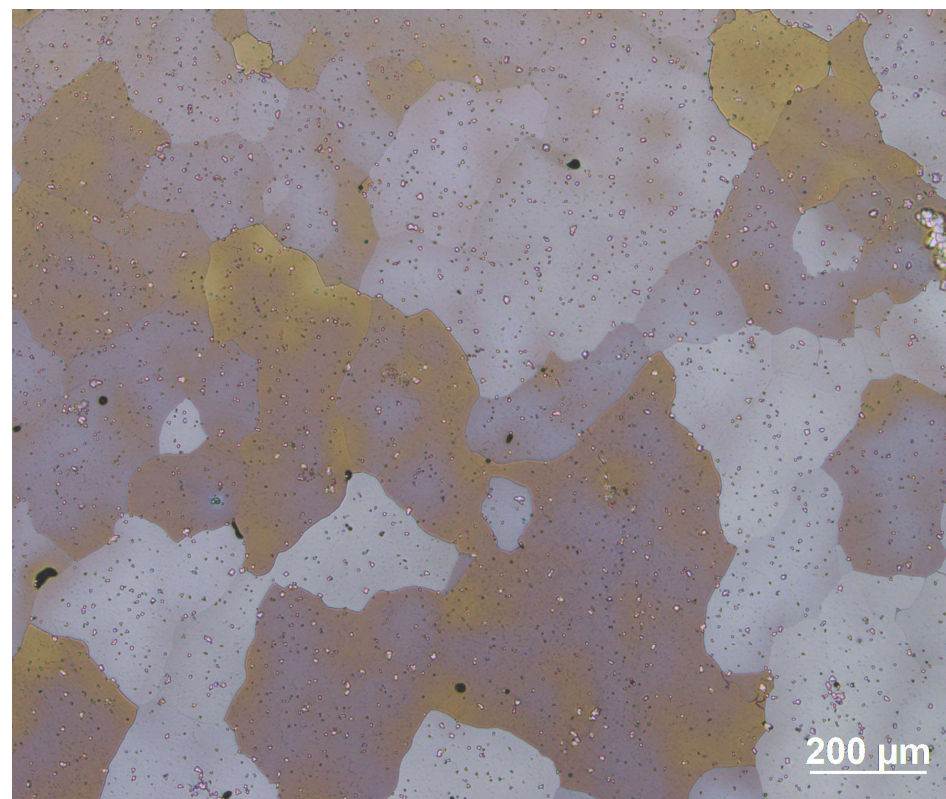
As análises de microestrutura e ensaios mecânicos foram realizadas no corpo de prova apenso (dobramento, impacto Charpy e roda de borracha).



CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL- REVESTIMENTO



Revestimento, sem ataque. Aumento original de 50x.



Revestimento, ataque: Nital 2%. Aumento original de 50x. TG: $200 \pm 40 \mu\text{m}$, ASTM E112.



Slide 32

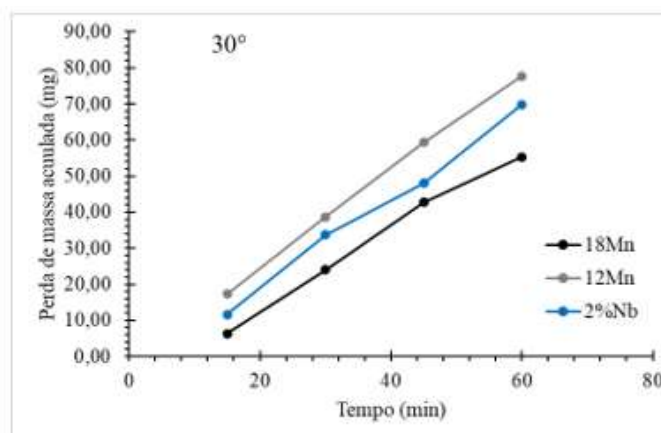
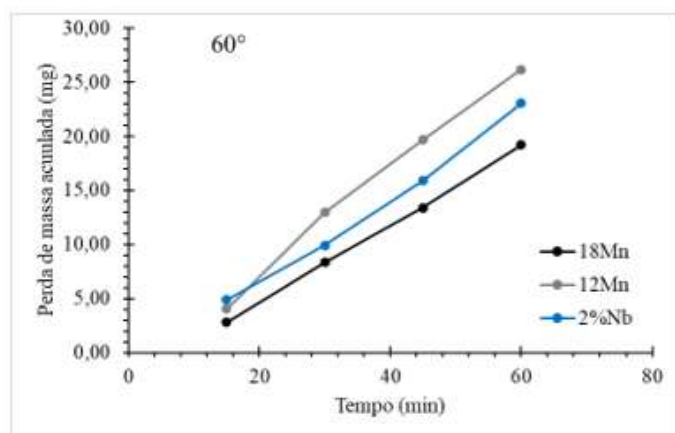
TN1

Já falei isso, mas que micros lindas! 💖

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:20:20.466

RESULTADOS: ENSAIO LABORATORIAL

- Abrasão/ Impacto



- Roda de borracha/ Abrasão

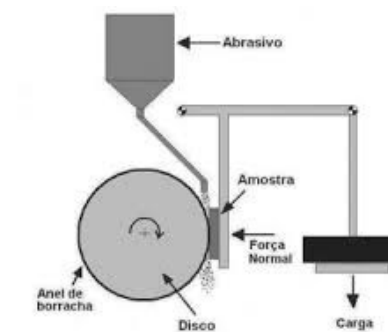
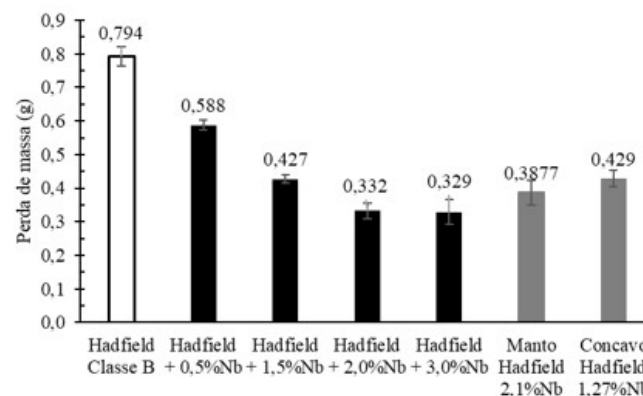


Figura 2. Esquema do abrasômetro Roda de Borracha.

TN1 Não ficou claro para mim:

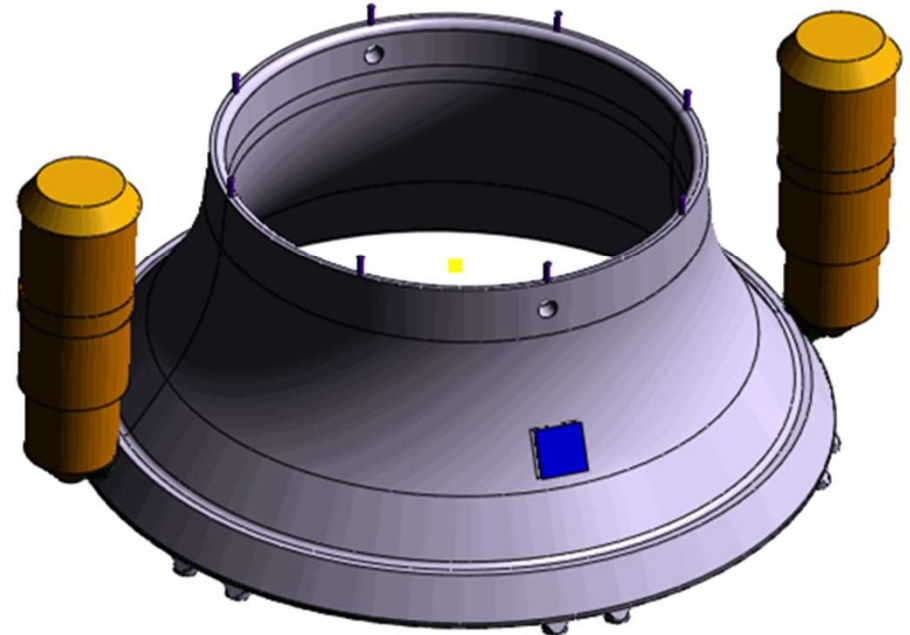
em 90 graus performou pior, certo?

Nos outros o que foi mostrado e que a performance é maior que o 12% e quase performa como o 18%, certo?

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:29:51.894

OTIMIZAÇÃO – SIMULAÇÕES MAGMASOFT®

- O sistema com 4 luvas performou conforme o esperado, porém apresenta um rendimento baixo;
- Será possível aumentar o rendimento e manter a sanidade similar ao sistema com 4 luvas?
- Para isso fizemos uma otimização com:
 - Nº de luvas – 2 a 4 luvas/resfriadores;
 - Tamanho e posição de Resfriadores.
 - Largura (100 a 200mm) e Espessura (30 a 60mm);
 - Posição: 0 a 100mm (0 mais alto).

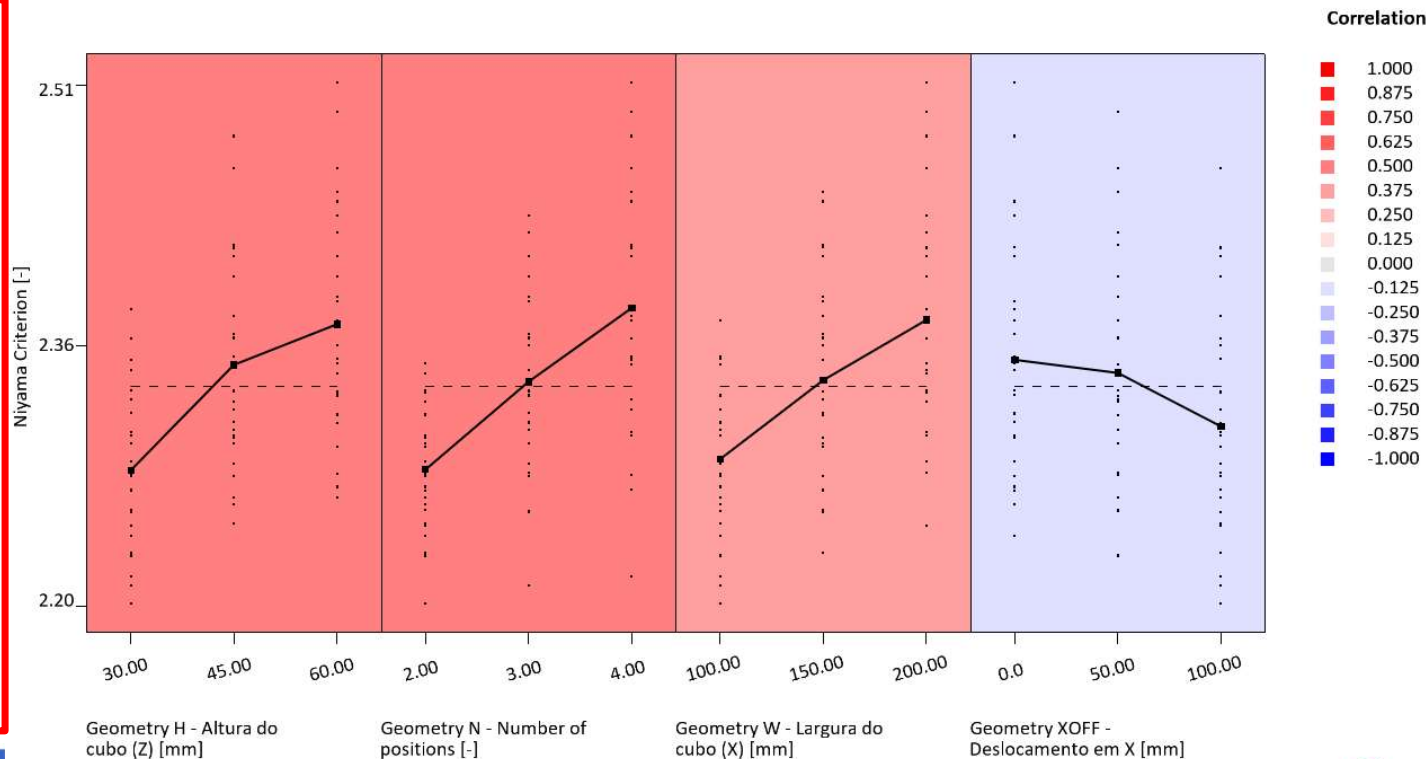


OTIMIZAÇÃO – SIMULAÇÕES MAGMASOFT®

Rechupe Volume Ponderado	Minimize	▼	{Solidification & Cooling/Porosity/End of Solidification & Cooling/Weighted Volume/Casting All IDs}
Reduzir Pontos Quentes FSTime	Minimize	▼	{Solidification & Cooling/Hot Spot FSTime/Weighted Volume/Casting All IDs}
Aumentar o rendimento metálico	Maximize	▼	{Volume of Casting All IDs} / {Volume of Cast Alloy Class}
Rechupe Max	Minimize	▼	{Solidification & Cooling/Porosity/End of Solidification & Cooling/Max/Casting ID 1}
Niyama Criterion	Maximize	▼	{Solidification & Cooling/Niyama Criterion/Avq/Casting ID 1}

Quero Niyama médio na peça o maior possível.

- a) Quanto ao tamanho do resfriador: quanto maior melhor;
- b) Quanto a posição: quanto mais para cima melhor.

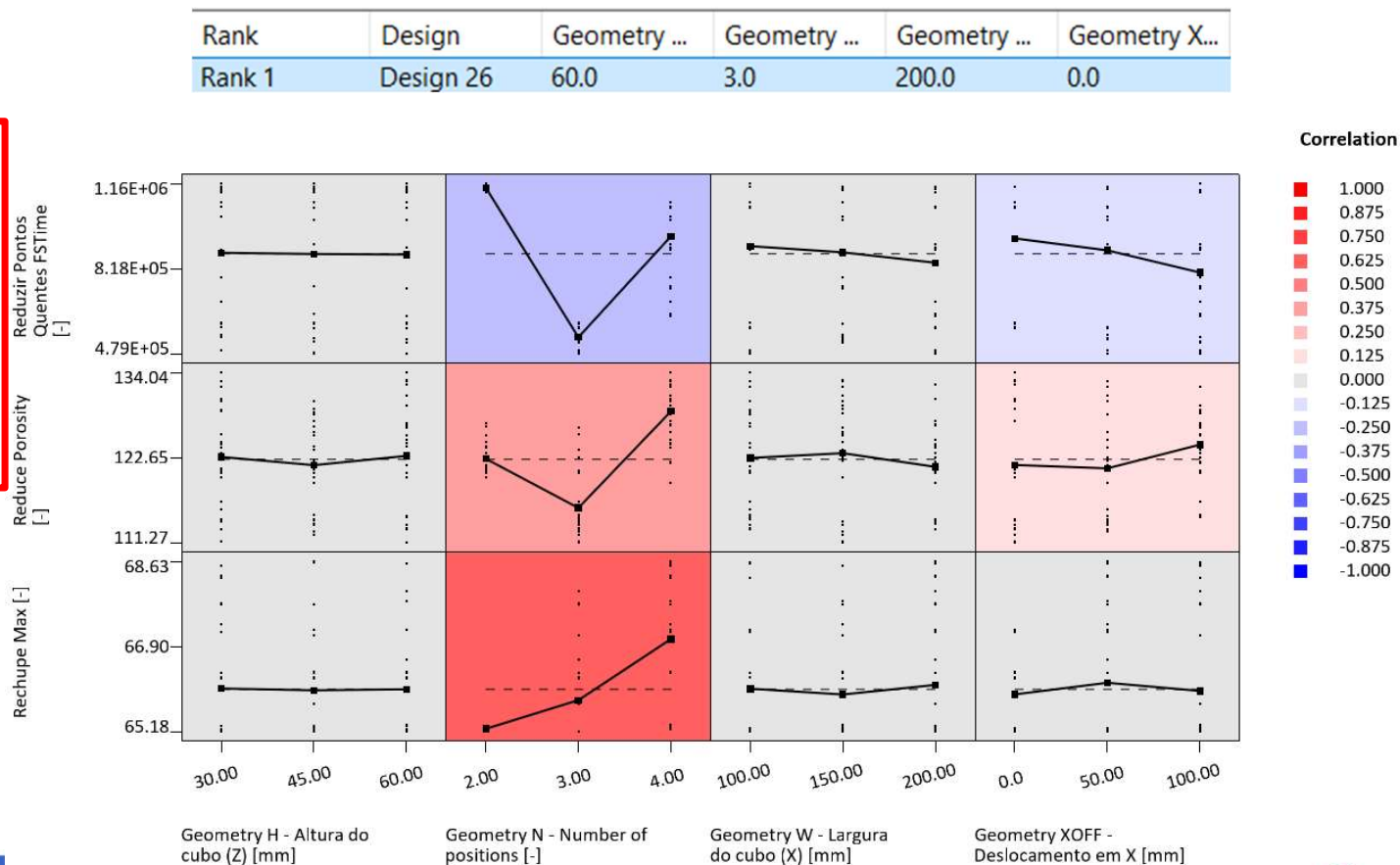


c) Quanto a quantidade de luvas/resfriadores: quanto mais melhor.



SIMULAÇÃO DO ENCHIMENTO – VERSÃO OTIMIZADA

Para os pontos quentes e volume ponderado de rechupe: melhor performance para 3 luvas.

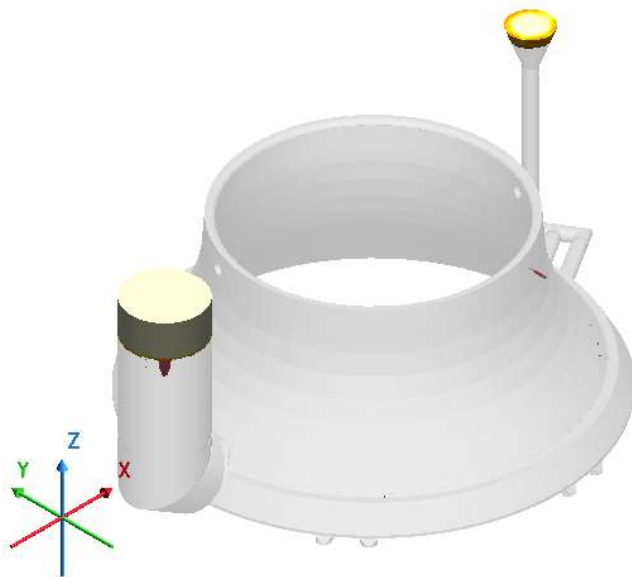


Para a intensidade máxima de rechupe: quanto menos luvas melhor.

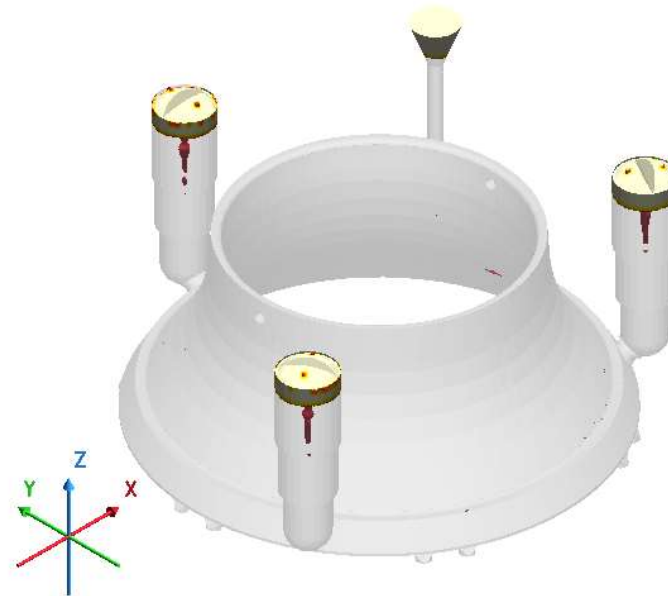
Com 3 luvas teremos também um rendimento melhorado!



SIMULAÇÃO COMPLETA – VERSÃO OTIMIZADA



v16
Solidification & Cooling, Porosity
4h 20min 3s, 100.00 %
Raio-X: ligado, range [50.00, 100.00] %



v10
Solidification & Cooling, Porosity
2h 28min 15s, 100.00 %
Raio-X: ligado, range [50.00, 100.00] %

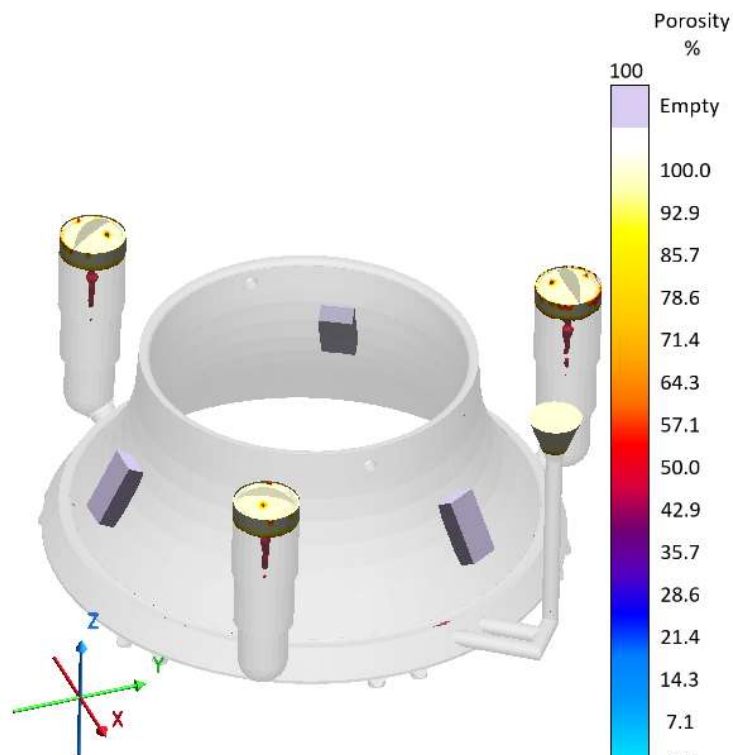
Há menores indicações de rechupes de baixa intensidade, porém o rechupe próximo aos ataques continua intenso. Será que virando o resfriador há melhora?

MAGMA

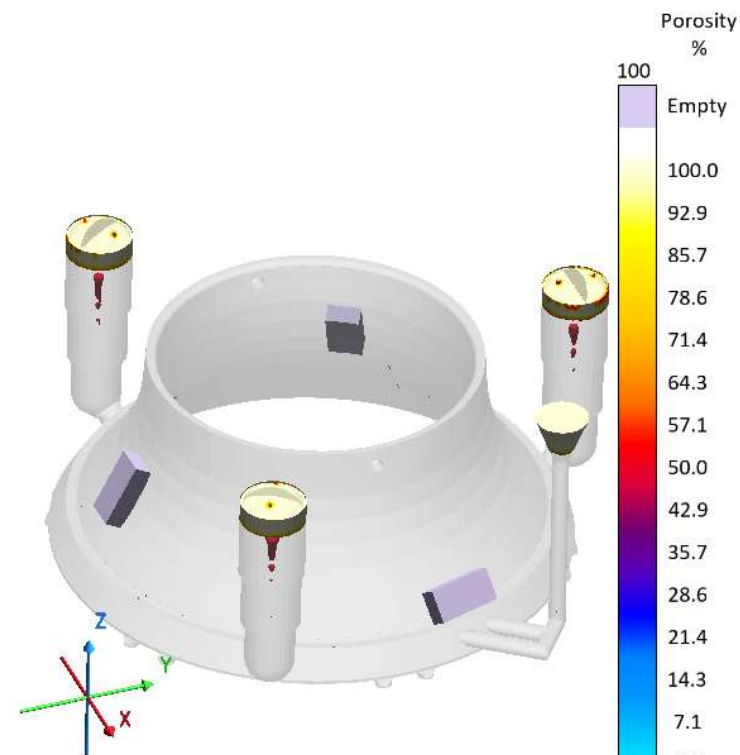
ipt

SÃO PAULO
GOVERNO DO ESTADO

SIMULAÇÃO COMPLETA – VERSÃO OTIMIZADA



v10
Solidification & Cooling, Porosity
2h 28min 15s, 100.00 %
X-Ray: on, range [50.00, 100.00] %



v11
Solidification & Cooling, Porosity
2h 28min 32s, 100.00 %
X-Ray: on, range [50.00, 100.00] %

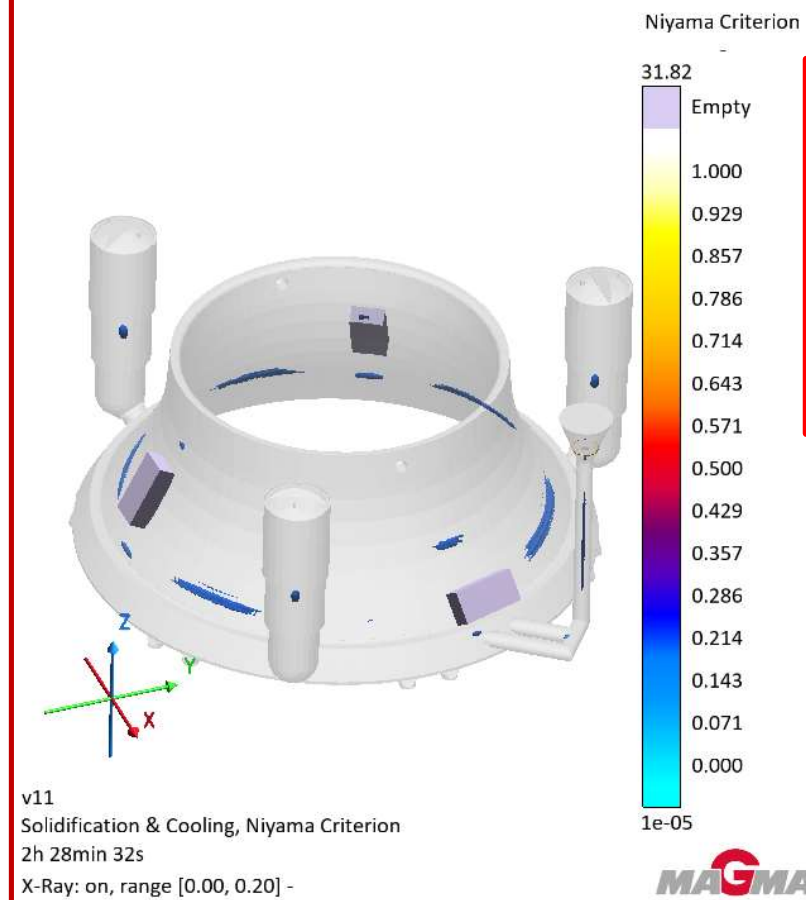
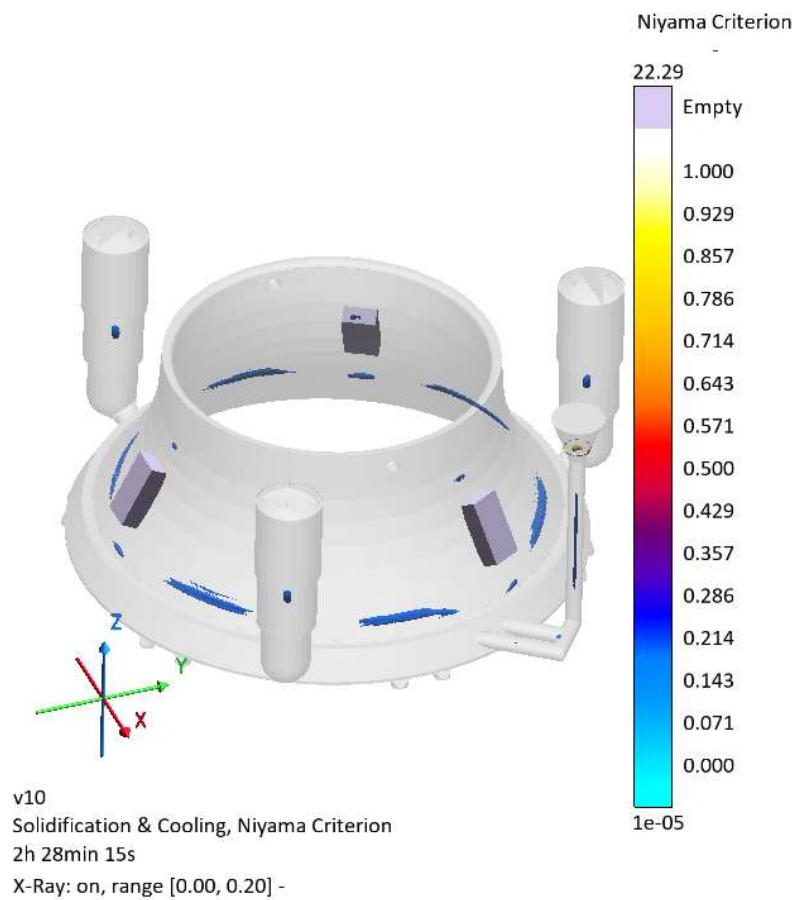
As indicações de
rechupes de
maior
intensidade
foram reduzidas
com sucesso ao
virar o
resfriador!

MAGMA

ipt

SÃO
PAULO
GOVERNO DO ESTADO

NIYAMA



Há faixas estreitas em ambos casos com $Niyama < 0,2$. As indicações são pouco maiores que com 4 luvas.



MAGMA

ipt

SÃO PAULO
GOVERNO DO ESTADO

CONCLUSÕES

- O MAGMASOFT® foi importante para a obtenção de peças com defeitos reduzidos e avaliação do sistema de alimentação original.
- Tratamento térmico de solubilização foi eficiente para obtenção de microestrutura essencialmente austenítica com os carbonetos de Nb bem distribuídos na matriz.
- Foi realizada a definição de corpo de prova apenso representativo das peças, sendo fundido do mesmo material e submetido ao ciclo de tratamento térmico aplicado nas peças, visando a caracterização do material ao final da produção.



PRÓXIMOS PASSOS

- Produção de aço Hadfield com o sistema de alimentação otimizado através das simulações no MAGMASOFT®, considerando:
 - sanidade das peças;
 - rendimento metálico.
- Acompanhamento do teste em campo e posterior caracterização das peças trabalhadas.
- Desenvolvimento de liga: produção de revestimento e manto de diferentes ligas de aço Hadfield otimizadas (com adição de diferentes teores de Mn, Nb, N, Cr, entre outros) selecionadas com base em resultados laboratoriais.
 - Ensaio de impacto/abrasão





- Laboratório de Processos Metalúrgicos (LPM)
- Materiais Avançados (MA)

biankanani@ipt.br

(11) 970764489

TN1

Aqui eu se fosse você, faria um código QR também. No android é bem facil: se você for nos contatos do seu telefone tem Meu Perfil. Nele você edita suas infos e consegue gerar um codigo QR!

Thiago Nagasima; 2025-05-21T23:22:29.618