



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

Dissertação de Mestrado

# Desenvolvimento de Briquetes autorredutores com agente de recobrimento

Aluno: Kleiton Gonçalves Lovati

Orientador: Dr. Alexandre Fernandes Habibe

02/08/2019



MESTRADO PROFISSIONAL  
EM MATERIAIS

## ESTRUTURA DA APRESENTAÇÃO

1. Introdução
2. Objetivo
3. Revisão bibliográfica
4. Materiais e métodos
5. Resultados e discussões
6. Conclusões
7. Trabalhos Futuros
8. Agradecimento



A produção de ferro é a primeira etapa no processo de fabricação do aço e é também a mais energo-intensiva, portanto estão surgindo várias tecnologias alternativas de redução que tem se mostrado importantes no processo de renovação da siderurgia.

Toda tecnologia emergente passa por limitações técnicas ao decorrer do seu desenvolvimento.

## Tecnologias de Redução Direta

## Tecnologias de Redução e Fusão

As Tecnologias de Redução Direta aumentaram sua produtividade e obtiveram uma elevação da temperatura do gás redutor acarretando na formação de cachos de pelotas em função do efeito de colagem da carga metálica.

Tecnologias de Redução e Fusão que utilizam a autorredução como mecanismo principal, estão passando por problemas operacionais em função da formação de cachos nos briquetes autorredutores



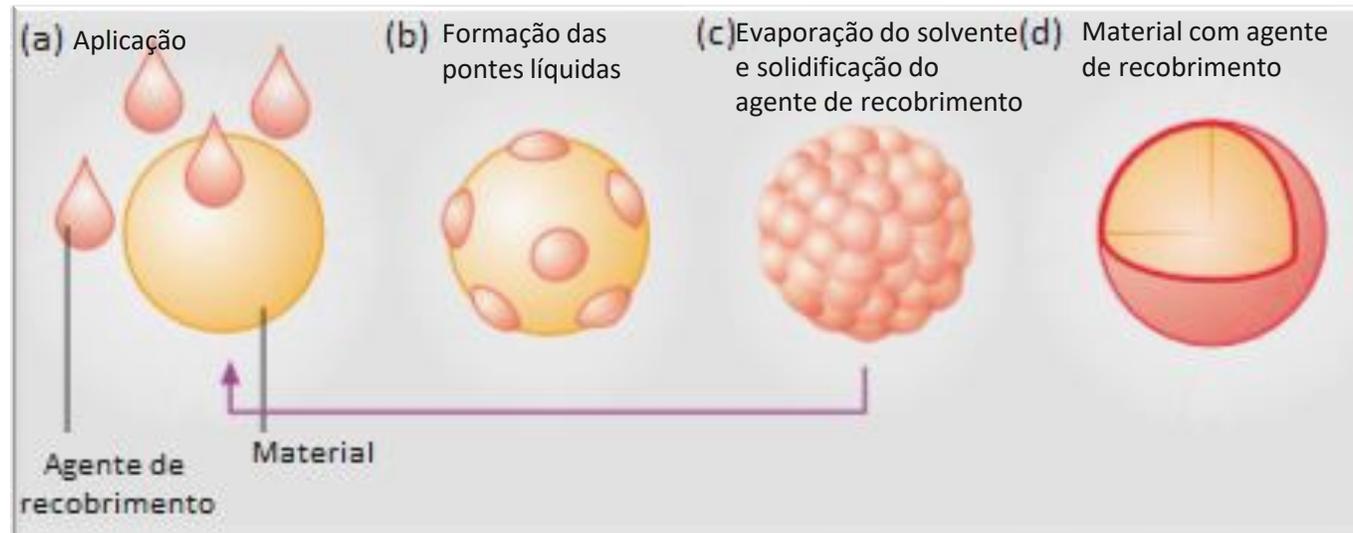
*Formação de cachos em tecnologias de redução direta*



*Formação de cachos em tecnologias de redução e fusão*

Fonte: Lovati, 2013

Um método que está sendo muito usado industrialmente nas tecnologias de redução direta é o recobrimento de pelotas com uma camada de óxido denominada agente de recobrimento.



Fonte: Adaptado de Glatt, 2011

## Justificativa

A formação de cachos é um efeito indesejável nas tecnologias de redução pois causa uma dificuldade na passagem do gás redutor na região da formação de cachos ocasionando um descontrole do fluxo gasoso contribuindo assim para formação de carga inativa, com isso tem-se uma instabilidade operacional e conseqüentemente perda de produtividade.

## GERAL

Desenvolver um briquete autorredutor com agente de recobrimento que produza o melhor efeito de proteção contra o fenômeno de colagem.

## ESPECÍFICOS

Identificar, dentre os diferentes tipos de óxidos refratários considerados na bibliografia, limitado aos óxidos mais utilizados atualmente para o recobrimento de pelota, aquele que produza o melhor efeito de proteção contra o fenômeno de colagem dos briquetes autorredutores.

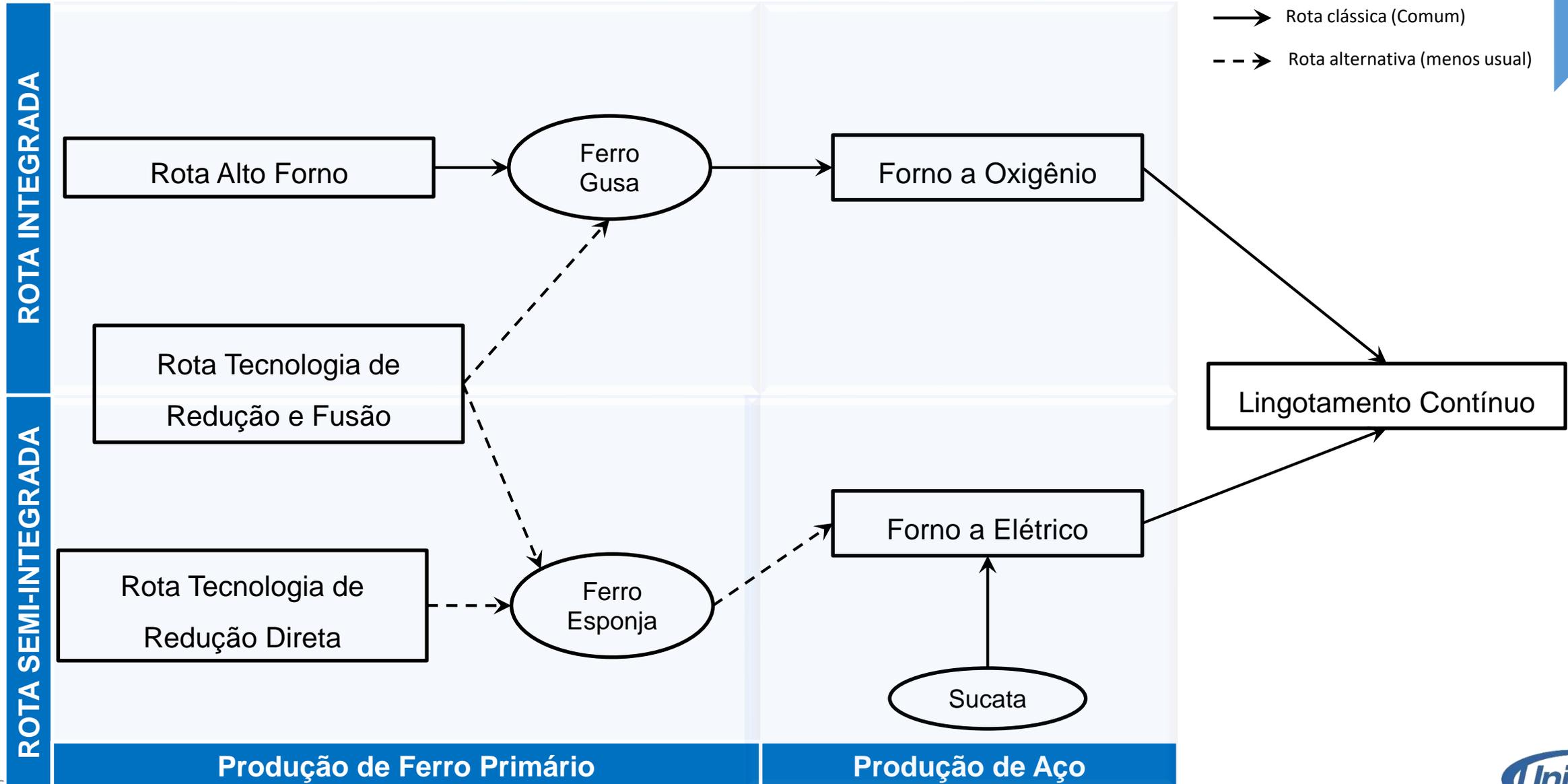
Desenvolver um método de aplicação de agente de recobrimento específico para briquetes autorredutores sem impactar em suas propriedades físicas e metalúrgicas.

Criar um ensaio que avalie o efeito de colagem nos briquetes autorredutores obtendo assim um parâmetro de qualidade que se adeque ao processo dos fornos de cuba.

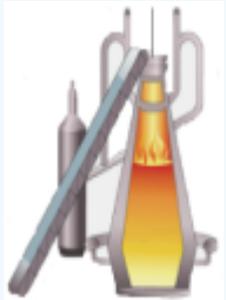
Contribuir para o desenvolvimento das tecnologias emergentes que utilizam briquetes autorredutores.

# Revisão Bibliográfica

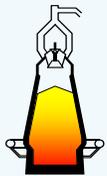
3



## Rota Alto Forno (Blast Furnace)



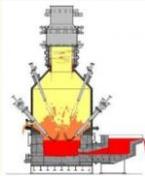
Altos Fornos



Mini Altos Fornos

## Rota Tecnologia Redução e Fusão (Smelting reduction technology)

### BATH SMELTING



Hismelt, Hlsarna



Romelt

### SOLID STATE REDUCTION



Corex



Finex



Tecnored



Oxicup



Tecnored



Oxicup

## Rota Tecnologia Redução Direta (Direct reduction technology)

### ROTARY HEARTH

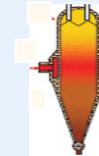


Fastmet, Inmetco, Itmk3



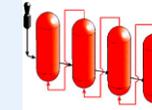
Redsmelt

### SHAFT FURNACE



Midrex, Hyl

### FLUIDIZED BED TECHNOLOGY



Finmet, Circored, Circofer

### ROTARY KILN TECHNOLOGY



SL/RN, Jindal, DRC, Codir

Gusa



Hot Metal

Pig Iron

Gusa



Hot Metal

Pig Iron

Ferro Esponja



Sucata



Nugget



DRI



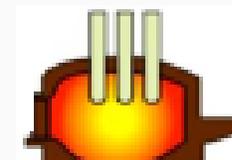
HBI

## Rota BOF



Forno a Oxigênio

## Rota EAF



Forno Elétrico

Lingotamento Contínuo

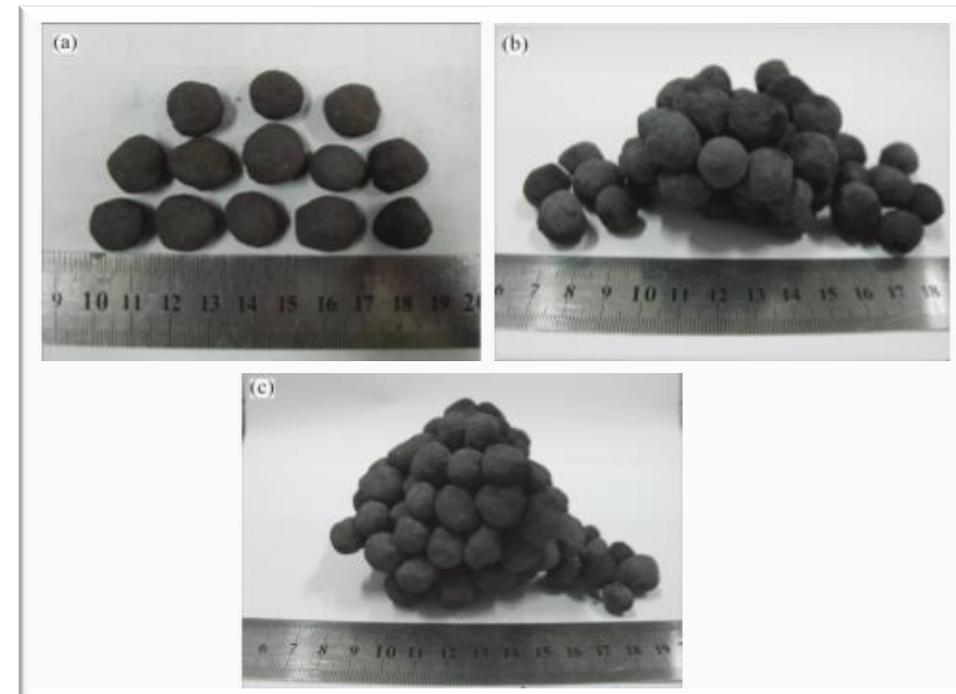
## Experiência obtida pelo Midrex e Hyl

- O processo de colagem e formação de cachos em minérios granulados ou pelotas de minério de ferro é um fenômeno superficial, sendo resultado da reação de sinterização das partículas de ferro metálico.
- Agentes de recobrimento com calcário, bentonita, bauxita e serpentinito mostraram ser bastante eficazes para diminuição do efeito de colagem.
- Aumento da concentração desses sólidos na solução de recobrimento diminui a taxa de redução da pelota.
- Aumento do teor de compostos metálicos na superfície da pelota aumentam o efeito de colagem.
- Normas para quantificar o efeito de colagem em pelotas.(ISO 11256)

## Experiência obtida em Altos Fornos

- Identificado que a aplicação de agente de recobrimento diminui a geração de finos no Alto Forno.

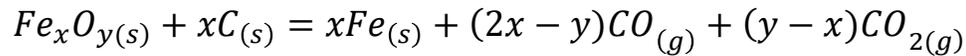
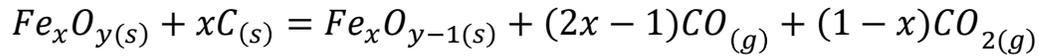
## Efeito de colagem em pelotas RD



*(a) Pelotas antes da redução*

*(b) e (c) Pelotas em formação de cachos após a redução*

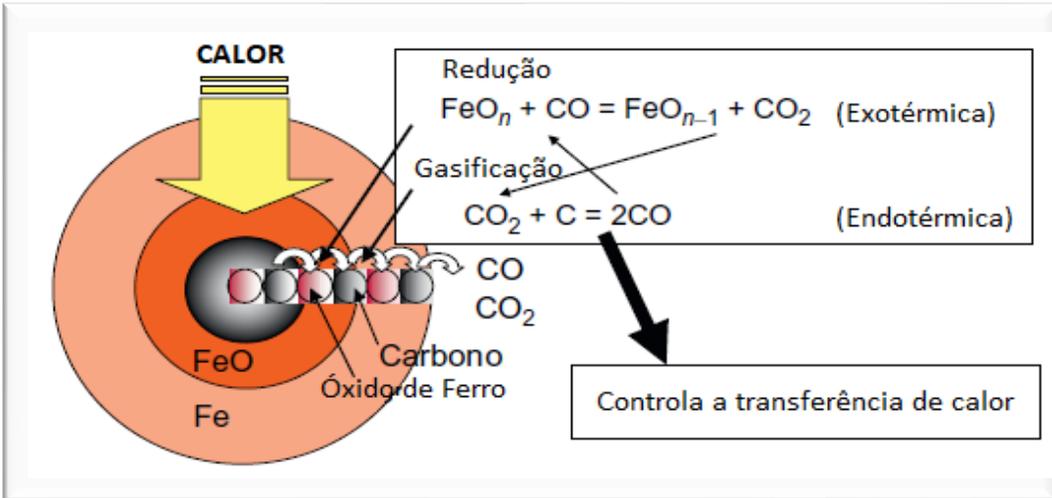
## Cinética da auto-redução



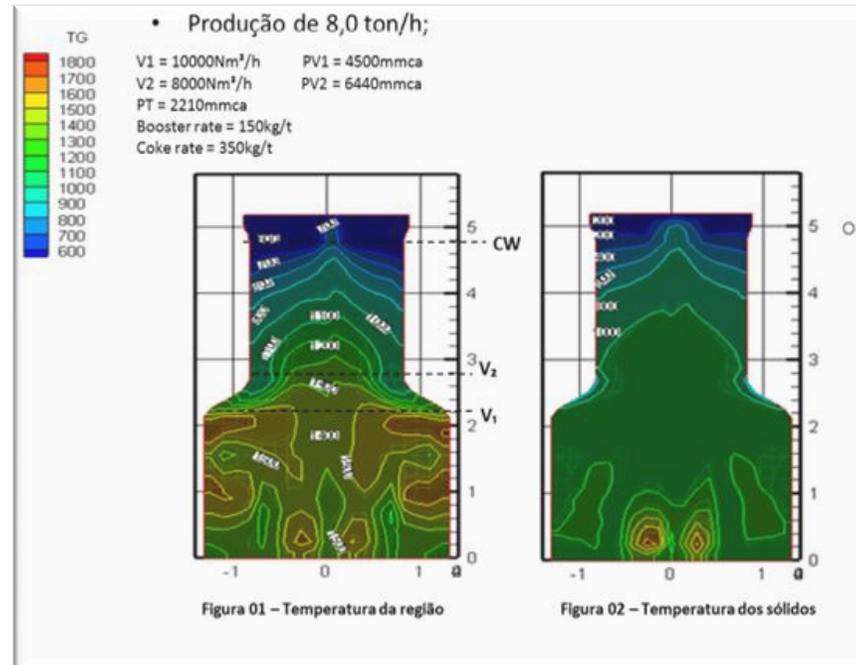
Aglomerados autorredutores submetidos a temperaturas acima de 1200 °C e com alta intensidade de aquecimento, nucleação e sinterização de ferro é favorecido.

Fonte: Takano e Mourão, 2003

## Experiência Tecnored



Fonte: Adaptado de Tanaka, H., 2019



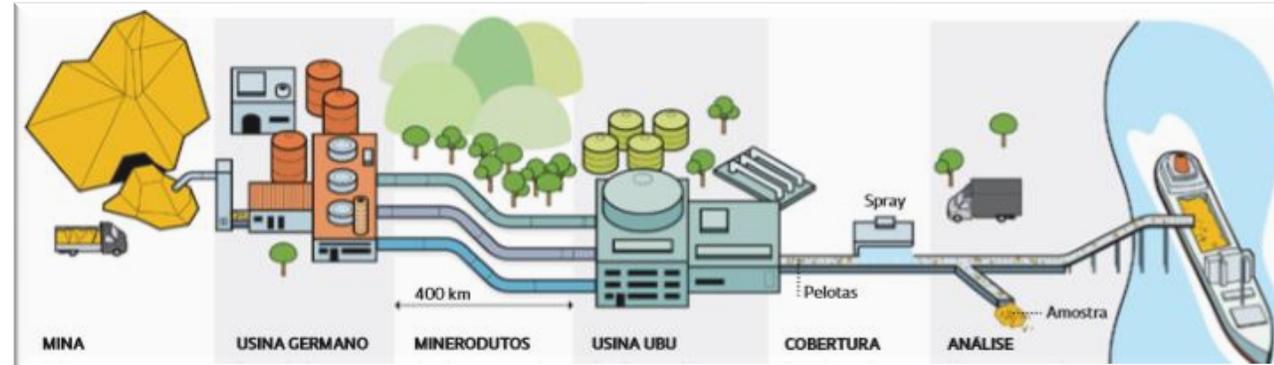
Fonte: Lovati e Gonçalves, 2015



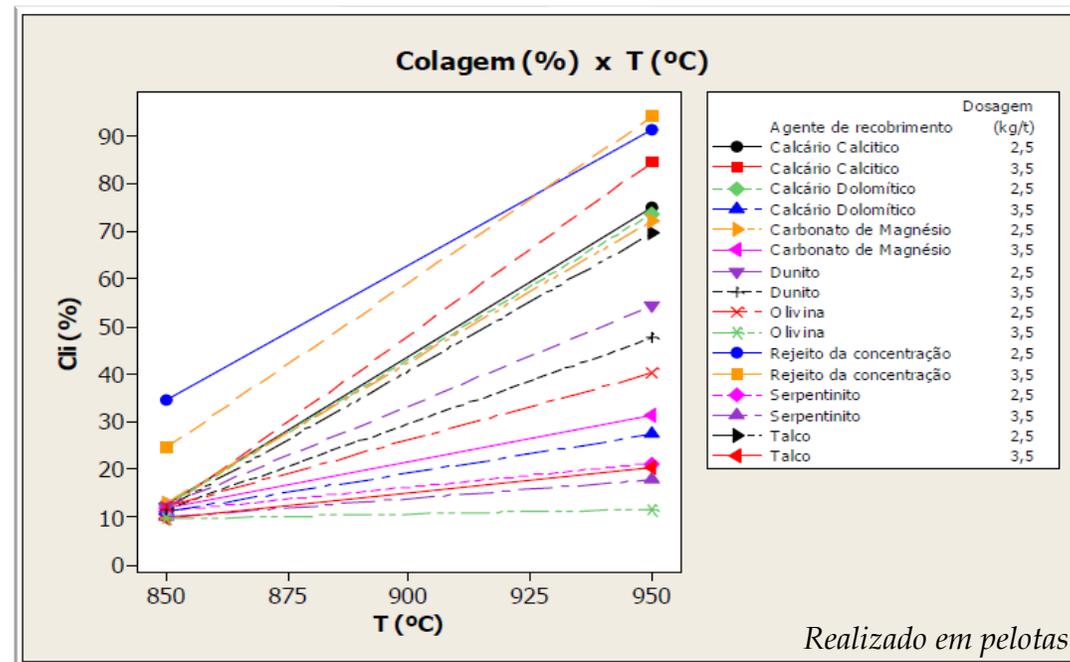
Fonte: Lovati, 2013

# Revisão Bibliográfica

## Métodos de aplicação de agentes de recobrimento em pelotas RD



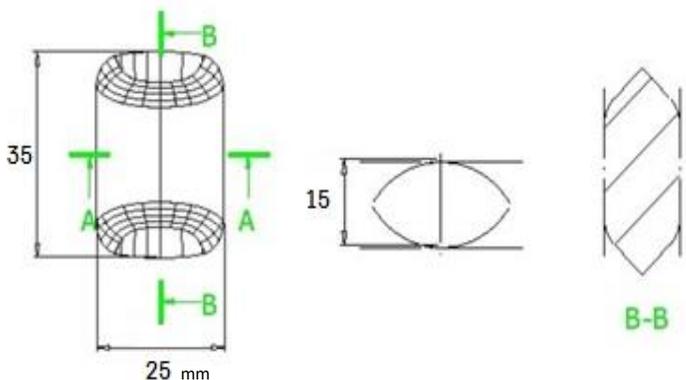
Fonte: Silveira, 2014



Fonte: Pereira, 2002

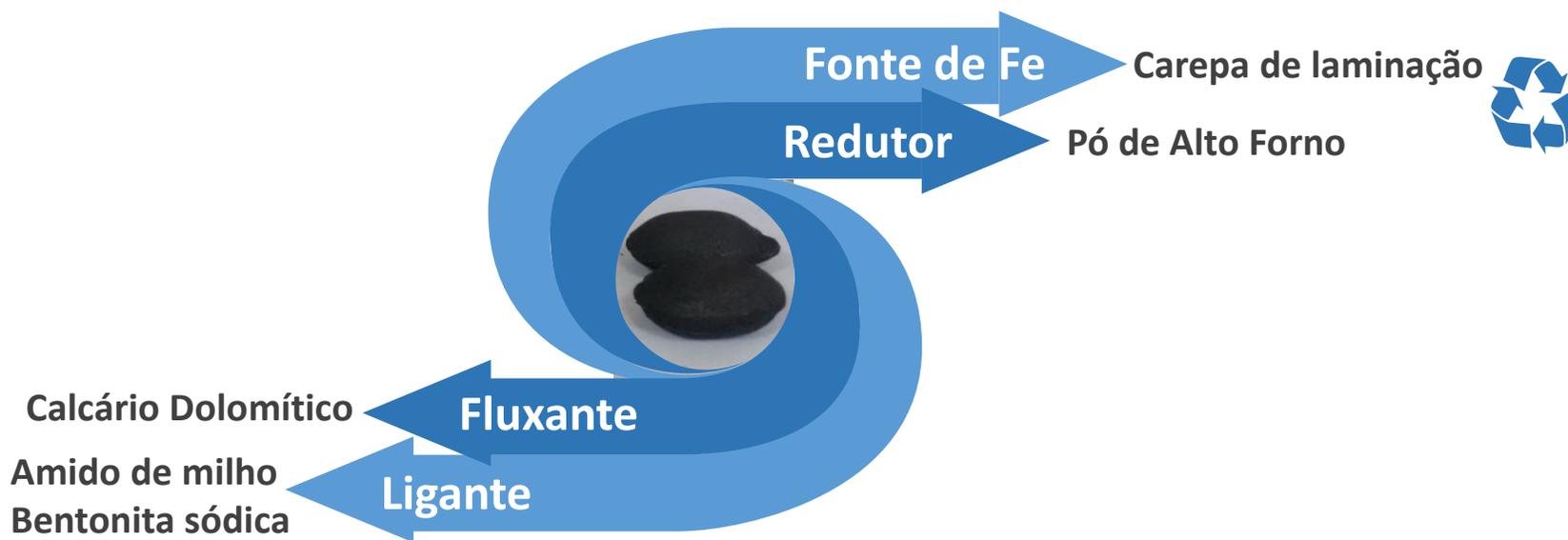
Realizado em pelotas

## Briquete autorredutor



## Análise química Briquete

Elemento	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,869
FeO	23,482
Fe	4,696
C	14,501
SiO <sub>2</sub>	8,889
CaO	12,774
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,707
MgO	4,351
MnO	0,774
CoO	0,259
Na <sub>2</sub> O	-
K <sub>2</sub> O	0,515
S	0,420
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,065
TiO <sub>2</sub>	0,152
NiO	0,057
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,334
V	0,012
ZnO	0,144
CuO	0,081



## Agentes de recobrimento

Calcário Dolomítico



Serpentinito



Bentonita Sódica



Escória de aciaria

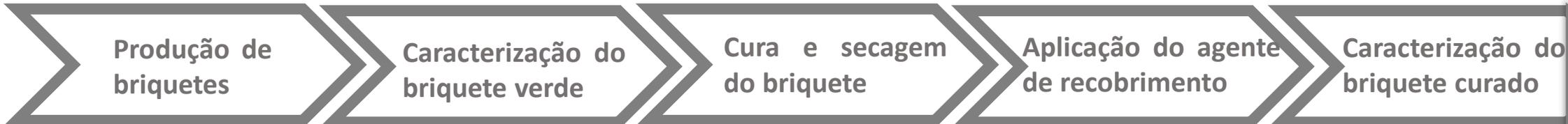


Granulometria utilizada foi abaixo de 0,149 mm

## Análise química e simulação de fase líquida dos materiais de recobrimento

	Elemento	Calcário Dolomítico (%)	Serpentinito (%)	Bentonita Sódica (%)	Escória de Aciaria (%)
Análise Química	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,479	7,438	8,649	23,479
	C	-	-	-	-
	SiO <sub>2</sub>	4,537	53,694	61,213	11,218
	CaO	77,287	1,920	1,008	52,666
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,032	6,061	23,897	3,269
	MgO	4,947	28,808	3,21	3,954
	MnO	0,045	0,195	0,254	2,980
Simulação Fase Líquida	% de fase líquida	<b>2,3</b>	<b>14,2</b>	<b>13,3</b>	<b>15,0</b>
	% de fase sólida	<b>97,7</b>	<b>85,8</b>	<b>86,7</b>	<b>85,0</b>

## Metodologia 1º Parte



Misturador Planetário



Medição de umidade



Teste de quedas



Estufa 150°C  
120min



Separação de 1 lote de briquetes sem aplicação de agente de recobrimento



Preparação da solução



Aplicação da solução no briquete



Teste de tamboramento



Teste de compressão

Teste de quedas

Medição de umidade



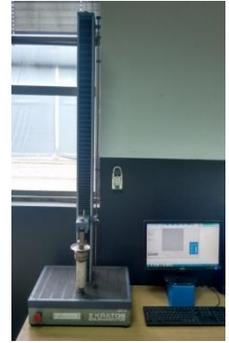
A



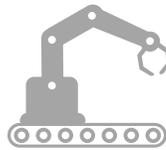
2ª Parte

$$B = \frac{mbv}{mbv + mfp} \times 100$$

Briquetabilidade



Teste de compressão



Separação de 1 lote de briquetes sem aplicação de agente de recobrimento



Briquetadeira



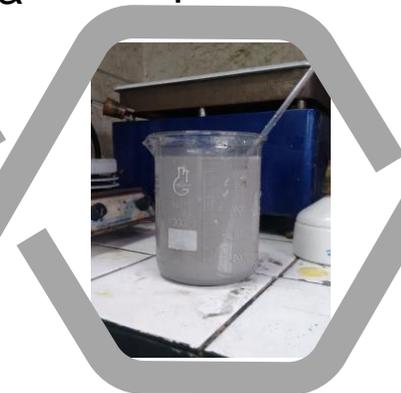
B

## Aplicação do agente de recobrimento

Escória de aciaria



Serpentinito



Bentonita Sódica



Calcário Dolomítico



Foi preparada uma solução com concentração de 15% em peso do agente de recobrimento em relação a água.

Briquete sem aplicação de agente de recobrimento



Escória de aciaria

Serpentinito

Briquete sem aplicação de agente de recobrimento



Bentonita Sódica

Calcário dolomítico



## Metodologia 2º Parte

1ª Parte

Aquecimento a 950°C

Caracterização do briquete aquecido

B

10 briquetes a 950°C ± 10°C por 5 min.  
Atmosfera inerte  
Vazão N2: 10l/min  
Resfriamento: CNTP

Teste de Compressão  
Teste de crepitação



Forno Mufla



25 briquetes a 1100°C ± 10°C por 60 min.  
Atmosfera inerte  
Vazão N2: 10l/min  
Resfriamento: CNTP

Agitador de peneiras  
Malha de 25mm



B

1ª Parte

Aquecimento a 1100°C

Teste de colagem e perda de massa

Caracterização do briquete aquecido



Microscópio eletrônico de varredura



Espectrômetro de Fluorescência de Raio X



LECO

Análise química  
Análise microestrutural



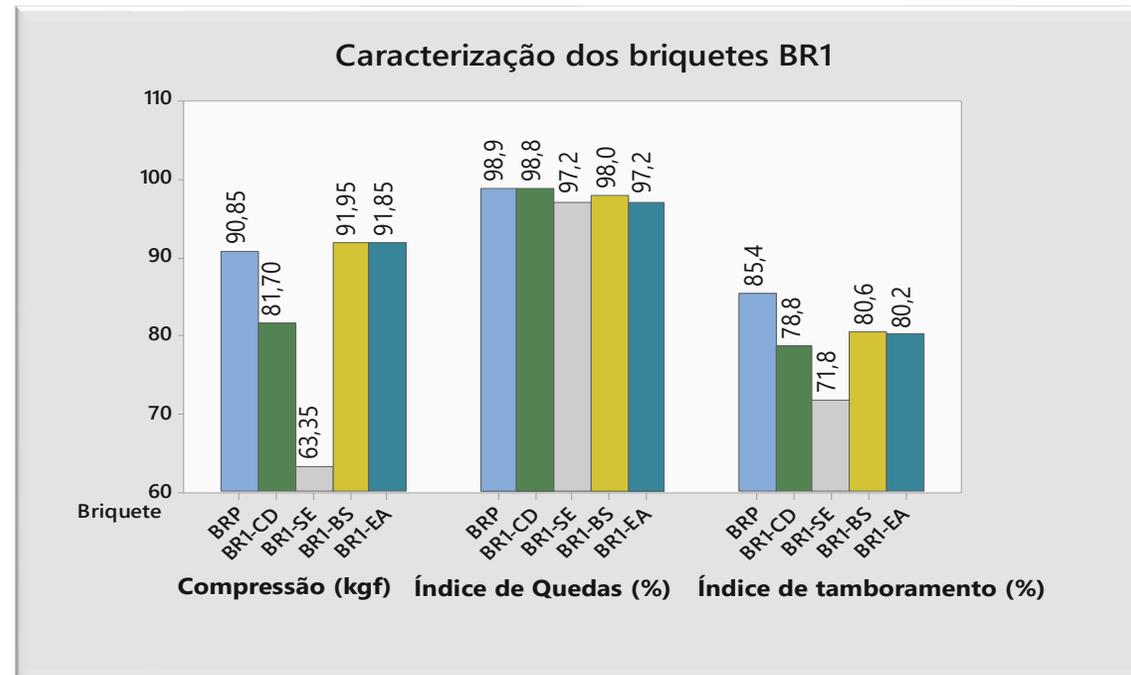
Balança gravimétrica

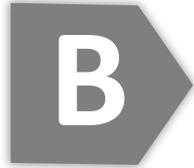
## Caracterização do briquete verde

	Briquetabilidade	Umidade	Compressão	Quedas
Média	73,02%	9,05%	13,13 kgf	97,84%
Desvio Padrão	0,77%	0,38%	1,08 kgf	1,95%

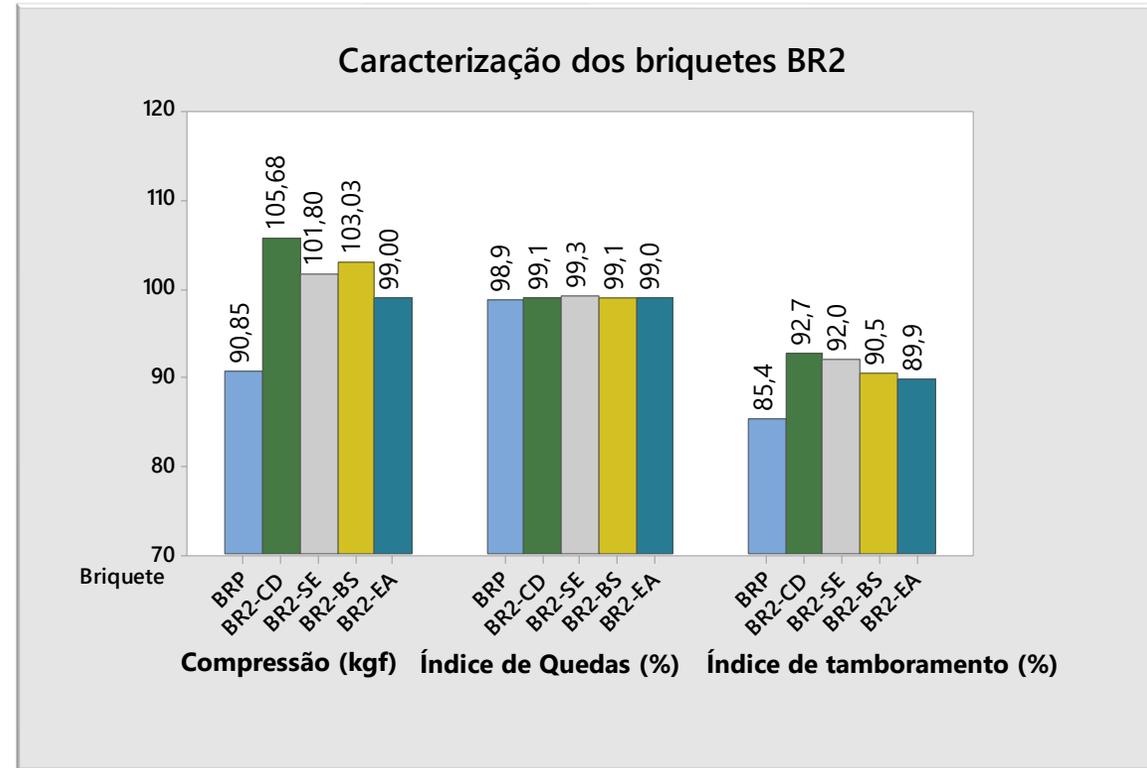
## Caracterização do briquete curado

A





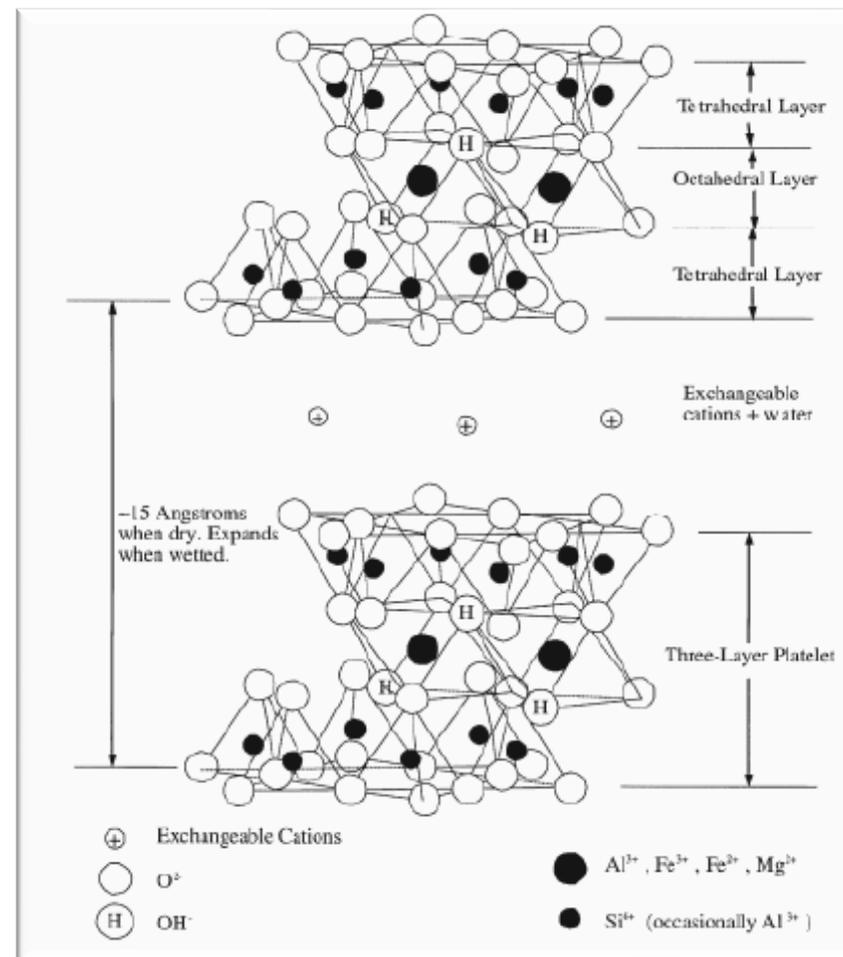
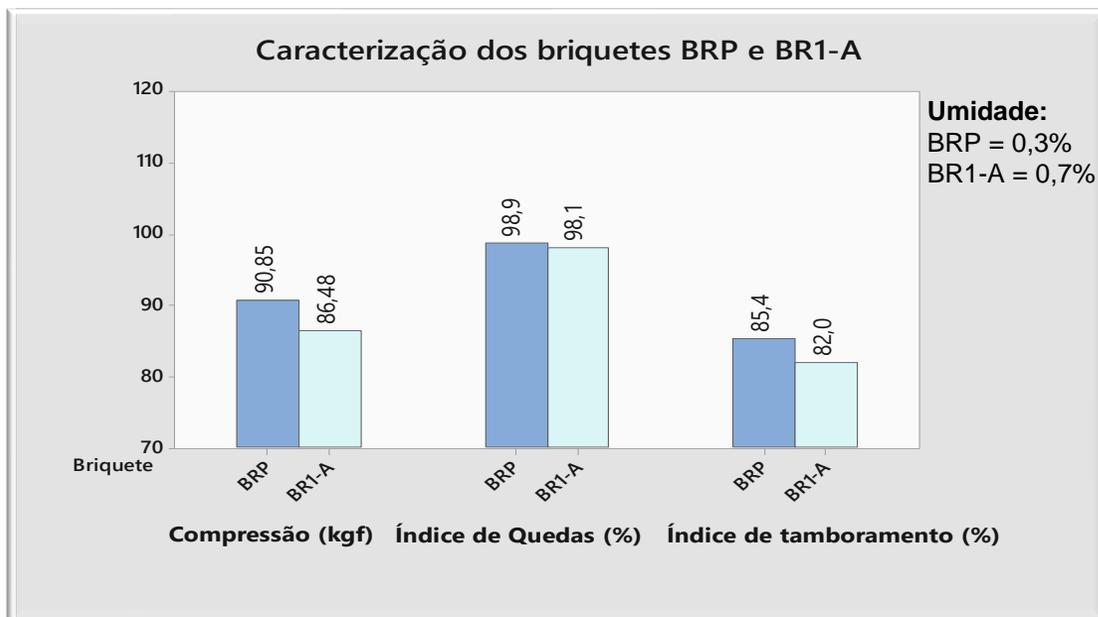
## Caracterização do briquete curado



- Os resultados obtidos pelo método “B” foram similares aos trabalhos realizados com pelotas disponíveis na literatura.
- A aplicação de agente de recobrimento aumentou a resistência a compressão e o índice de tamboramento dos briquetes.

## Caracterização do briquete curado

### Teste de resistência do briquete com(BAR-P-A) e sem imersão em água(BAR-P)

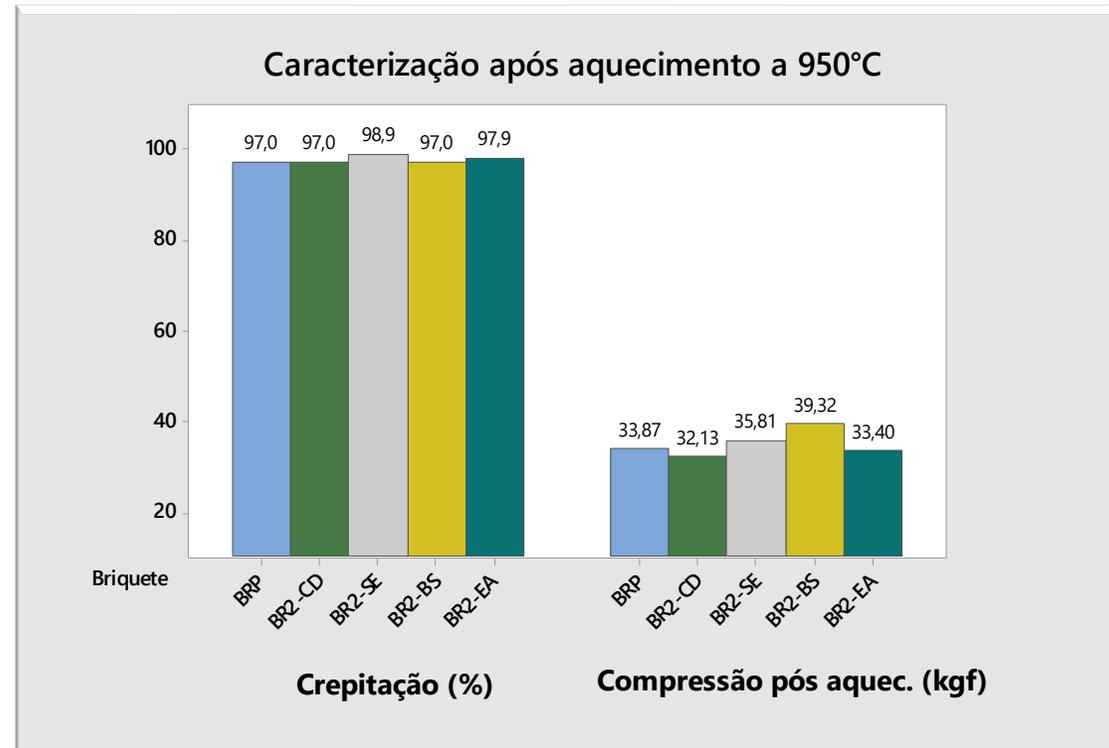


A bentonita sódica possui um estrutura do retículo cristalino arranjada em leitos que é capaz de absorver grandes quantidades de água aumentando as distâncias entre leitos do retículo cristalino.

Sivrikaya e Arol, 2010

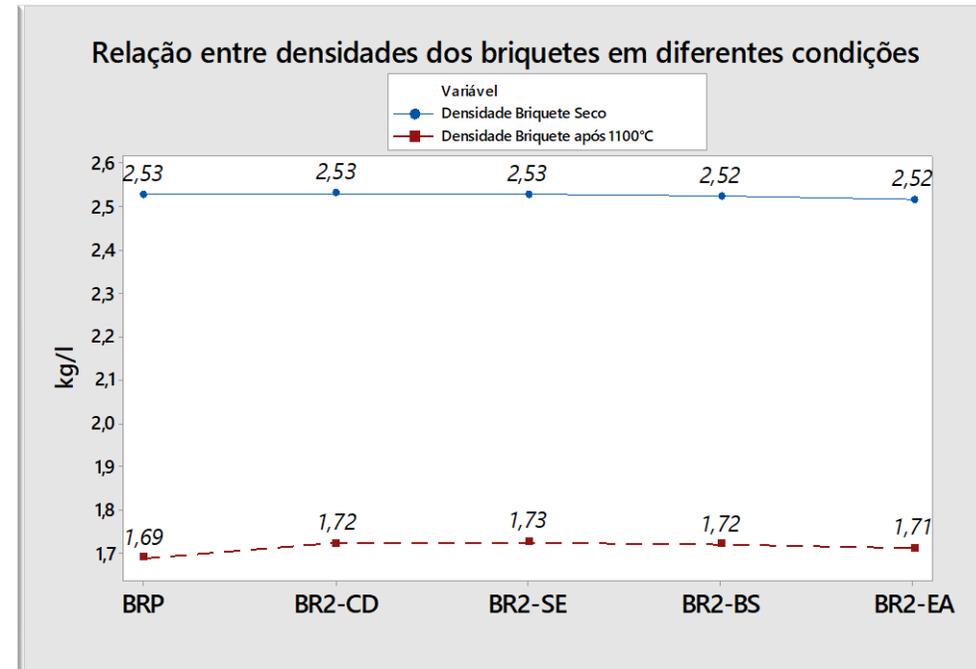
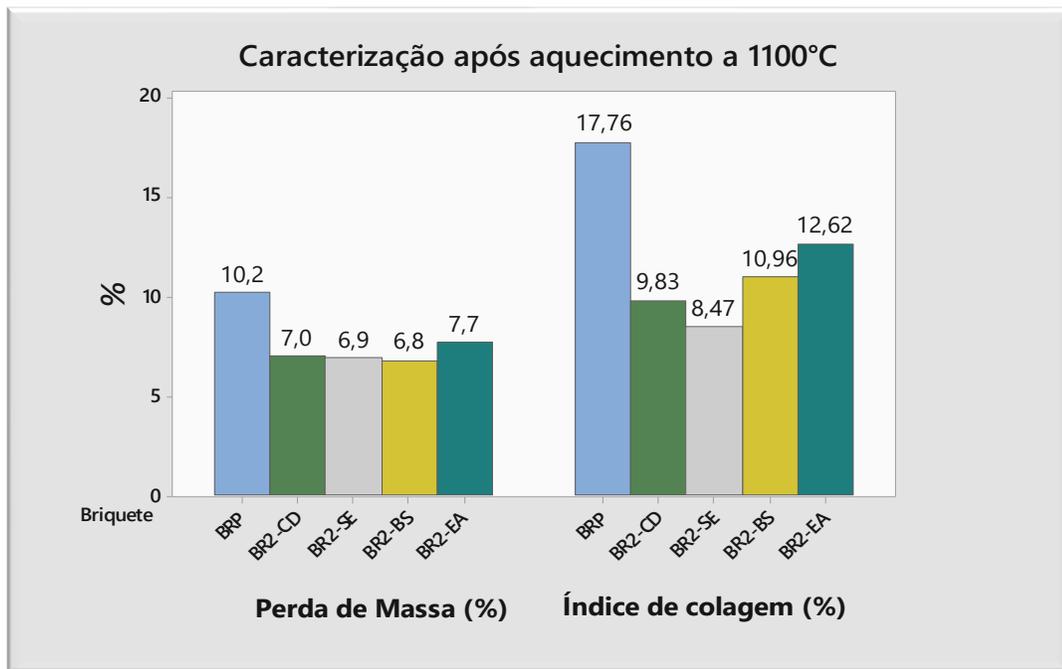
Fonte: Sivrikaya e Arol, 2010

## Caracterização pós aquecimento a 950°C



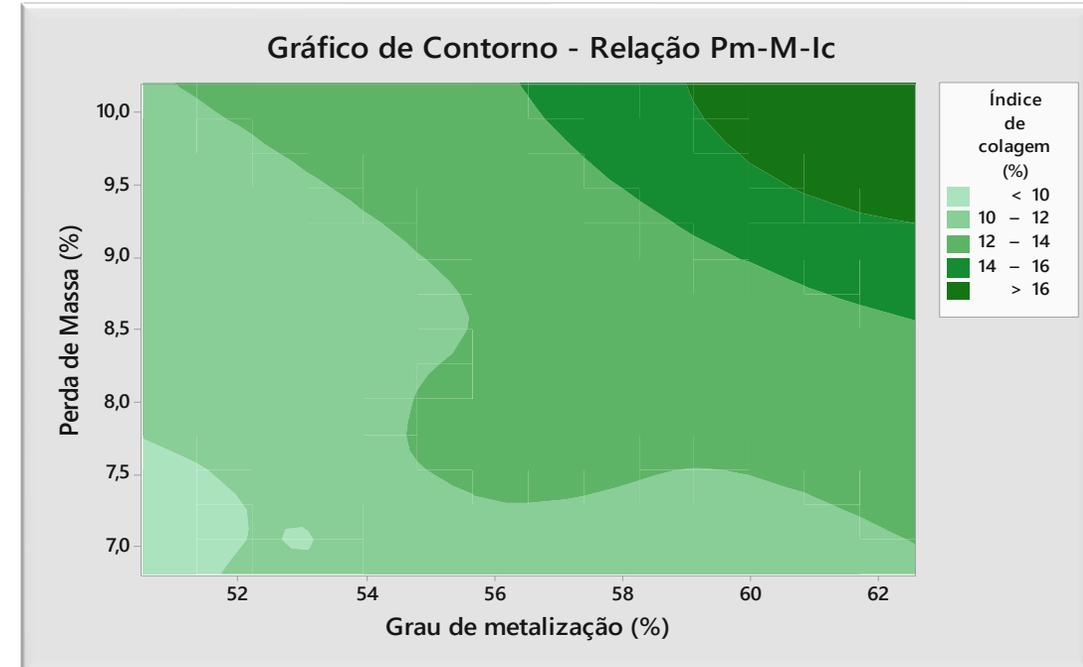
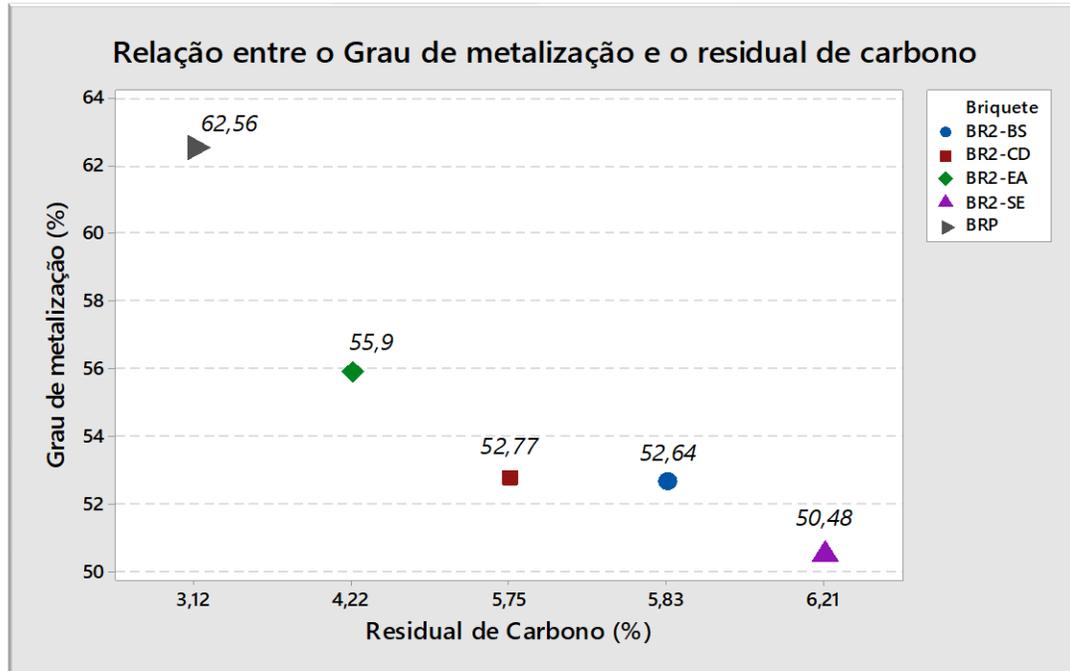
- O consumo do redutor aumenta a fração de vazios aumentando a porosidade do briquete contribuindo para uma redução da resistência a compressão quando comparado com os briquetes curados.

## Caracterização pós aquecimento a 1100°C



- Os resultados mostram que os briquetes com agente de recobrimento possui uma perda de massa menor que os briquetes sem agente de recobrimento, isso ocorre pois o consumo de redutor é maior nos briquetes que não possuem agente de recobrimento.
- Ocorreu uma perda significativa em sua densidade aparente evidenciando um aumento da porosidade do briquete após o aquecimento ocasionado pelas reações de autorredução

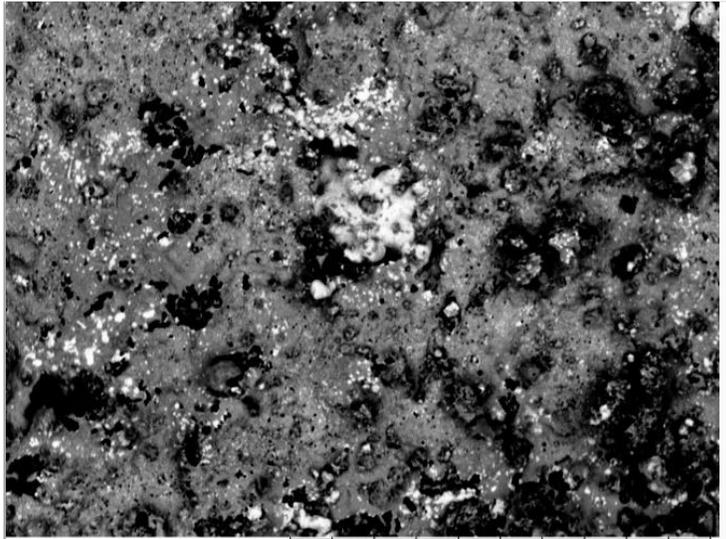
## Caracterização pós aquecimento a 1100°C



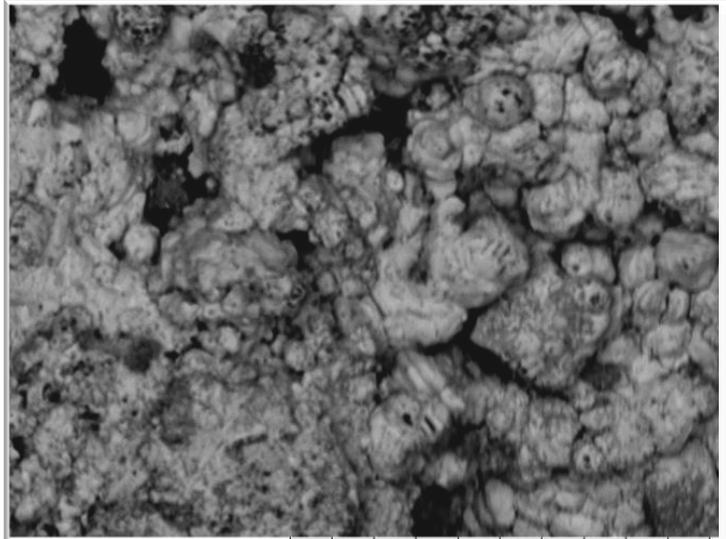
- Nota-se que o grau de metalização é inversamente proporcional ao residual de carbono, mostrando que os briquetes que obtiveram maior metalização foram aqueles que consumiram mais carbono no processo de autorredução.
- há uma relação direta entre a perda de massa e o grau de metalização e cada vez que aumentamos esses dois parâmetros aumentamos o índice de colagem.

# Resultados e discussão

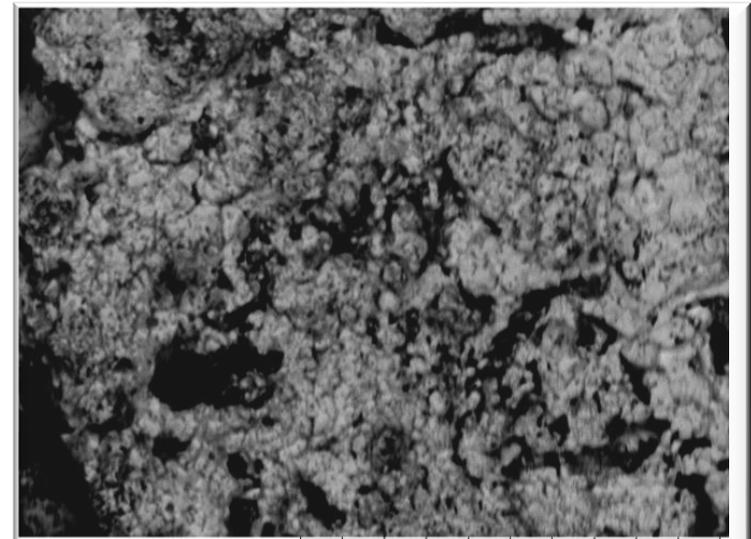
## Caracterização Microestrutural



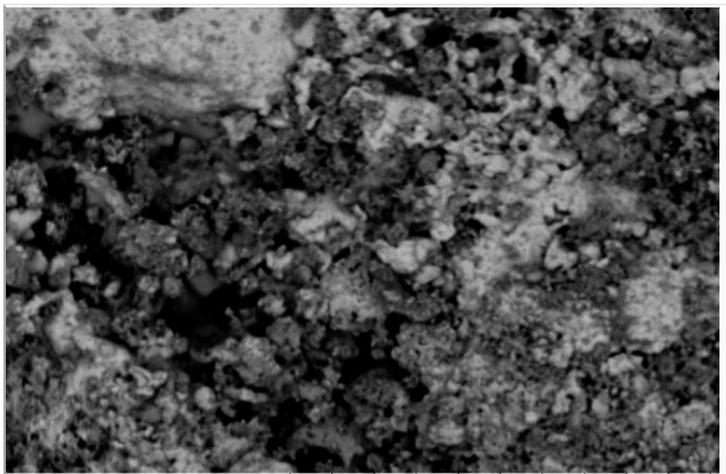
BR-P F D5.5 x500 200 um



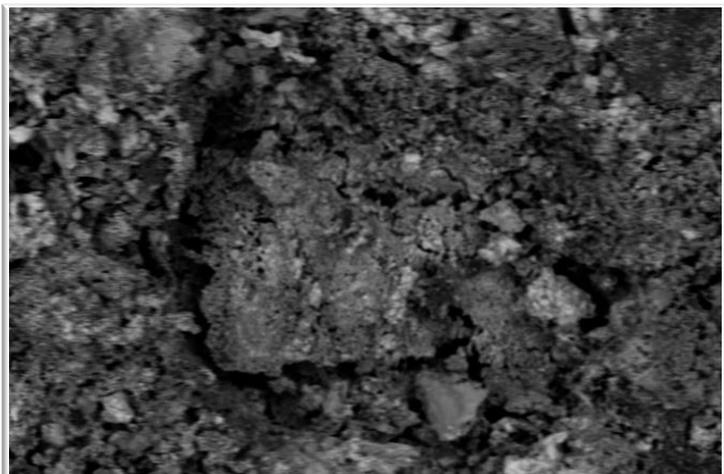
BR-EA F D7.8 x500 200 um



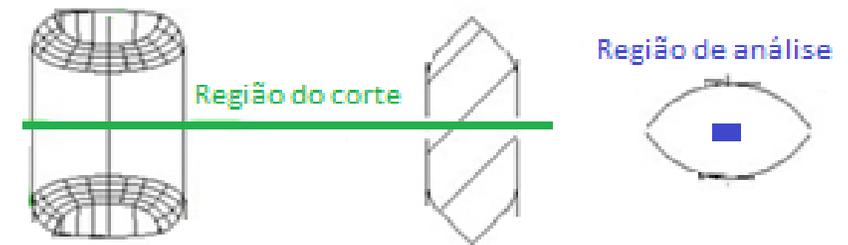
BR-BS F D7.1 x500 200 um



BR-CD F D7.5 x500 200 um



BR-SE F D7.6 x500 200 um



● O mesmo método de aplicação de agente de recobrimento utilizado para pelotas não tem eficiência com briquetes. Para briquetes que possui bentonita como aglomerante a aplicação deve ser realizada antes da etapa de secagem.  

● A adição do agente de recobrimento nos briquetes autorredutores aumentou a resistência a compressão do briquete conferindo maior capacidade de suportar carga e a resistência ao tamboramento. 

● Devido as características de absorção de água da bentonita sódica, a mesma pode deve ser aplicada na solução em uma quantidade inferior a 15%.

● Ensaio de avaliação do efeito de colagem desenvolvido mostrou ser adequado para avaliar o efeito de colagem dos briquetes autorredutores no que se refere a comparabilidade entre briquetes.  

● Os briquetes com serpentinito apresentaram maiores resistência a crepitação e a compressão a 950°C obtendo também menor índice de colagem. 

● A perda de massa possui uma relação direta com o índice de colagem pois quanto menor a taxa de metalização menor será a formação de pontes de ferro.

● A aplicação do agente de recobrimento minimizará o efeito de colagem porém retardará a cinética de autorredução diminuindo a metalização 

## Legenda

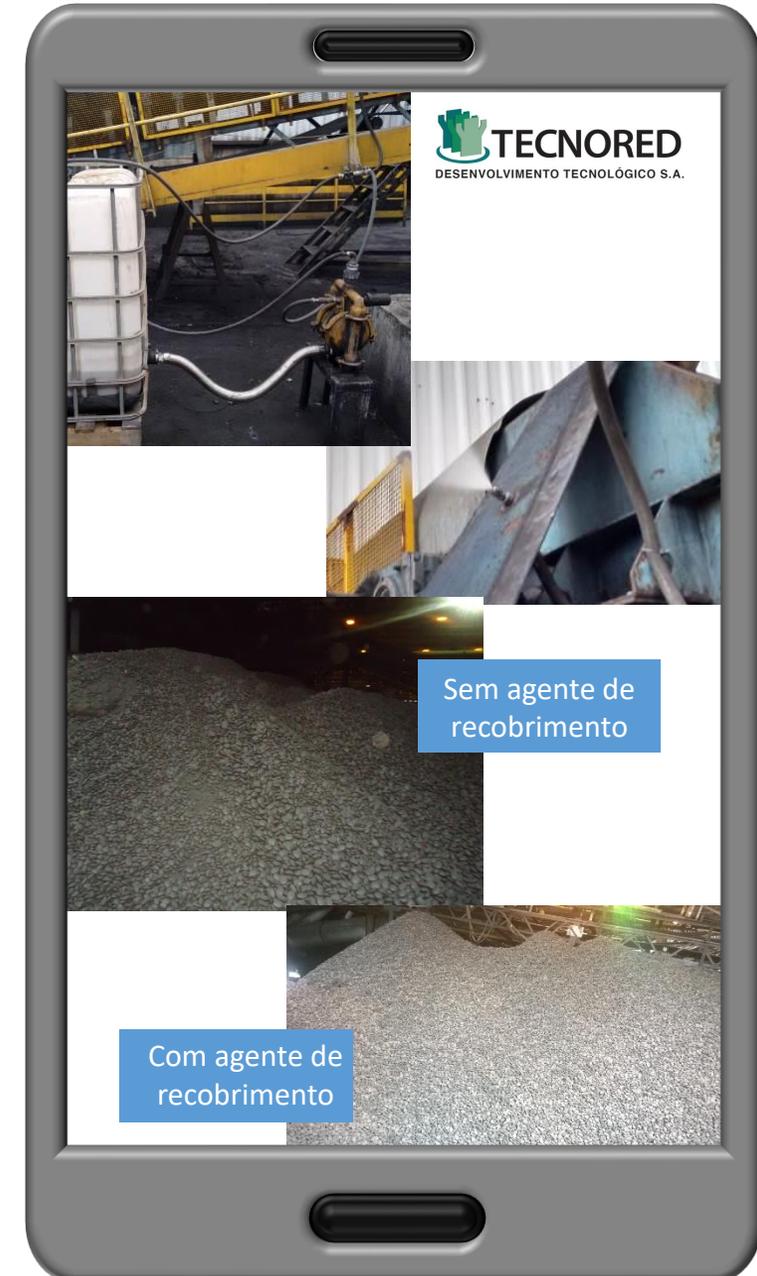


Atingimento de objetivo.



Geração de Produto.

- Avaliar o método de aplicação do agente de recobrimento elaborado para briquetes autorredutores testando em escala industrial.
- Efetuar um novo ensaio de identificação de colagem de briquetes autorredutores com uma atmosfera redutora simulando os fornos de cuba da tecnologia de redução e fusão.
- Avaliar a o efeito da diminuição da taxa de metalização em função da aplicação do agente de recobrimento nos briquetes autorredutores na produtividade dos fornos Oxocup e Tecnored comparando com o ganho de produtividade obtido pela minimização do efeito de colagem.
- Avaliar a influência da composição química e basicidade dos agentes de recobrimento no índice de colagem em diversas temperaturas.





Muito Obrigado a todos