

**Nº 178887**

**Desenvolvimento de ligas em parcerias com o IPT.**

**Bianka Nani Venturelli**

*Palestra apresentada no WORKSHOP DE  
DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS  
PARA CAPA DE BRIQUETAGEM DA VALE,  
1., 2024, Vitória. 29 slides.*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.

**PROIBIDO REPRODUÇÃO**



# DESENVOLVIMENTO DE LIGAS EM PARCERIA COM O IPT

1º Workshop de desenvolvimento de materiais para capa de  
briquetagem da Vale.



# SUMÁRIO

- Contexto.
- Escopo do projeto capa para briquetagem: atividades, ensaios, cronograma.
- Seleção dos materiais: descrição e vantagens.
- Estudo de caso: projeto pinos para o HPGR.
- Considerações finais.



# CONTEXTO

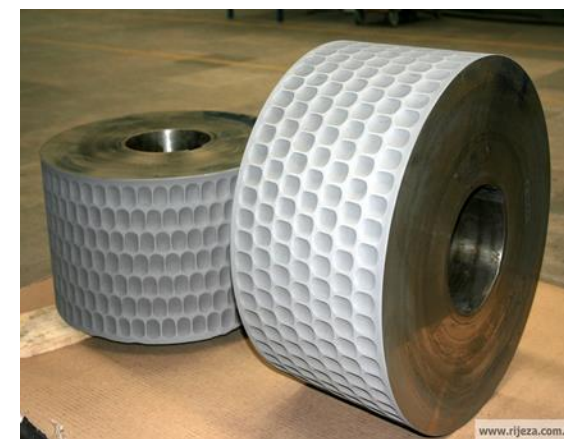
- A produção do “briquete verde” será, inicialmente, realizada nas usinas de briquetagem, na Unidade Tubarão, em Vitória (ES). A capacidade de produção prevista pela Vale é de aproximadamente 6 milhões de toneladas por ano\*.
- As capas fundidas são produzidas em ligas metálicas resistentes ao desgaste incluindo: aço D2 e ferros fundidos brancos convencionais, aços similares ao 52100.
- A vida útil prevista para esses componentes é de apenas 6 meses.

É fundamental o desenvolvimento de ligas alternativas que apresentem maior resistência ao desgaste e como consequência, proporcionem maior vida útil desses componentes.

\*<https://g1.globo.com/es/espírito-santo/noticia/2023/12/04/1a-usina-de-briquete-verde-no-mundo-sera-inaugurada-pela-vale-no-es.ghtml>



Exemplo de Pilha de briquetes. Briquetes serão produzido em plantas no Espírito Santo e em Minas, com capacidade total de 7 milhões de toneladas por ano.



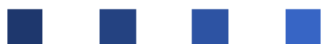
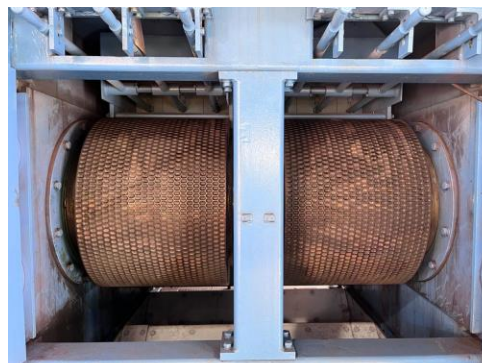
# METODOLOGIA

**Objetivo:** Uso de ligas metálicas com maior desempenho em desgaste para obtenção de peças com maior vida útil.

## Etapas:

1. Identificação de empresa parceira.  
Definição do processo de fabricação (fundição/usinagem).
2. Produção preliminar de peças: rolos para ensaio em campo (totalmente fundido x fundido e usinado).
3. Teste em laboratório-a definir  
Teste em campo

Seleção de ligas metálicas potenciais

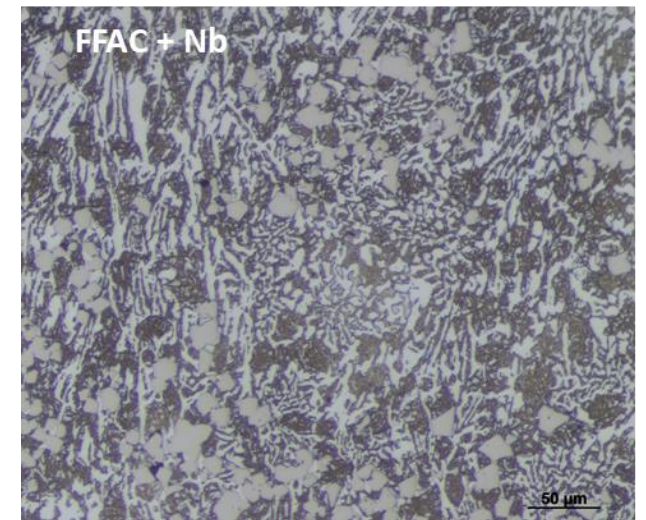
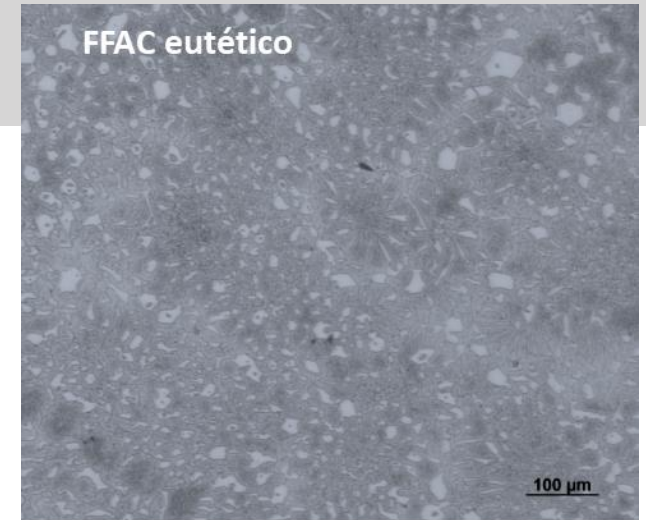




# SELEÇÃO DE LIGAS: FFAC

## Ligas metálicas potenciais:

- Ferro fundido de alto cromo – 19%Cr eutética
- Ferro fundido de alto cromo – eutético com adição de Nb
- Ferro fundido de alto cromo (maior de 20%) com adição de nitrogênio
- Ferro fundido de alto cromo com adição combinada de Nb e Mo – tese do Jimmy.
- Ferro fundido hipereutético – 30%Cr (Fundição) com refino
- Definição dos padrões/design dos rolos para briquetagem
- Projeto de 24 meses
- Nível de maturidade tecnológica: 3 - 5 Embrapii



# CRONOGRAMA – PROJ PROTÓTIPOS

| Atividades                   | Jul/2024   | Dez/2024  | Jul/2025          | Dez/2025   |
|------------------------------|--|---|-------------------|--|
| <b>Capa para briquetagem</b> | Definição de empresa parceira-produção de protótipos e cps | Ensaaios laboratoriais                          | Ensaaios em campo | Sistematização de resultados/Avaliação de desempenho |
| Responsáveis:                | ITV com apoio do IPT                                       | ITV/IPT ou outras ICTs (LFS,UFGPA entre outros) | ITV/ VALE         | ITV/VALE/IPT   |



# FERROS FUNDIDOS DE ALTO CROMO

- Ligas do sistema Fe-Cr-C, com %Cr  $\geq$  10 e %C  $\geq$  1,8%.
- Composições químicas descritas na norma ASTM - A532.

| DUREZAS Brinell |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|
| Bruto de fusão  | Recozido  | Temperado |
| 450 a 550       | 350 a 450 | 600 a 800 |

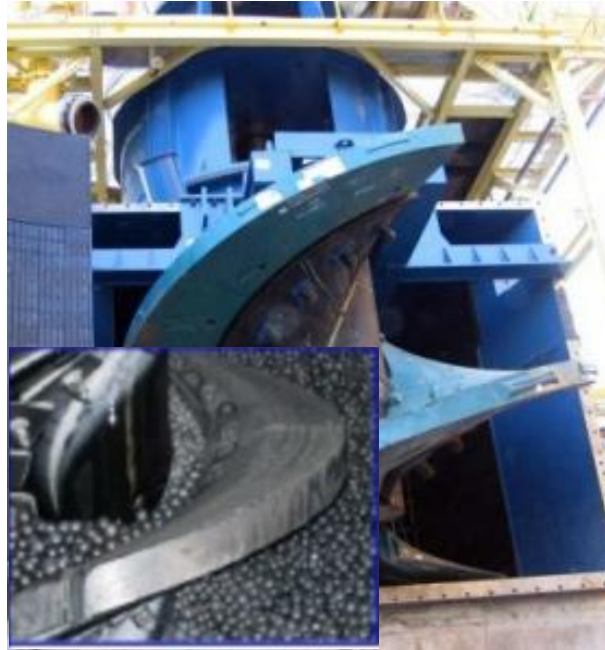


# APLICAÇÕES TRADICIONAIS

Corpos moedores



Revestimento de moinho



Bombeamento de lamas abrasivas



moagem de carvão

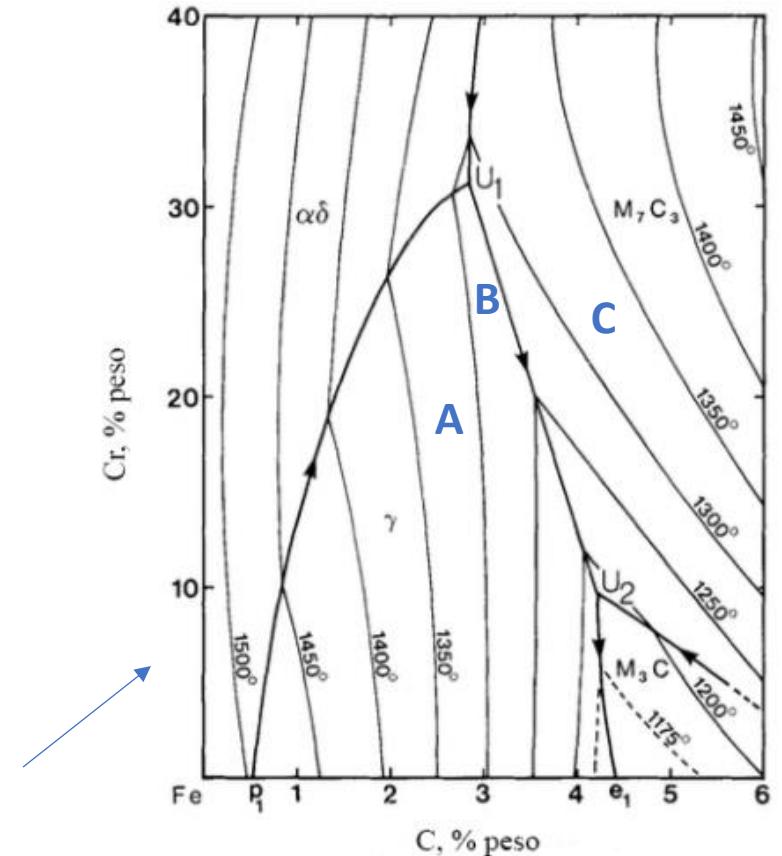


Foco: resistência ao desgaste (material)  
e geometrias (processo)



# FERROS FUNDIDOS BRANCOS DE ALTO CROMO

- São ligas ferrosas baseadas no sistema ternário Fe-Cr-C;
- Possuem em sua composição entre 11-30% em peso de cromo e 1,8-3,6% em peso de carbono.
- Frequentemente recebem adições de molibdênio, cobre, níquel e manganês como elementos de liga em sua elaboração (temperabilidade).
- Ligas hipoeutéticas (A), eutéticas (B) ou hipereutéticas (C).

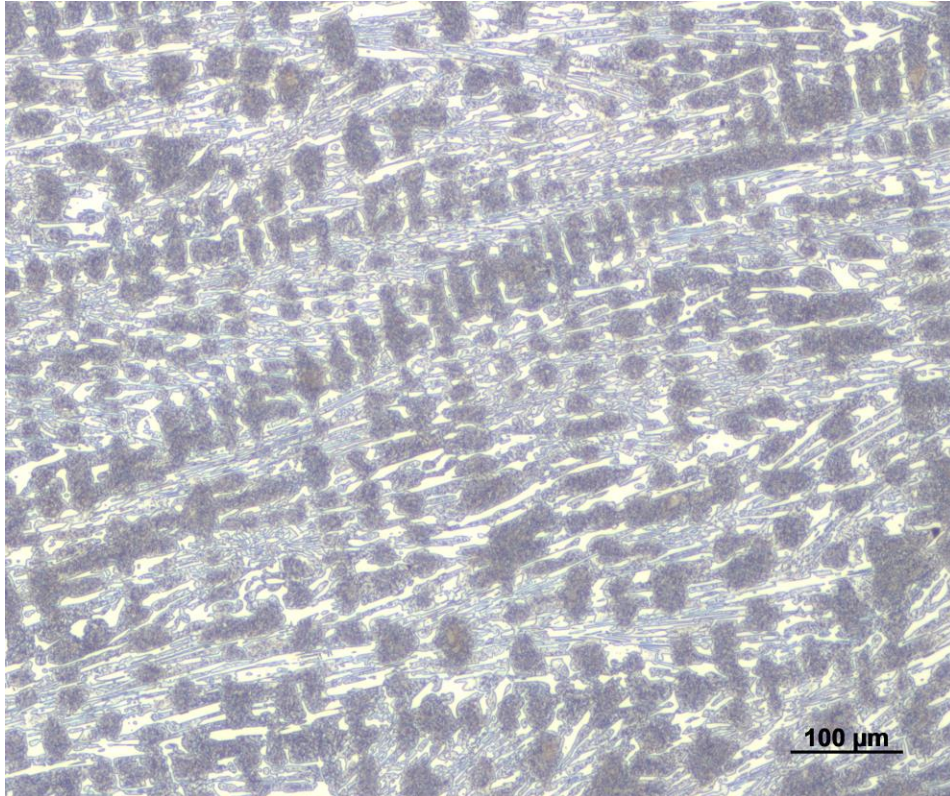


Região rica em ferro do diagrama metaestável C-Cr-Fe (THORPE e CHICCO, 1985).

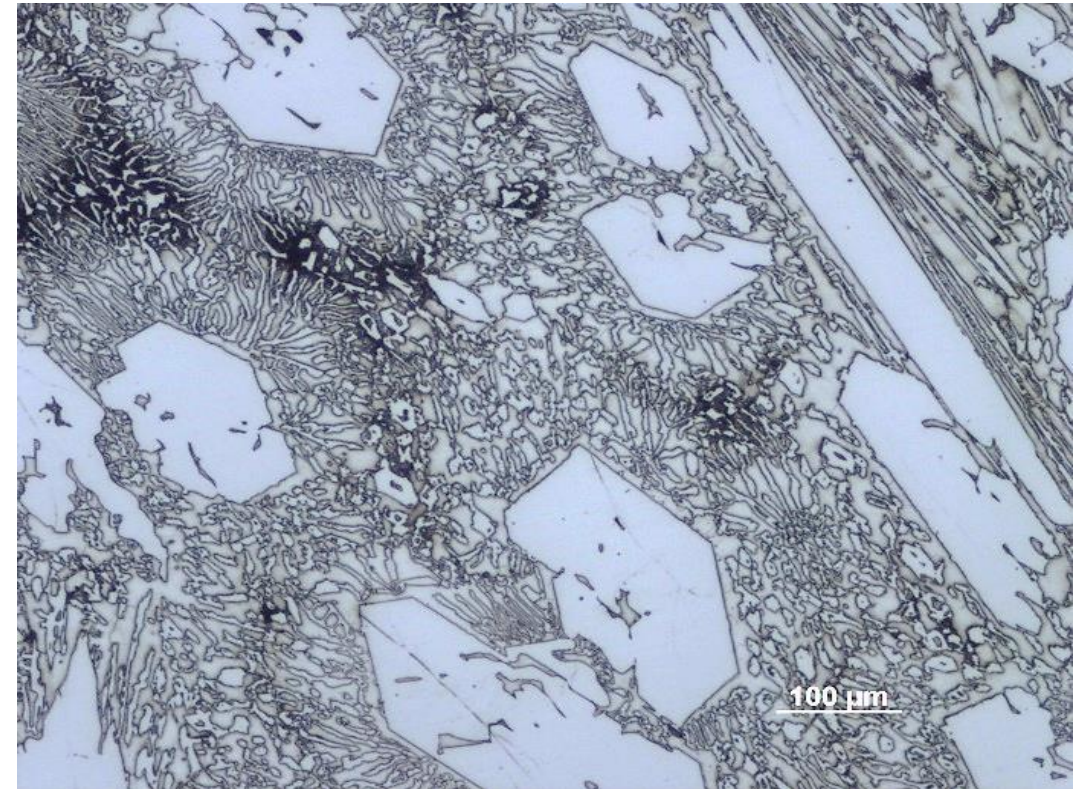




# MICROESTRUTURA TÍPICA



Microestrutura típica hipoeutética consiste em regiões dendríticas e eutéticas (Recozimento 730°C).  
Liga 19Cr, 100x. Ataque: Villela.



Microestrutura típica consiste em carbonetos primários duros ( $M_7C_3$ ) e/ou carbonetos eutéticos em uma matriz austenítica (BF).  
Liga 30D, BF, 100x. Ataque: Villela.



# MICROESTRUTURAS

- Os FFAC são “compósitos” naturais:
  - Matriz : 60 a 90% de “aço”
    - Resistência mecânica
    - Tenacidade
    - “Fabricabilidade”:
      - fundição e usinagem
  - Carbonetos  $M_7C_3$ :  
10 a 40% de “cerâmica”
    - Resistência ao desgaste

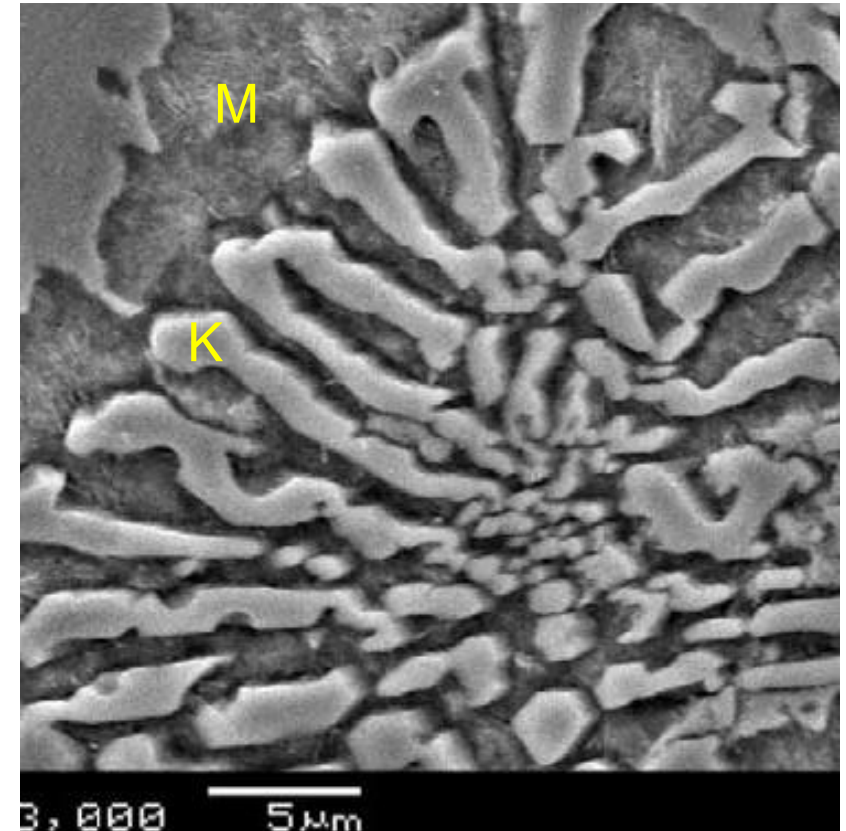
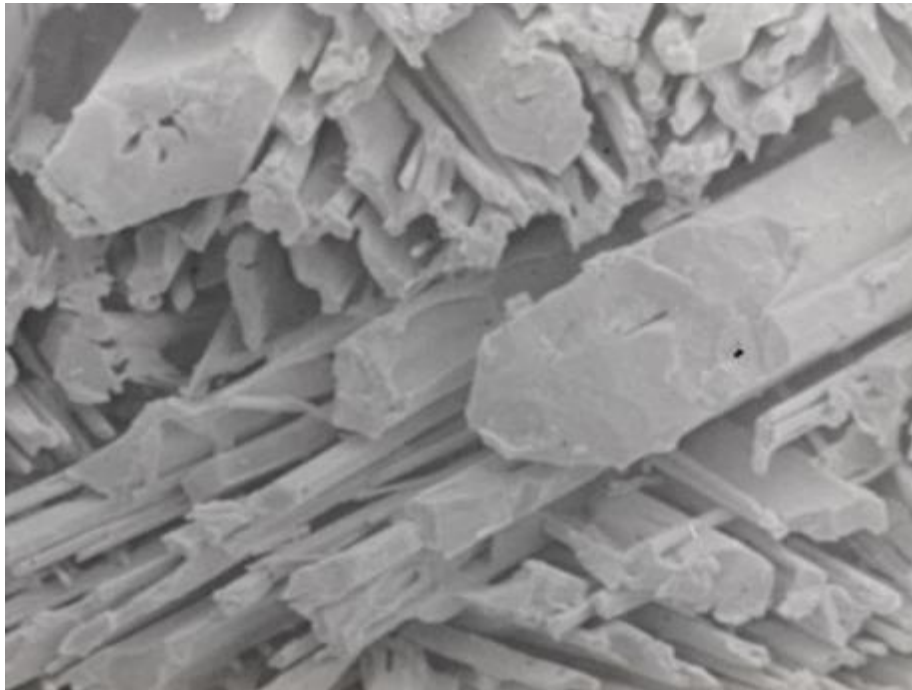


Imagem em microscópio eletrônico indicando as regiões de carboneto (K) e matriz (M). Tese de doutorado Eduardo Albertin.



# CARBONETOS $M_7C_3$

Fe, Cr, Mn, Mo



Microestrutura típica hipereutética consiste em carbonetos primários duros ( $M_7C_3$ ), ataque químico profundo. Tese de doutorado Eduardo Albertin.

- São os constituintes característicos dos FFAC :  
10 a 40% da estrutura:  
(Maratray, 42 ligas):  
% K = 12,33% C + 0,55 %Cr -15,2
- Apresentam durezas superiores a 1500 HV
  - Mais duros que o quartzo
  - Mais duros que o  $Fe_3C$  (cementita dos fofos comuns).
- Mais ramificados: menos fragilizantes que o  $Fe_3C$ .

# MATRIZ METÁLICA

60 a 90% da estrutura

DUREZAS

300



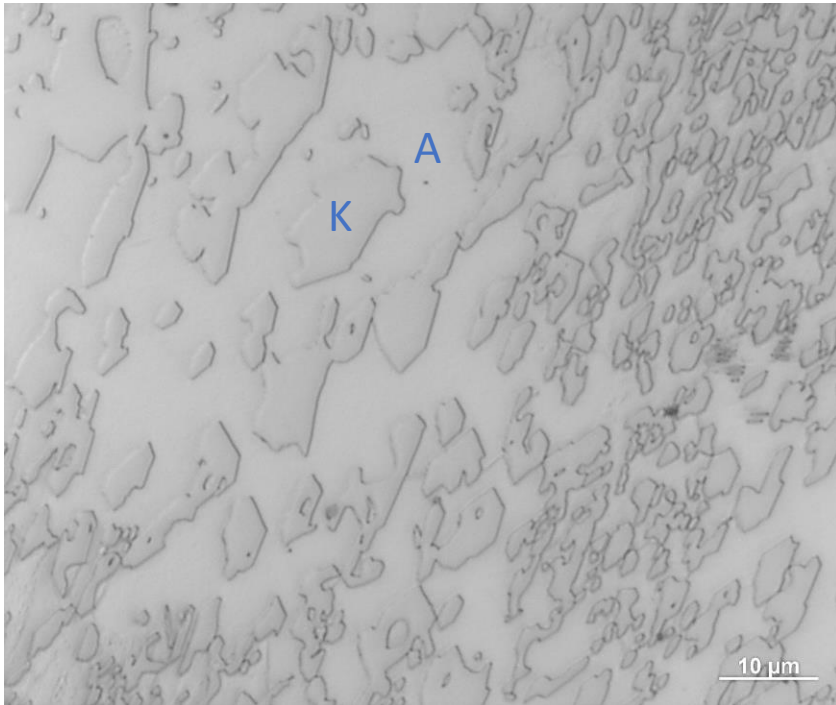
900 HV

| AUSTENITA           | PERLITA            | MARTENSITA       |
|---------------------|--------------------|------------------|
| Bruta de fundição   | Bruta de fundição  | Bruta de têmpera |
| Retida após têmpera | De recozimento     | Revenida         |
|                     | Defeito na têmpera |                  |





# AUSTENITA



Microestrutura do ferro fundido de alto cromo bruta de fundição.

Há algumas condições em que o desempenho do material é adequado na condição bruta de fundição (ou de solidificação), com matriz essencialmente de austenita retida:

- Revestimentos duros (*hardfacing*) aplicados por processo de soldagem.
- Peças em que o desempenho não justifica o custo adicional decorrente do tratamento térmico.

ENTRETANTO, geralmente será aplicado um tratamento térmico visando obter a matriz martensítica.

# MARTENSITA

**Dureza : 600 a 1000 HV**

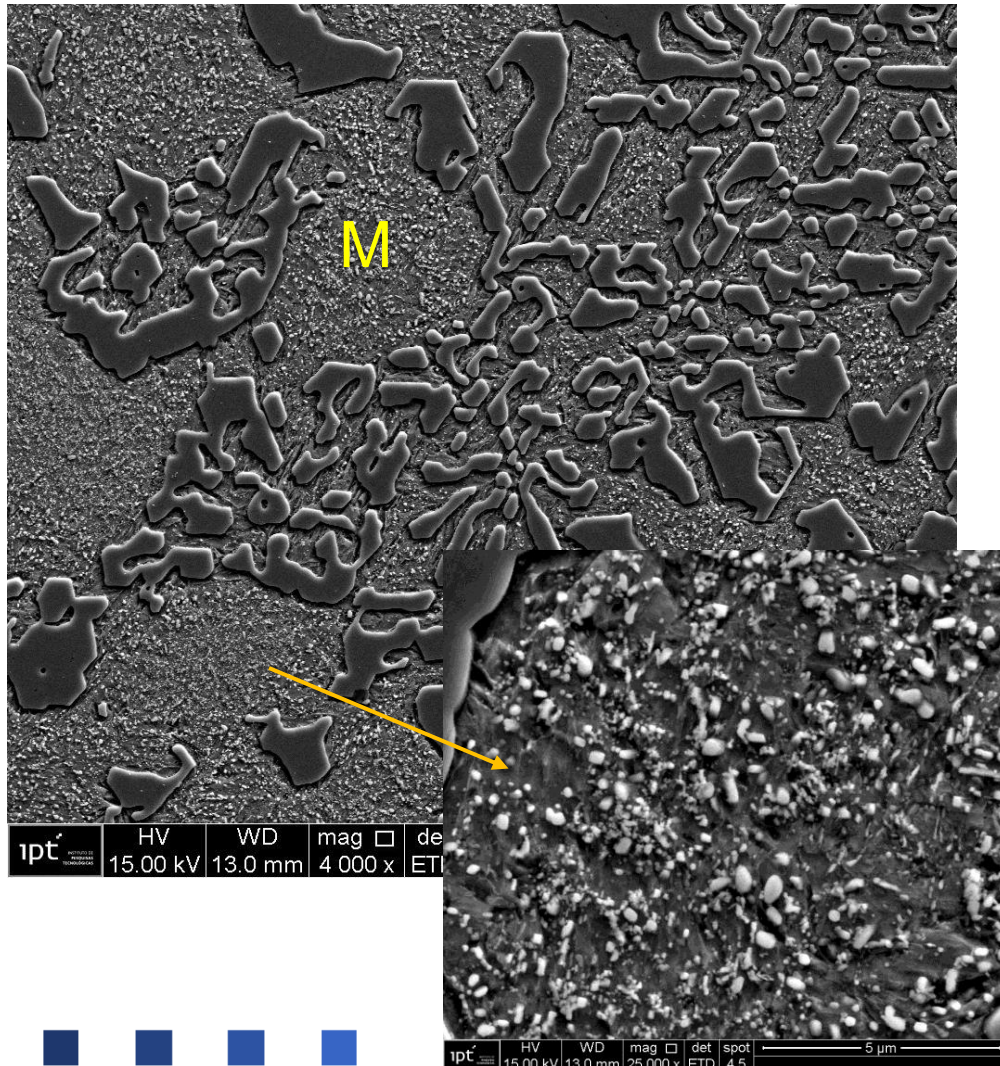
Depende da composição química:

- %C, %N

Tratamento de revenimento.

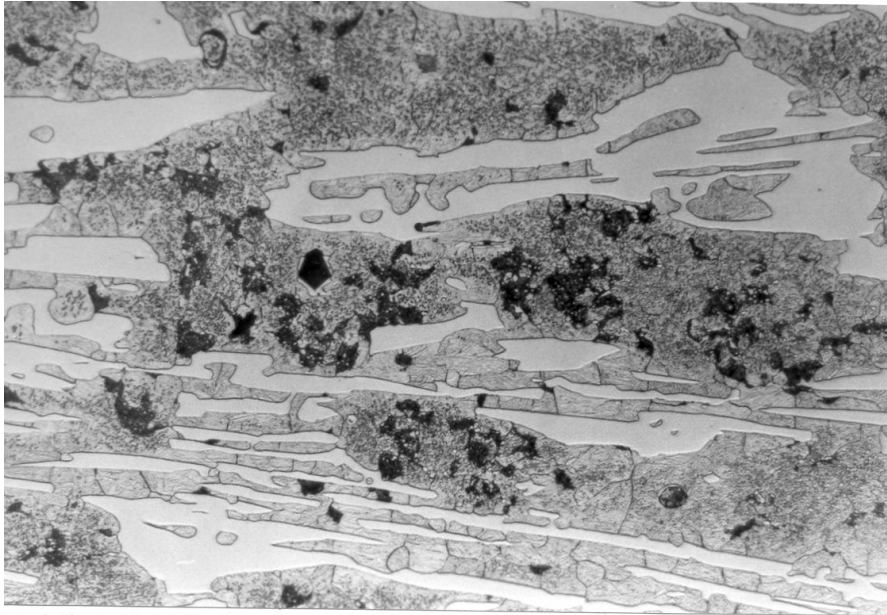
Presença de defeitos

- % alta de austenita retida
- perlita

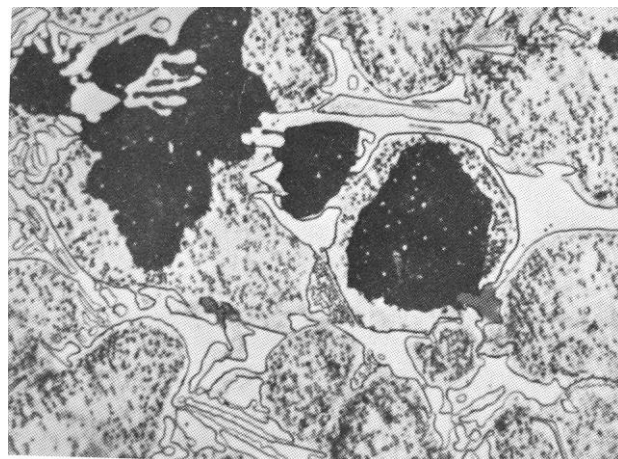




# MARTENSITA (defeitos): perlita



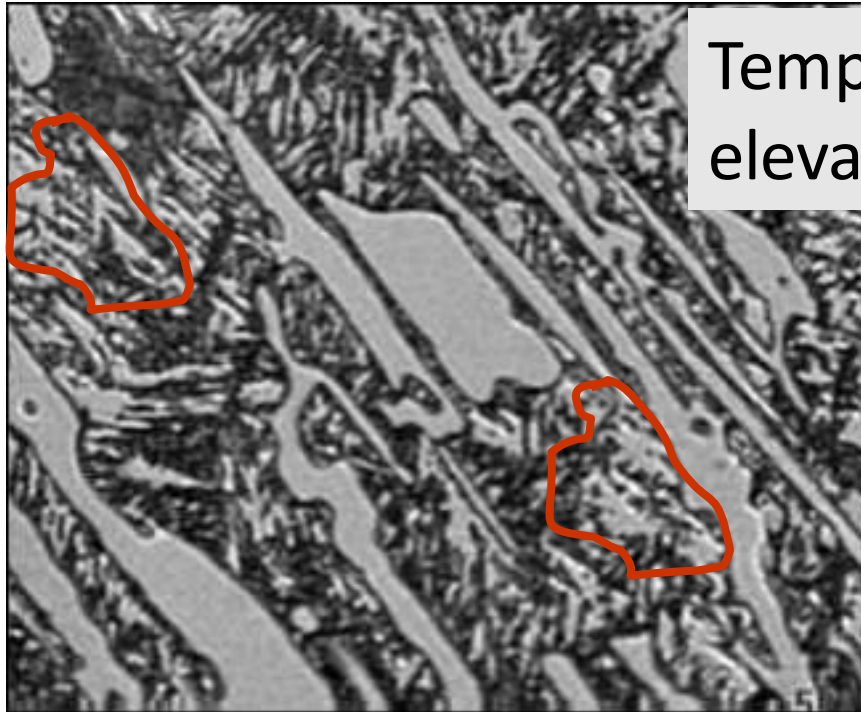
FFAC 21%C-3%C,  
temperado ao ar,  
apresentando ~10% P



Detalhe com maior  
aumento

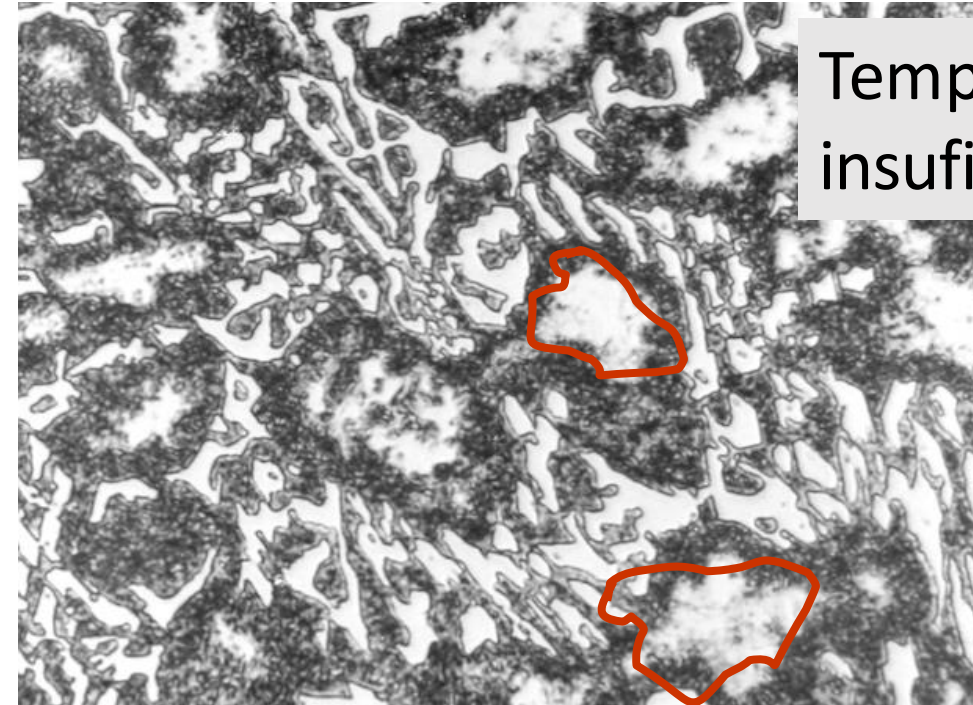
- Perlita na microestrutura da peça temperada indica falta de adequação entre CQ, espessura da peça e meio de têmpera.

# MARTENSITA (DEFEITOS): AUSTENITA RETIDA



Temperatura elevada

- Temperado a partir de 1100°C
- Dureza do FFAC = 47 HRC
- Diminuindo a T de têmpera, obteve-se HRC = 58



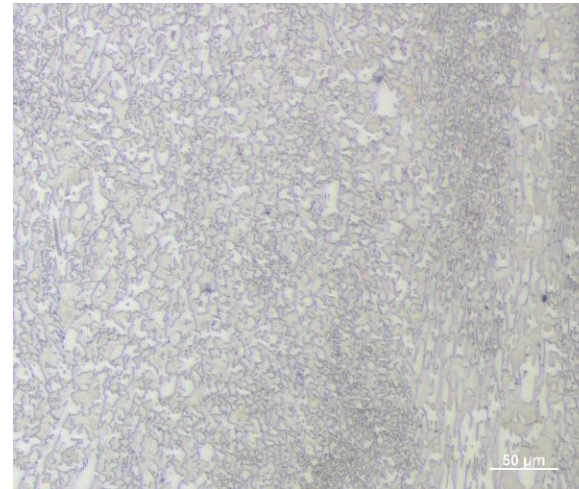
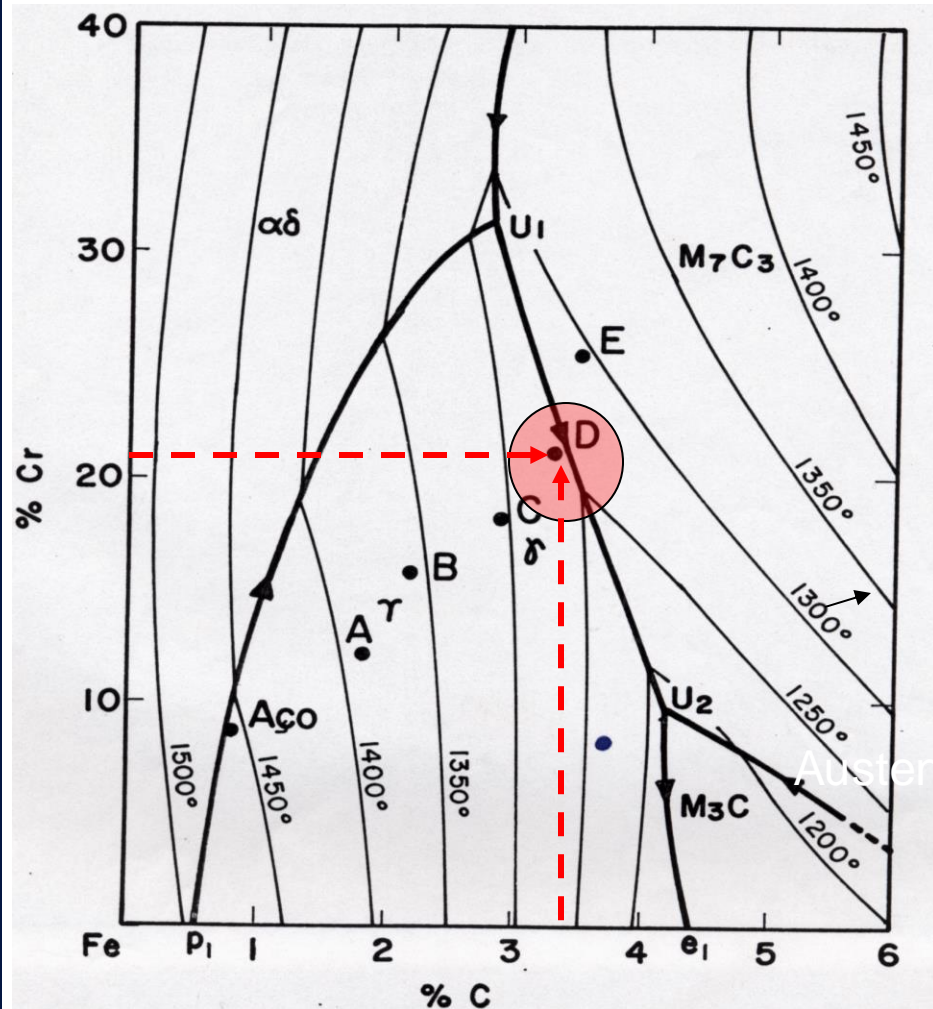
Tempo insuficiente

O tempo de tratamento não foi suficiente para desestabilizar completamente a austenita presente no material bruto de fundição.

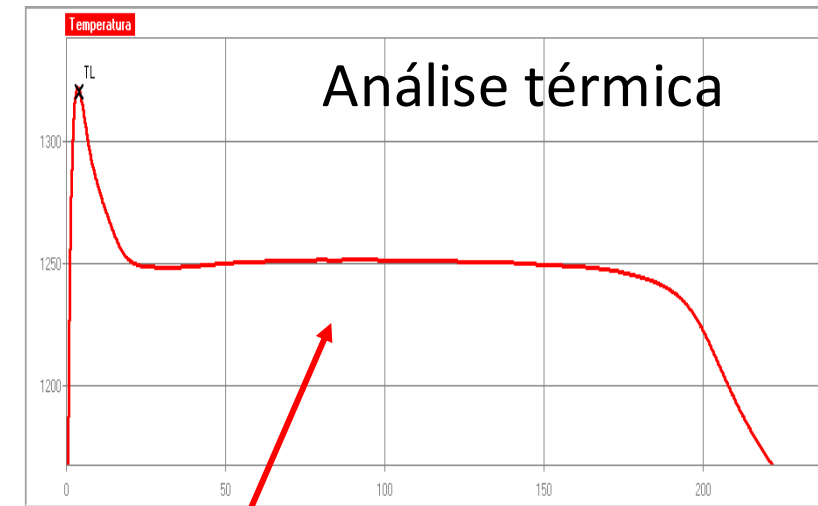




# SUPERFÍCIE LIQUIDUS Fe-Cr-C e Análise térmica - liga eutética



FFAC eutético, 19%Cr, ataque: Vilela, 200x.



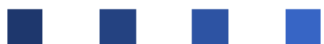
A liga D é eutética.

O líquido solidifica-se pela reação:  $L \rightarrow \gamma + M_7C_3$



# MICROESTRUTURA DAS LIGAS

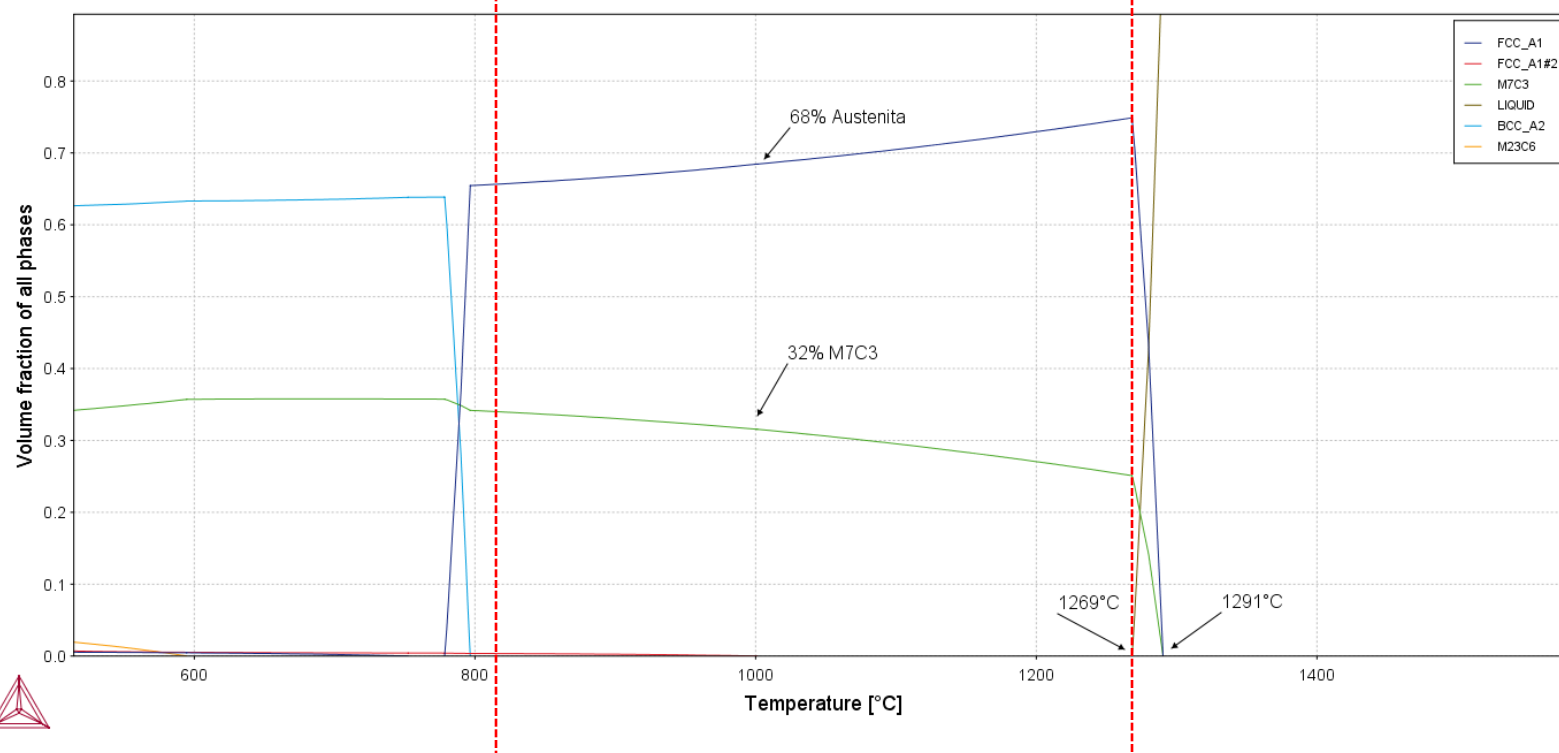
- Atualmente, além dos diagramas como os mostrados, a microestrutura das ligas formadas tanto na solidificação como no resfriamento subsequente podem ser previstas através de softwares de termodinâmica computacional, como o **Thermo-Calc**.
- Exemplos serão apresentados em seguida.





# DIAGRAMA DE FASES - THERMOCALC

2022.01.26.09.58.58  
TCFE8 : Fe, Cr, C, Mo, Cu, Mn, Si, N  
Pressure [Pa] = 100000.0, System size [mol] = 1.0, Mass percent Cr = 19.0, Mass percent C = 3.0, Mass percent Mo = 1.0, Mass percent Cu = 0.7, Mass percent Mn = 0.5, Mass percent Si = 0.7, Mass percent N = 0.04



Sequência de formação de fases da liga 19%Cr eutética:

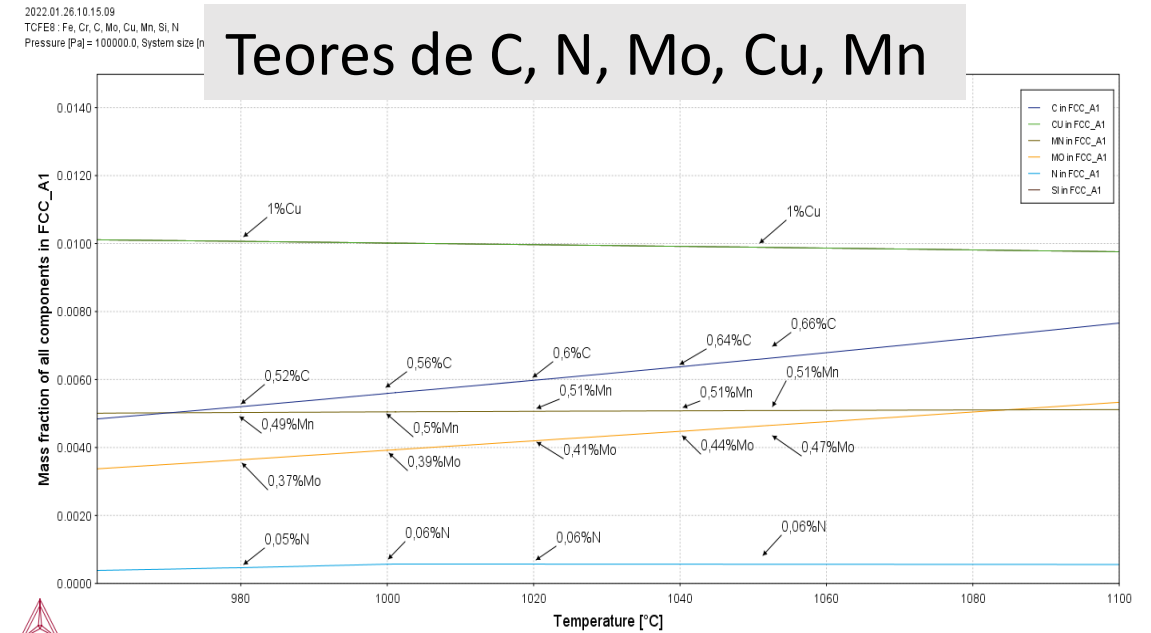
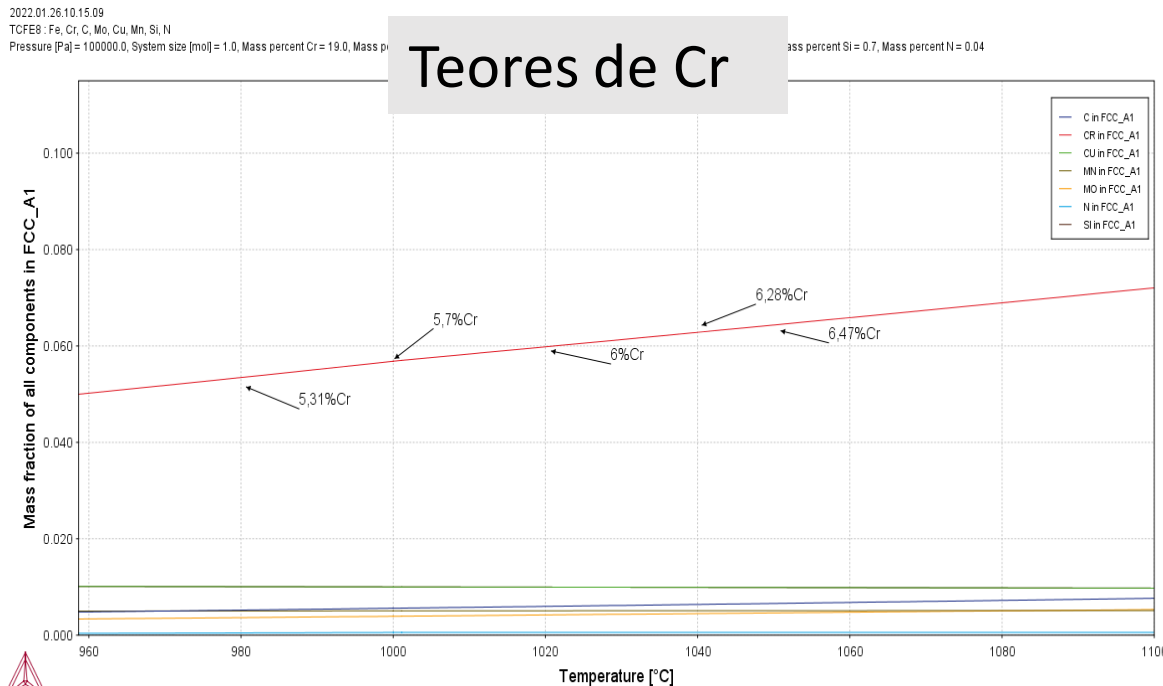
- Solidificação entre 1291 e 1269°C.

Microestrutura:

- ~30% de carbonetos (25% na solidificação).
- Acima de 800°C o material é constituído por: austenita + carbonetos ( $M_7C_3$ )

# TEMPERATURA DO TRATAMENTO TÉRMICO

Composição química da austenita da liga 19%Cr eutética em função da temperatura (base para definir tratamento térmico)



# ESTUDO DE CASO: PROJETO “PINOS HPGR”

- Competir com WC- Co (“metal duro”) – Sinterizados
- Desgaste mm/dia – US\$0,20/ ton moída
- Sem restrição preliminar de resistência ao impacto
- Fundibilidade (limite às temperaturas de elaboração e fundição)
- Propriedades mecânicas: Resistência ao desgaste e corrosão, elevada Dureza.
- Microestrutura: Elevada fração de carbonetos
- Qualidade superficial e controle dimensional (Processo Fundição de precisão + usinagem)



Superfície da prensa HPGR.  
Posicionamento dos pinos de WC-Co.



# METODOLOGIA

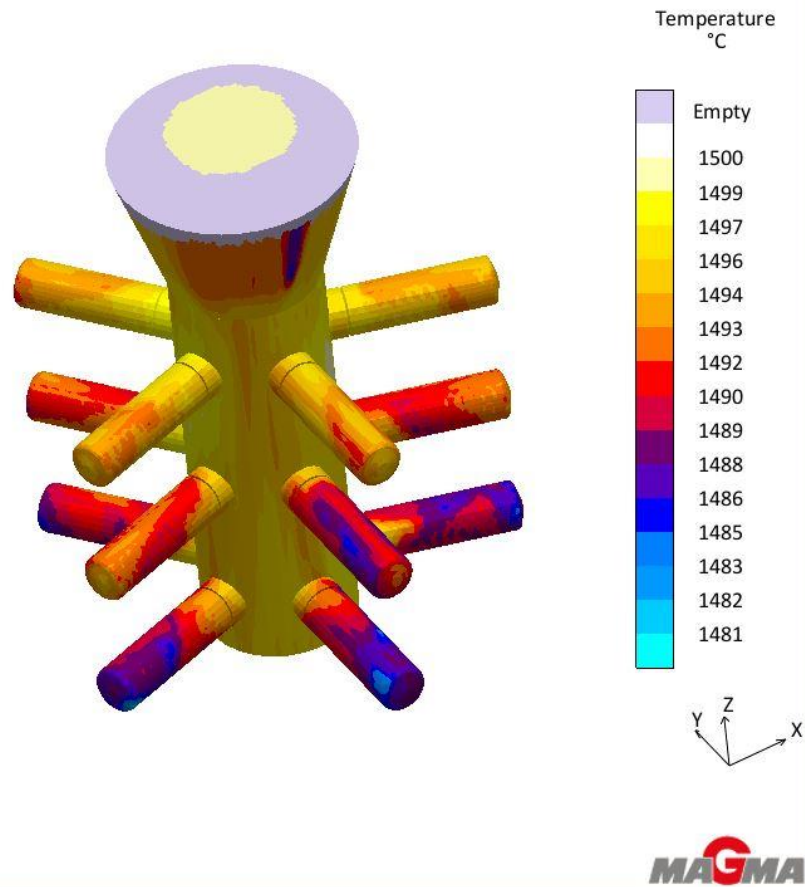
- Cps para ensaios laboratoriais → Protótipos
- Seleção de materiais com base em projetos anteriores e literatura.
- Desenvolvimento do sistema de fundição: Magmasoft.
- Ensaios realizados: Ensaio de desgaste abrasivo (roda de borracha), Ensaio de flexão e medições de dureza.



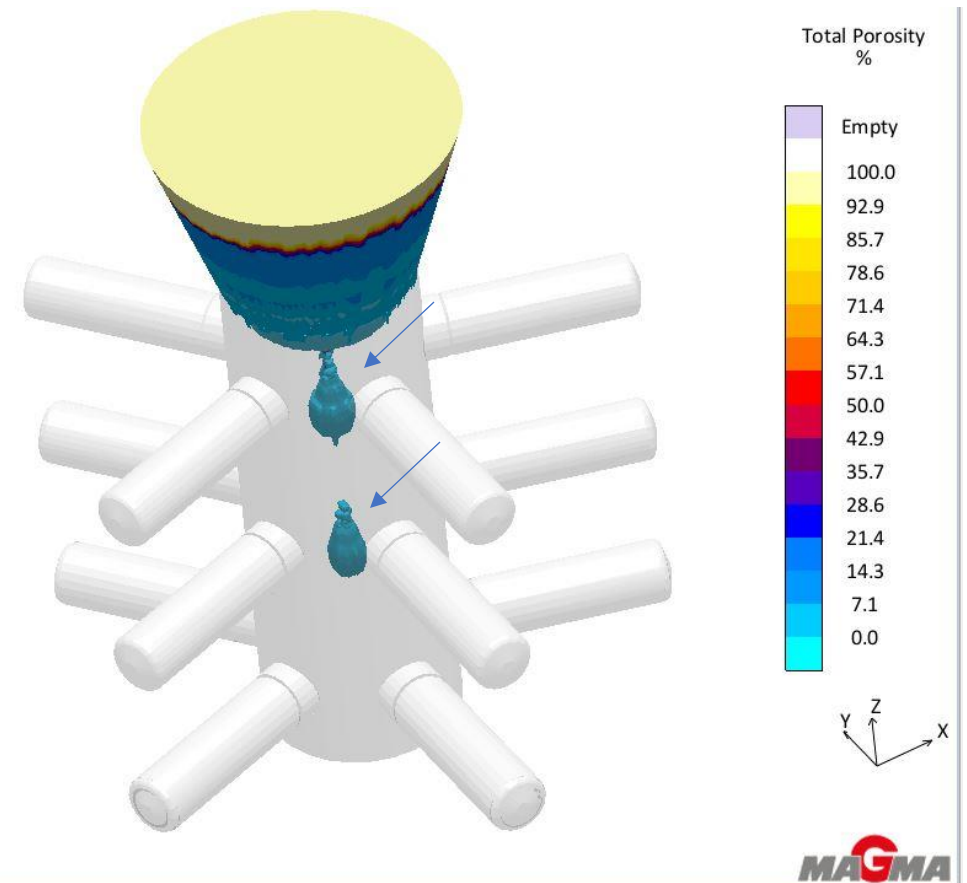
Pinos fundidos e seccionados para ensaios de flexão



# DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS



Temperatura no final do preenchimento,  
acima de 1500°C.

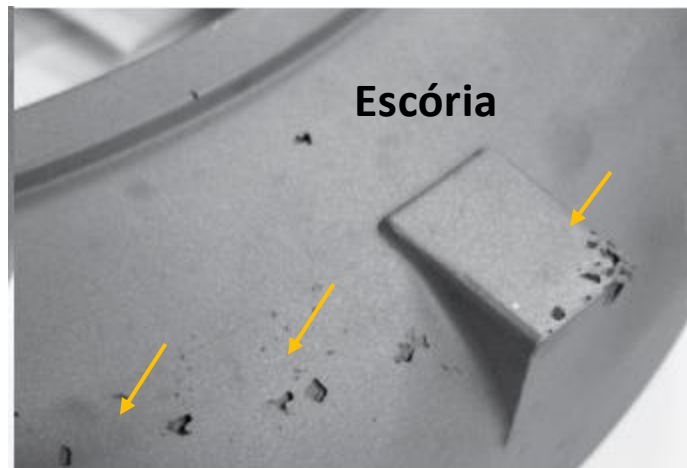
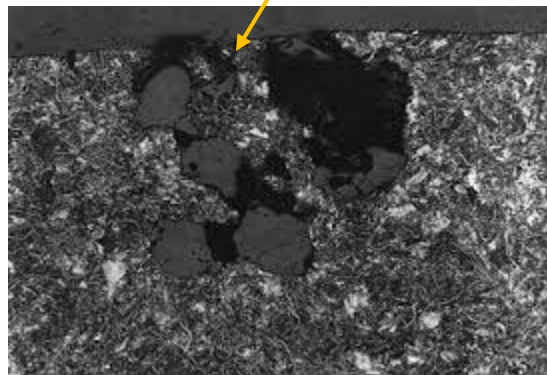
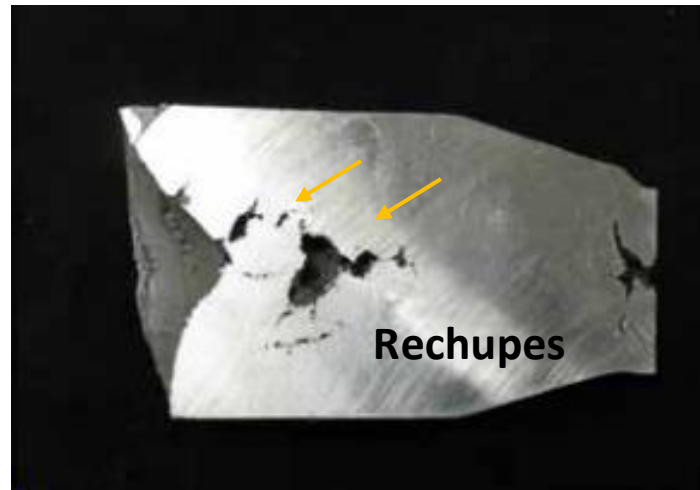


Porosidade Final.





# DEFEITOS DE FUNDIÇÃO





# PRODUÇÃO DOS PROTÓTIPOS - IPT

Vazamento das peças



Peças após desmoldagem

Controle da microestrutura utilizando técnica de análise térmica

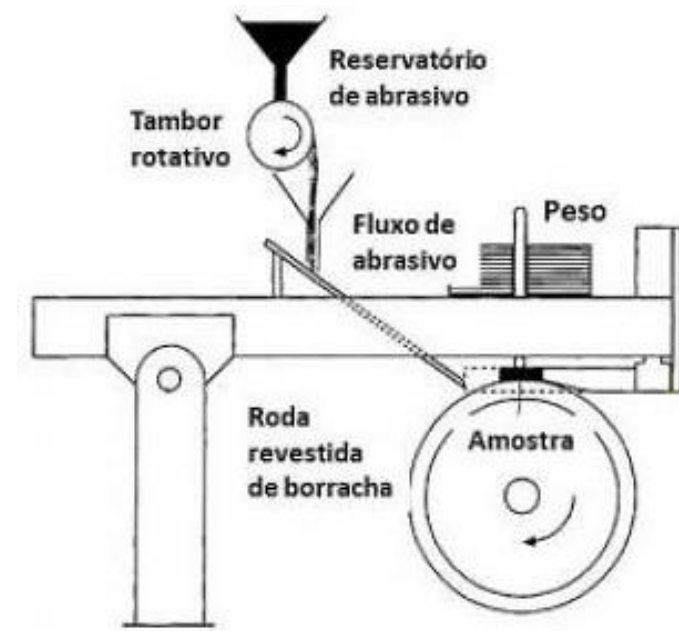
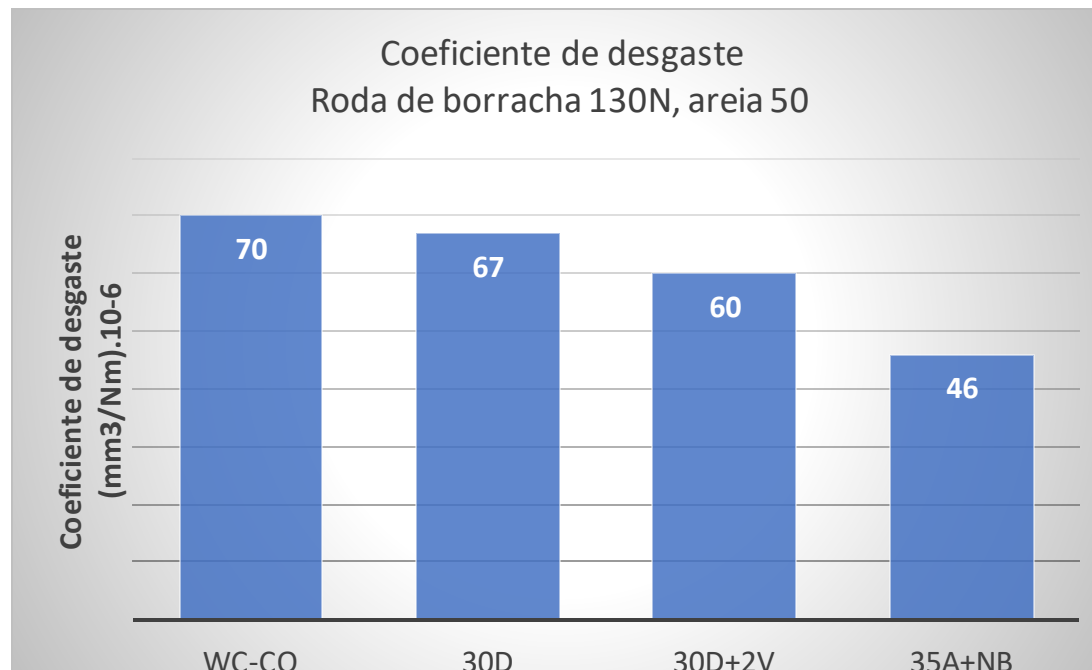


Cascas cerâmicas – fundição de precisão



# RESULTADOS DE DESGASTE – LOTE PROTÓTIPOS

| Condição                                | Força normal | Rotação da roda | Tempo de ensaio | Granulometria da areia |
|---|--------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| Condição 1- norma G65, roda de borracha | 130 N        | 200 rpm         | 600 segundos    | #50                    |



# CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O IPT possui experiência no desenvolvimento e caracterização de ligas resistentes ao desgaste (pex: ferros fundidos e aços Hadfield).
- Utilização de softwares computacionais: Thermo-calc e Magmasoft.
- Controle da solidificação: Técnica de análise térmica.
- Caracterização dos materiais: MO, MEV, LUPA, análises químicas.



■ Lab. de Processos Metalúrgicos / Unidade de Materiais Avançados - IPT

■ Bianka Nani Venturelli  
biankanani@ipt.br

 [linkedin.com/school/iptsp/](https://www.linkedin.com/school/iptsp/)

 [instagram.com/ipt\\_oficial/](https://www.instagram.com/ipt_oficial/)

 [youtube.com/@IPTbr/](https://www.youtube.com/@IPTbr/)

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

 **ipt**  
INSTITUTO DE  
PESQUISAS  
TECNOLÓGICAS

 **Materiais  
Avançados**