

# INFLUÊNCIA DO AGLOMERANTE NAS PROPIEDADES MECANICAS DA PELOTA AUTO-REDUTORA DE CROMITA<sup>1</sup>

Adolfo Pillihuaman Zambrano<sup>2</sup>

Cyro Takano<sup>3</sup>

Alberto Eloy Anduze Nogueira<sup>4</sup>

Marcelo Breda Mourão<sup>3</sup>

Solon Yasuhiko Tagusagawa<sup>5</sup>

## Resumo

Neste trabalho estudou-se a resistência mecânica da pelota auto-redutora de cromita contendo coque de petróleo e ferro-silício como redutores, pesquisando-se diversos aglomerantes com o objetivo de obter resistência mecânica a quente após tratamento térmico das pelotas nas temperaturas de 1173, 1273, 1373, 1473 e 1573K (900, 1000, 1100, 1200 e 1300°C), estes aglomerantes foram: bentonita, cal hidratada, melaço, carboxi-metil-celulose (CMC) e silicato de sódio. Inicialmente os materiais (cromita, ferro-silício, coque de petróleo e aglomerantes), foram caracterizados por análise química e análise granulométrica. Após isto, os materiais, foram aglomerados na forma de pelotas P1, P2, P3, P4, P5, P6, com adições de 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1% de bentonita e 1% de bentonita mais 0,2 de CMC, respectivamente. Pelotas P7, P8, P9, P10, P11, com adições de 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1% de bentonita mais 12% de cal hidratada respectivamente. Pelota P12, com adições de 2% melaço e 8% cal hidratada. Pelotas P13, P14 e P15 com adições de 1, 2 e 4% de silicato de sódio, respectivamente. Após a fabricação das pelotas, procedeu-se aos ensaios de laboratório; medindo-se a resistência a compressão da pelota verde, ao longo do tempo (28 dias), da pelota seca e após os ensaios de ciclos térmicos e de crepitação, nas temperaturas de 1173, 1273, 1373, 1473 e 1573K e os de redução na temperatura de 1773K, utilizando-se para estes ensaios cadinhos de alumina e grafite. Após os ensaios de redução, os produtos obtidos (escória e metal) foram analisados por microscopia ótica, por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por análise de espectro de dispersão de energia (EDS). Como melhor resultado, obteve-se que a pelota P15 com 4% de silicato de sódio como aglomerante, tem uma resistência a compressão de pelota seca de 5 kg-f/pelota, após tratamento térmico nas temperaturas de 1173 e 1273K, tem uma resistência a compressão de 15 e 15,5 kg-f/pelota respectivamente, não apresenta crepitação e atinge fração de reação unitária em 10 minutos de ensaio, na temperatura de 1773K (1500°C) tendo-se formação de escória aos 3,5 minutos de ensaio prejudicando a reação de redução via CO/cromita.

**Palavras-chaves:** Ferro-cromo; Auto-redução; Aglomerados auto-redutores; Cromita.

## INFLUENCE THE BINDER IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE CHROMITE SELF-REDUCING PELLETS

In this work it studied the mechanical strength of the chromite self-reducing pellets containing petroleum coke and ferro-silicon as reducer, searching several binders aiming the hot mechanical strength of the pellets after thermal treatment at temperatures 1173, 1273, 1373, 1473 and 1573K (900, 1000, 1100, 1200 and 1300° C), these binders were: bentonite, hydrated lime, molasses, carboxymethylcellulose (CMC) and sodium silicate. Initially materials (chromite, ferro-silicon, petroleum coke and binders), were characterized by chemical analysis and granulometric analysis. After that, the materials were agglomerated in the form of pellets P1, P2, P3, P4, P5, P6, with additions 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1% bentonite and 1% bentonite with 0.2% CMC, respectively. Pellets P7, P8, P9, P10, P11, with additions of 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1% bentonite with 12% hydrated lime, respectively. Pellets P12, with additions of the 2% molasses and 8% hydrated lime. Pellets P13, P14 and P15 with additions 1, 2 and 4% sodium silicate respectively. After the made of pellets, it proceeded laboratory experiments, measuring the compression strength of the green pellets over time (28 days), dry pellet and after the thermal treatment experiments and crepitation at temperatures 1173, 1273, 1373, 1473 and 1573K using alumina and graphite crucibles. As best result, it was found that the pellet P15 with 4% sodium silicate as binder has a compression strength of 5 kg-f/pellet after thermal treatment at temperatures of 1173 and 1273K, has a compression strength of 15 and 15.5 kg-f/pellet respectively and this had not crepitation.

**Keywords:** ferro-chromium, self-reduction, self-reducing agglomerates, chromite.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalurgista. Dr. Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica (Poli), Universidade de São Paulo (USP), Profesor-Pesquisador, Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Perú.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalurgista. Livre-Docente, Prof. Associado, Depto. de Eng. Metalúrgica e Materiais, Escola Politécnica, USP, Membro da ABM, SP, Brasil.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Metalurgista. Dr. PósDoutorando Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Poli, USP, SP, Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Metalurgista. Membro da ABM. Mestrando. Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica (Poli), Universidade de São Paulo (USP).*

# 1 INTRODUÇÃO

A produção de ferro-cromo alto carbono utilizando pelotas auto-redutoras pelo processo de auto-redução a nível laboratório é um processo que apresenta vantagens tecnológicas devido à utilização na forma aglomerada de finos de minério de cromita e de redutor assim como eficiência e alta produtividade devido a sua alta velocidade de reação pela mistura íntima entre óxido e redutor, atingindo fração de reação próxima a unitária a 1500°C em 5 minutos.<sup>(1-7)</sup> No processo convencional o rendimento de recuperação de Cr é da ordem de 90%.

Os processos de auto-redução não são novos e atualmente muitos dos processos para fabricação de ferro primário estão baseados neste princípio, tais como: Processo PTC, Processo Tecored, Itmk3, Fasmets, Inmetco e outros. Nesses processos, tem-se duas características que devem ser satisfeitas: A primeira é a transferência de calor ao aglomerado pois a reação global é bastante endotérmica havendo diferença quanto a evolução da redução das partículas de cromita na parte externa e interna do aglomerado (pelota auto-redutora).<sup>(3)</sup> A segunda é que as pelotas auto-redutoras devem ser aglomeradas com aglomerantes de cura a frio, que resultem em elevada resistência mecânica a frio e a quente sem necessidade de queima.<sup>(3-7)</sup>

A fabricação de pelotas auto-redutoras de cromita utilizando como aglomerante o cimento Portland necessita de altos teores de aglomerantes (mais de 10% de cimento Portland), para se atingir resistência a frio compatível para a carga nos fornos de cuba. Outro ponto crítico é a sua perda de resistência mecânica a quente. Isto ocorre porque as reações de hidratação que ocorrem durante a cura a frio sofrem desidratação na faixa de temperatura de 873-1173K (600-900°C). Nessa faixa ocorre a decomposição por calcinação, com perdas das ligações químicas devidas a hidratação e ao mesmo tempo diminuindo a resistência a quente.

A identificação de parâmetros que caracterizam as propriedades das pelotas, são objetos de intensivos estudos desde o principio dos trabalhos de produção das pelotas, já que as pelotas necessitam resistir às degradações durante o manuseio e durante o processamento a quente fazendo com que muita atenção seja dada para a resistência física destes aglomerados. A força de compressão é importante para avaliar o efeito do aglomerante, na resistência da pelota. A necessidade de resistência a quente significa que, um aglomerante com características satisfatórias, deverá manter a pelota íntegra durante o processo de redução.

À avaliação das propriedades das pelotas é extremamente importante, visto que pelotas auto-redutoras de minério de cromo de alta qualidade e alto teor aumentam significativamente a produção do forno, portanto se faz necessário ensaios para avaliação dos aglomerantes.

## 1.1 Ensaios de Caracterização das Pelotas

Os ensaios de caracterização das pelotas visam fornecer parâmetros que permitam prever o comportamento do aglomerante quando usado em escala industrial e tentar prever o comportamento das pelotas obtidas com o minério ou concentrado, no que se refere ao manuseio, e seu comportamento no forno de redução.

Dado que as pelotas devem ser transportadas do local de sua produção até o forno de redução, elas devem apresentar resistência adequada ao manuseio, destacando-se como principais características físicas a granulometria e resistência a compressão a frio e a quente.

## 1.2 Aglomerantes Utilizados na Produção de Pelotas Convencionais de Minerio de Ferro

A bentonita, é atualmente o aglomerante mais usado na pelotização de minério de ferro, já que as argilas tem capacidade de absorver água, através de suas camadas estruturais, formando géis que se liquefazem quando agitados o gelatinizam-se quando em repouso (tixotropia), conferindo-lhes poder aglomerante. A cal, é um importante aglomerante na pelotização contribuindo para a melhora da resistência das pelotas a verde e a seco, devido à presença dos cátions magnésio e cálcio, formando produtos que aumentam a resistência das pelotas queimadas. Tanto a cal magnesiana como a calcítica apresentam aplicação como aglomerante na pelotização.

O silicato de sódio é bastante utilizado como ligante das areias de fundição. O endurecimento dos silicatos de sódio corresponde a aumento de viscosidade

Além da cal e das argilas, diversos outros compostos se utilizaram como aglomerantes para pelotização como cloreto de magnésio hidratado, óxido de magnésio e cloreto de cálcio.

A principal razão da busca de reagentes orgânicos decorre do fato de que após a queima da pelota, esses reagentes são oxidados sem deixar resíduos apreciáveis. Isso pode ser de fundamental importância na produção de alguns tipos de aço, onde a quantidade de impurezas presentes deve ser mínima. Além disso, obviamente, buscam-se novos reagentes que possam tornar o processo mais econômico. De fato, embora, regra geral, o custo dos aglomerantes orgânicos por unidade de massa seja muito mais elevado que os inorgânicos como a bentonita, a quantidade adicionada é muito menor, o que implica economia, seja na adição do reagente, seja no transporte e manuseio.

Shusterich relata o uso do reagente derivado da celulose, que consiste de uma longa cadeia de moléculas, com muitos radicais hidroxila e carboxilas, na qual o agente aglomerante é o carboxi-metil-celulose de sódio, tendo-se como principal característica a sua alta viscosidade e alta capacidade de absorção de água.

Esses produtos não contem sílica e suas adições não dilui a quantidade de ferro pois, após a queima das pelotas, estes reagentes não deixam resíduos. Apresenta grande homogeneidade, observando-se diminuição na energia necessária a redução, já que as pelotas apresentam uma redutibilidade superior à obtida com as pelotas feitas com bentonita, sendo eliminada este após a queima das pelotas, observando-se um grande aumento na porosidade das pelotas.

Como principais desvantagens, além do elevado custo, os reagentes são altamente higroscópicos, polimerizando-se facilmente em água, e produz pelotas com menor resistência a compressão, tanto a verde como a seco.

As propriedades a frio e a quente das pelotas auto-redutoras de cromita são funções de diversas variáveis. Entre as principais destacam-se: composição granulométrica das matérias primas (minérios ou resíduos, carvão ou coque, aglomerantes e fundentes); porosidade das matérias primas; composições químicas das matérias primas; composição da pelota propriamente dita; processo de pelotização e tamanho das pelotas. Exige-se, atualmente, que 90% das pelotas estejam compreendidos entre 9 e 16 mm de diâmetro e no máximo 5% abaixo de 5 mm.

Neste trabalho estudar-se-á o comportamento da pelota auto-redutora de cromita com necessidade mínima de aglomerantes, obtendo-se pelotas com boas propriedades a frio, a quente, suficientemente resistentes ao manuseio e transporte.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram finos de cromita brasileira; finos de coque de petróleo; finos de ferro-silício e como aglomerantes bentonita, melaco, cal virgem e silicato de sódio. Os materiais foram misturados e pelletizados. A Tabela 1 mostra a composição química dos materiais e a Tabela 2 a composição das pelotas auto-redutoras, utilizando-se pelotas de tamanho padrão (15 mm) passadas por um gabarito de aço para que apresentem forma padronizada e peso constante.

**Tabela 1.** Composição química dos materiais (%)

Componentes	Cromita	Coque de petróleo	Fe-Si	Silicato de sódio neutro	Bentonita	Melaço	Cal virgem
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41,2						
FeO	16,9				7,29	0,6-2,0	
SiO <sub>2</sub>	5,7			27,6	55,72	27,6	1,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,3				28,41	0,2-1,0	
MgO	15,6				2,85	4-8	0,5
CaO	0,4				1,04	60-70	90
Material volátil		10,8					
Fe total	13,1		25,0				
P	0,007						
C fixo		88,8					
Cinzas		0,4					
S		0,8					
Si			4,16				
Ca			0,14				
ZnO					2,75		
Na <sub>2</sub> O				8,6			
H <sub>2</sub> O				63,5			
Outros						0,6-1,2	7,6

**Tabela 2.** Composição das pelotas ensaiadas(% massa)

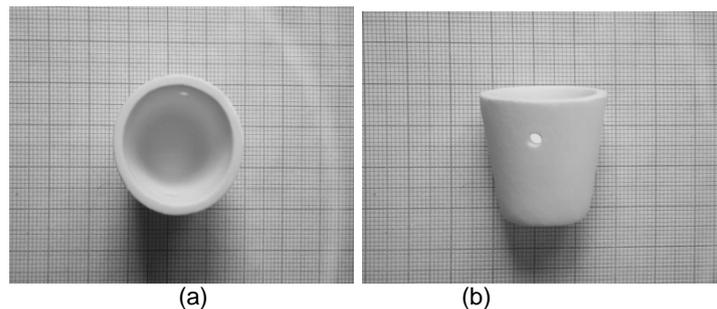
Componentes	Cromita	Coque de petróleo (20% excesso)	Fe-75%Si	Silicato de sódio (hidratado)	Bentonita	Melaço	Cal virgem hidratada	CMC
P1	80,08	17,92	2	-	0,0	-	-	0,0
P2	79,88	17,87	2	-	0,25	-	-	0,0
P3	79,67	17,83	2	-	0,50	-	-	0,0
P4	79,47	17,78	2	-	0,75	-	-	0,0
P5	79,26	17,74	2	-	1,0	-	-	0,0
P6	79,10	17,70	2	-	1,0	-	-	0,2
P7	70,28	15,72	2	-	0,0	-	12,0	-
P8	70,08	15,67	2	-	0,25	-	12,0	-
P9	69,87	15,63	2	-	0,50	-	12,0	-
P10	69,66	15,59	2	-	0,75	-	12,0	-
P11	69,47	15,53	2	-	1,0	-	12,0	-
P12	71,90	16,10	2	-	-	2,0	8,0	-
P13	79,26	17,74	2	1 (2,74)	-	-	-	-
P14	78,45	17,55	2	2 (5,48)	-	-	-	-
P15	76,81	17,19	2	4 (10,96)	-	-	-	-

Tendo-se o melaço uma perda por calcinação ao ar ( $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ) de 88-92%. Resíduo após calcinação de 8-12%, mostrando-se a composição química média do resíduo na Tabela 1.

O carboximetilcelulose (CMC) é um composto orgânico derivado da celulose de alta solubilidade e viscosidade em água e é bastante utilizado como estabilizante e ligante.

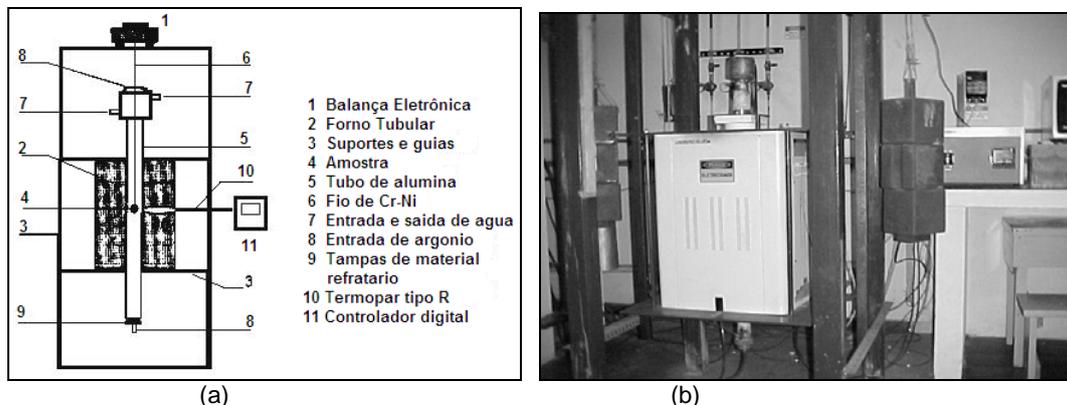
Após cura e secagem, as pelotas foram submetidas aos ensaios do comportamento a frio, a quente, crepitação e quedas sucessivas.

A Figura 1 mostra o cadinho de alumina, utilizado nos ensaios do comportamento a quente.



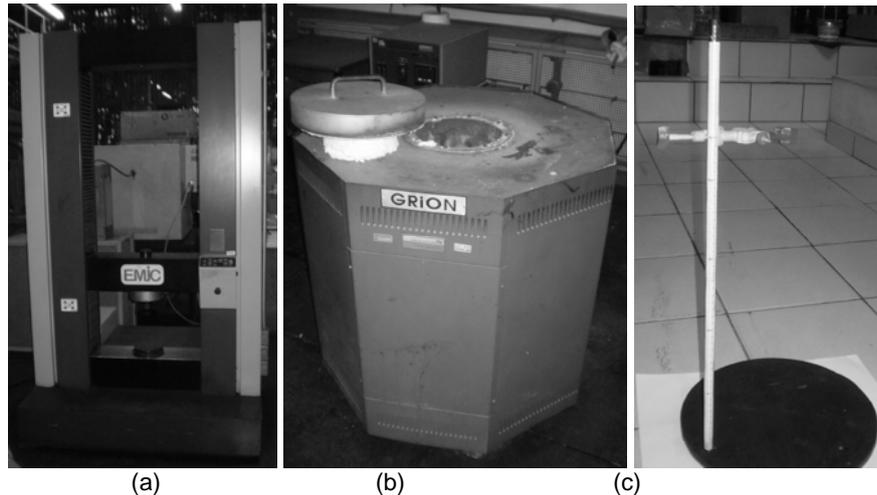
**Figura 1.** Cadinho de alumina, (a) vista superior (b) vista lateral.

A Figura 2 mostra o equipamento (forno) utilizado para submeter as pelotas a ciclos isotérmicos (1173, 1273, 1373, 1473 e 1573K).



**Figura 2.** (a) Representação esquemática do forno de resistências. (b) Vista do forno de resistências e seus equipamentos auxiliares.

Os equipamentos utilizados para os ensaios de resistência das pelotas, os ensaios de crepitação e os ensaios de quedas repetidas esta mostrado nas Figuras 3a, 3b e 3c, respectivamente.



**Figura 3.** (a) Prensa EMIC; (b) forno de resistencias; e (c) equipamento para ensaios a quedas repetidas.

Para avaliação do desempenho de um aglomerante na composição das pelotas auto-redutoras adotou-se os ensaios pesquisados pela Vale do Rio Doce (CVRD) para avaliação destes:

### **2.1 Ensaio de Compressão das Pelotas Auto-Redutoras a Verde**

Estas foram realizadas logo após a pelotização e variando-se o tempo de cura, de tempos em tempos (cada 4 dias) por até o 28º dia (curadas). Estes ensaios seguirão o seguinte procedimento: De um lote de pelotas, tomam-se 15 ao acaso com diâmetro de 15 mm. Uma a uma são submetidas à compressão até o surgimento de fissura em uma prensa apropriada, registrando-se a carga de ruptura. A média aritmética dos valores encontrados representa o resultado do ensaio.

### **2.2 Ensaio de Comportamento Mecânico a Altas Temperaturas**

As pelotas auto-redutoras de cromita previamente secas a 393K (120°C), durante 3 horas, foram submetidas a ensaios de ciclos térmicos nas temperaturas de 1173, 1273, 1373, 1473 e 1573K, para avaliar a resistência a compressão das pelotas após seu resfriamento a temperatura ambiente.

Estes ensaios seguirão o seguinte procedimento: De um lote de pelotas previamente tratadas como foi dito acima, tomam-se 15 ao acaso com diâmetro de 15 mm. Uma a uma são submetidas à compressão até o surgimento de fissura em uma prensa apropriada, registrando-se a carga de ruptura. A média aritmética dos valores encontrados representa o resultado do ensaio.

### **2.3 Ensaio de Crepitação**

As pelotas passaram por ensaios de crepitação, seguindo o seguinte procedimento: 32 pelotas são secas a 413K por 4 horas, sendo em seguida submetidas a um choque térmico, ou seja, a pelota é levada da temperatura ambiente até as de ensaios, por exemplo, a 1273K, rapidamente, passados 5 minutos nessa temperatura, se retiram as pelotas para ver e calcular o índice de crepitação.

Calculo do índice de crepitação:

$$IC = N^{\circ} \text{ de pelotas crepitadas} \times 100/32$$

## 2.4 Ensaio a Quedas Repetidas

As pelotas passaram por ensaios de quedas repetidas, seguindo o seguinte procedimento: Prepara-se um lote de pelotas. São tomadas ao acaso 15, e uma a uma, é deixado cair de uma altura de 45 cm sobre uma espessa chapa de aço repetidamente, até o aparecimento de fissuras.

Conta-se o numero de quedas de cada pelota até a fissura, não inclusa a queda onde esta ocorreu. A média aritmética desses valores expressa o resultado do ensaio em numero de quedas por pelota.

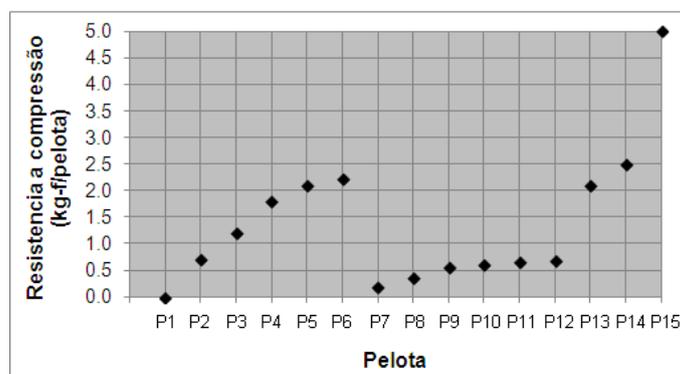
## 2.5 Resistência à Compressão das Pelotas Secas

De um lote de pelotas, tomam-se 15 ao acaso que são secadas a uma temperatura de 393K, durante 3 horas. Após o resfriamento ao ar, uma a uma é submetida à compressão até a ruptura, em prensa apropriada. Nesse momento é anotada a carga. A média aritmética dos valores encontrados representa o resultado do ensaio.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Resistência à Compressão das Pelotas Secas

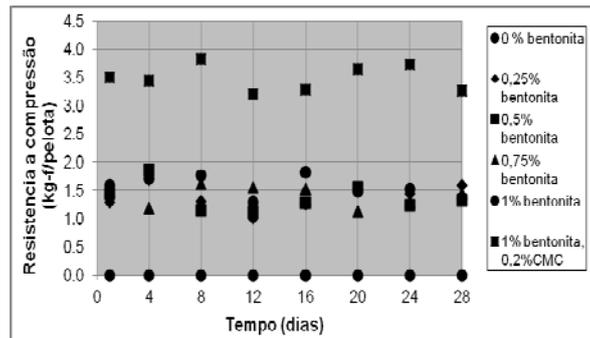
As pelotas auto-redutoras (P1 – P15) foram secas na temperatura de 393K durante 3 horas medindo-se a sua resistência a compressão (Figura 4), observando-se que a P15 com 4% de silicato de sódio como aglomerante, tem a maior resistência à compressão de 5 kg-f/pelota.



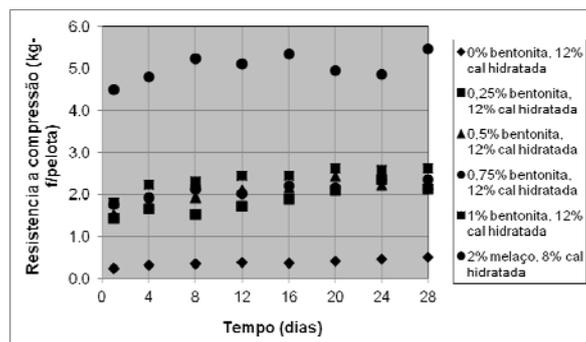
**Figura 4.** Resistencia a compressão das pelotas, após secas na temperatura de 393K durante 3 horas.

### 3.2 Ensaio de Compressão das Pelotas Auto-Redutoras a Verde

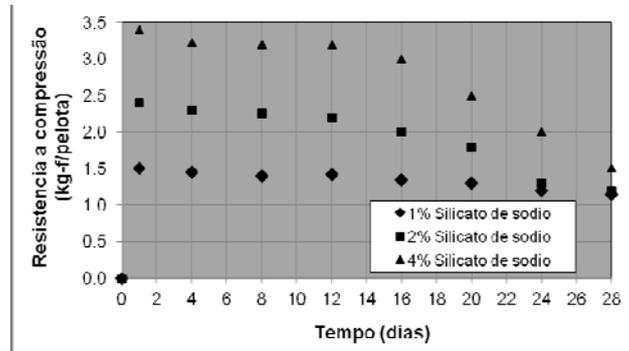
As Figuras 5 a 7 mostra à resistência a compressão das pelotas auto-redutoras de cura a frio ensaiados de quatro em quatro dias até o dia 28.



**Figura 5.** Resistência a compressão das pelotas auto-redutoras de cromita (P1, P2, P3, P4, P5 e P6), aglomeradas com 0, 0,25, 0,5, 0,75 e 1% de bentonita, respectivamente e 1% de bentonita com 0,2% de CMC.



**Figura 6.** Ensaios de compressão das pelotas auto-redutoras de cromita (P7, P8, P9, P10, P11 e P12), aglomeradas com 0, 0,25, 0,5, 0,75 e 1% de bentonita más 12% de cal hidratada, respectivamente e 2% de melação com 8% de cal hidratada.



**Figura 7.** Ensaios de compressão das pelotas auto-redutoras de cromita (P13, P14 e P15), aglomeradas com 1, 2 e 4% de silicato de sódio.

A Figura 5 mostra a resistência das pelotas com adições de bentonita (0 - 1%) não apresentando grande diferença quanto a resistência, estas ficaram na faixa de 1-2 kg-f/pelota, já as pelotas com adições de 1% de bentonita e 0,2% de CMC atingiu resistência na faixa de 3-4 kg-f/pelota, provavelmente devido a um aumento da viscosidade da mistura, aumentando a sua resistência a compressão.

A Figura 6 mostra a resistência das pelotas com adições de bentonita (0 até 1%) mais adições de 12% de cal hidratada nas pelotas auto-redutoras P7, P8, P9, P10 e P11, apresentando um aumento de resistência com o decorrer do tempo, atingindo uma resistência de 2,6 kg-f/pelota na pelota 11 (1% de bentonita, 12% de cal hidratada) no dia 20. Comparando-se a pelota P12 (2% de melação e 8% de cal hidratada) com as outras (P7, P8, P9, P10 e P11) esta tem uma resistência à compressão de 5,5 kg-f/pelota no dia 28. Acontece isso porque a adição de cal

hidratada provavelmente reage com o meio ambiente formando um carbonato e o melão é um aglomerante bastante viscoso conferindo maior resistência à compressão.

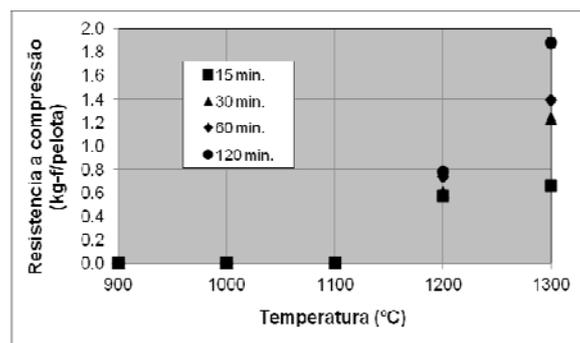
A Figura 7 apresenta o ensaio de compressão nas pelotas auto-redutoras de cromita P13, P14 e P15 com adições de 1, 2 e 4% de silicato de sódio, respectivamente, observando-se um decréscimo na resistência a compressão nas três pelotas estudadas com o decorrer dos dias e obtendo-se uma maior resistência a frio na pelota com adição de 4% de silicato de sódio após 24 horas de serem fabricadas.

Acontece isso provavelmente porque o silicato de sódio por ser um material bastante higroscópico, absorve a umidade do ar, prejudicando a sua resistência a compressão. Diante deste fato é melhor manter secas as pelotas e guardar a vácuo num dessecador antes e após de realizados os demais ensaios.

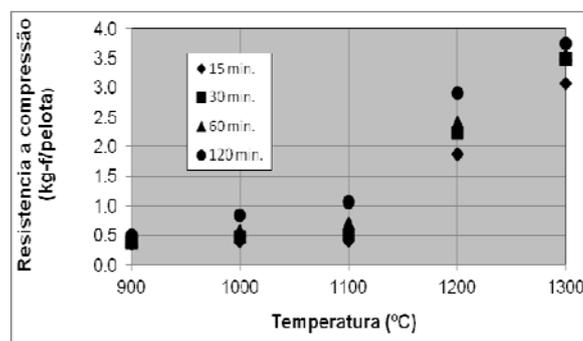
### 3.3 Ensaios de Comportamento Mecânico a Altas Temperaturas

#### 3.3.1 Influencia da temperatura

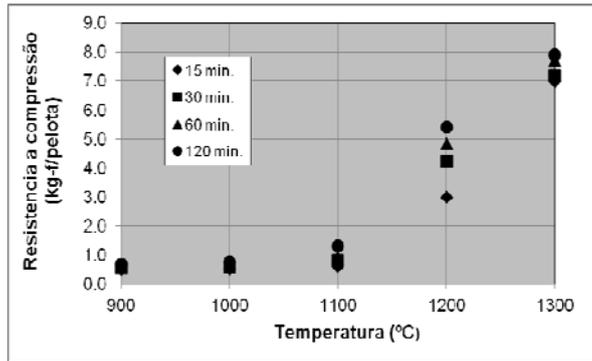
As Figuras 8 a 22, mostra à resistência a compressão das pelotas auto-redutoras P1- P15 após tratamento térmico, tendo-se um melhor resultado na pelota P15 com adições de 4% de silicato de sódio a 1173K (900°C) e 1273K (1000°C) com 15 e 15,5 kg-f/pelota respectivamente (Figura 22), com duas horas de ensaio.



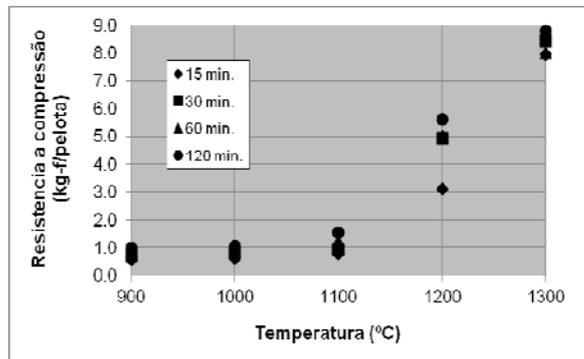
**Figura 8.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P1, 0% de bentonita) a diferentes temperaturas.



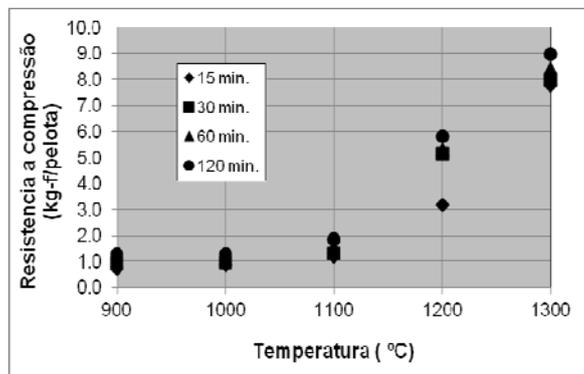
**Figura 9.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P2, 0,25% de bentonita) a diferentes temperaturas.



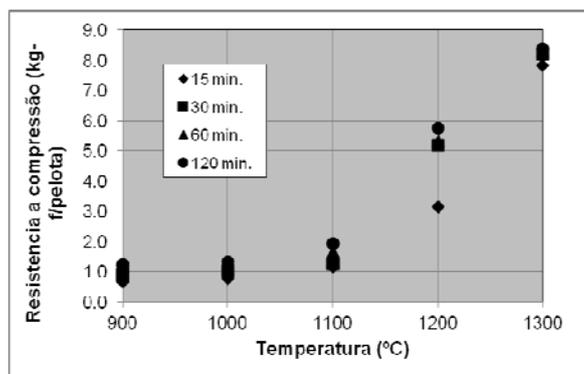
**Figura 10.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P3, 0,5% de bentonita) a diferentes temperaturas.



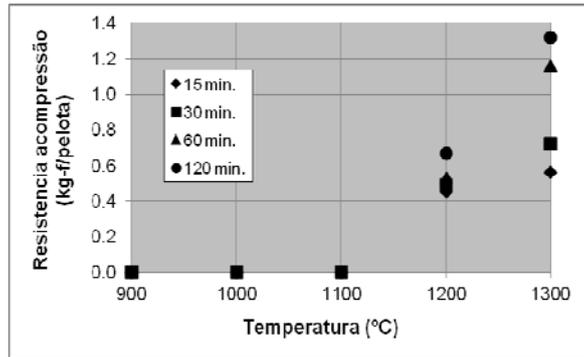
**Figura 11.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P4, 0,75% de bentonita) a diferentes temperaturas.



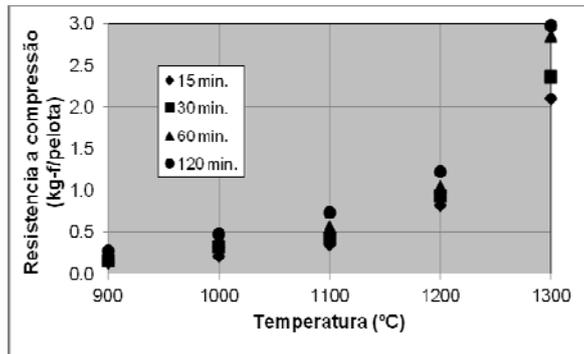
**Figura 12.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P5, 1% de bentonita) a diferentes temperaturas.



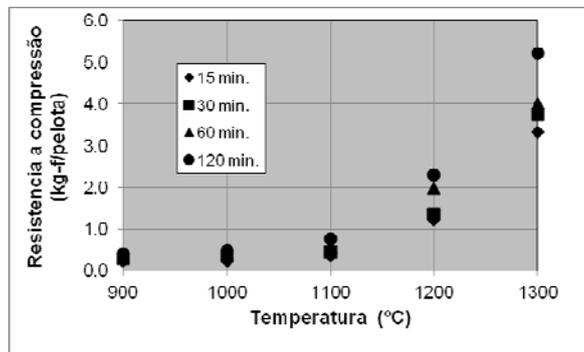
**Figura 13.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P6, 1% de bentonita e 0,2% de Carboxi-Metil Celulose) a diferentes temperaturas.



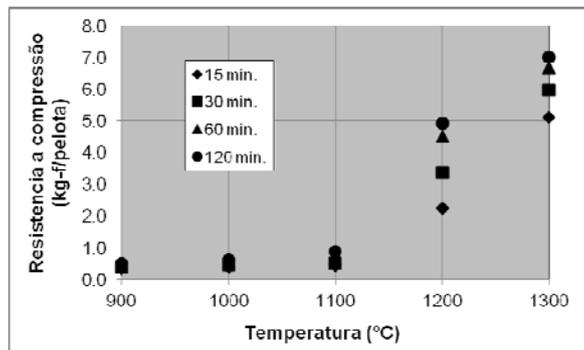
**Figura 14.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P7, 0% de bentonita e 12% de cal virgem hidratada) a diferentes temperaturas.



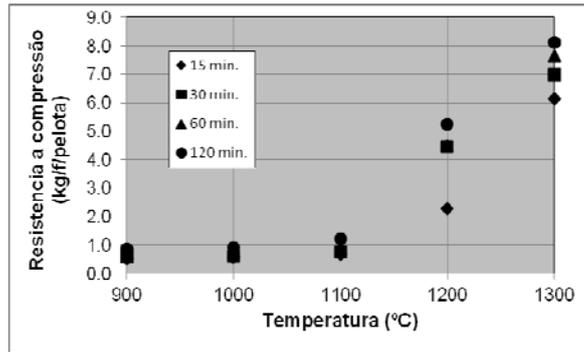
**Figura 15.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P8, 0,25% de bentonita e 12% de cal virgem hidratada) a diferentes temperaturas.



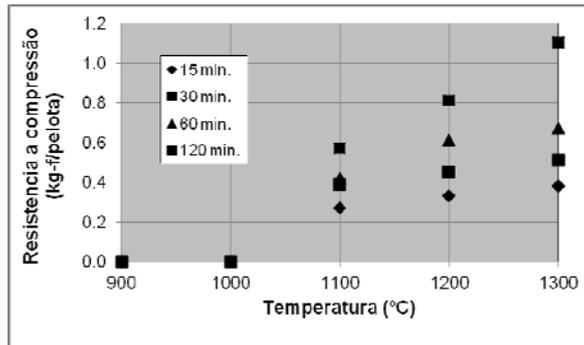
**Figura 16.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P9, 0,5% de bentonita e 12% de cal virgem hidratada) a diferentes temperaturas.



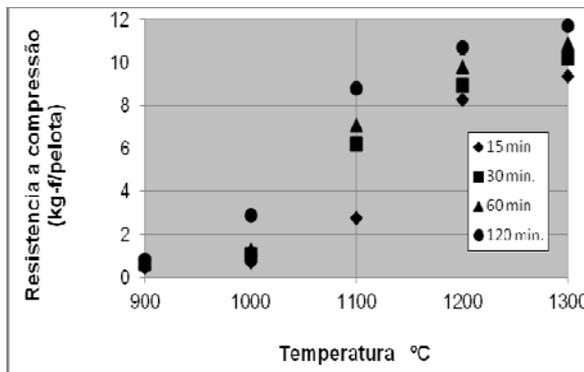
**Figura 17.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P10, 0,75% de bentonita e 12% de cal virgem hidratada) a diferentes temperaturas.



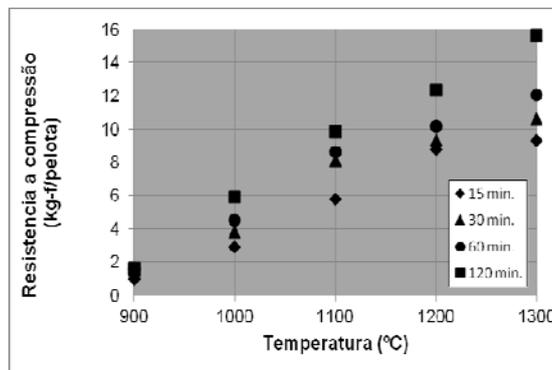
**Figura 18.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P11, 1% de bentonita e 12% de cal virgem hidratada) a diferentes temperaturas.



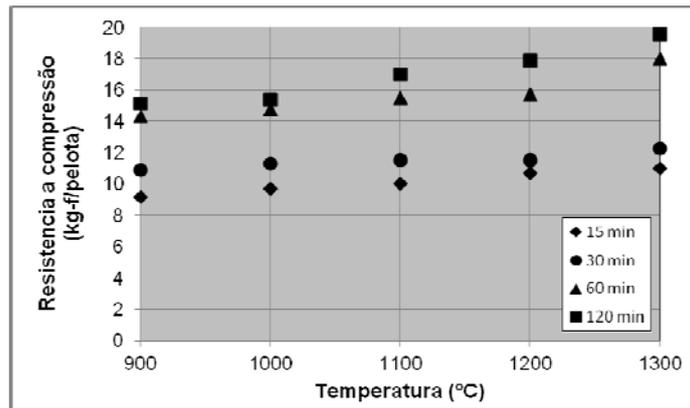
**Figura 19.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P12, 2% de melaço e 8% de cal virgem hidratada) a diferentes temperaturas.



**Figura 20.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P13, 1% de silicato de sódio) a diferentes temperaturas.



**Figura 21.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P14, 2% de silicato de sódio) a diferentes temperaturas.

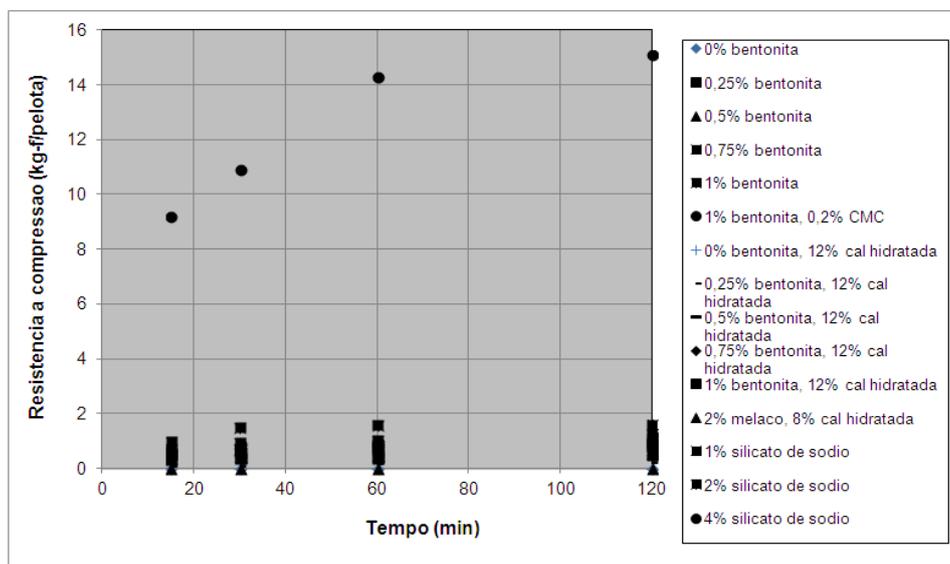


**Figura 22.** Resistência a compressão da pelota auto-redutora (P15, 4% de silicato de sódio) a diferentes temperaturas.

Acontece isso porque o silicato de sódio perde água na sua composição, por ser submetida a tratamento térmico 1173 – 1573K (900-1300°C), formando-se nessas temperaturas a fase fundida ( $\text{SiO}_2$ ), que aglomera os finos da composição da pelota, conferindo-lhe maior resistência à compressão.

### 3.3.2 Influência do aglomerante

As Figuras 23 a 27 mostra à resistência a compressão das pelotas auto-redutoras P1- P15, nas temperaturas de 1173, 1273, 1373, 1473 e 1573K, observando a influência do aglomerante. A Figura 23 mostra que a pelota P15 atinge uma resistência a compressão de 15 kg-f/pelota em duas horas a 1173K.



**Figura 23.** Resistência a compressão das pelotas (P1- P15) na temperatura de 1173K.

Mesmo comportamento pode-se verificar nas temperaturas de 1273, 1373, 1473 e 1573K das pelotas auto-redutoras P1 - P15, atingindo-se resistência a compressão de 15,5, 17, 17,5 e 19 kg-f/pelota respectivamente da composição da pelota P15, como mostrado nas Figuras 24 a 27.

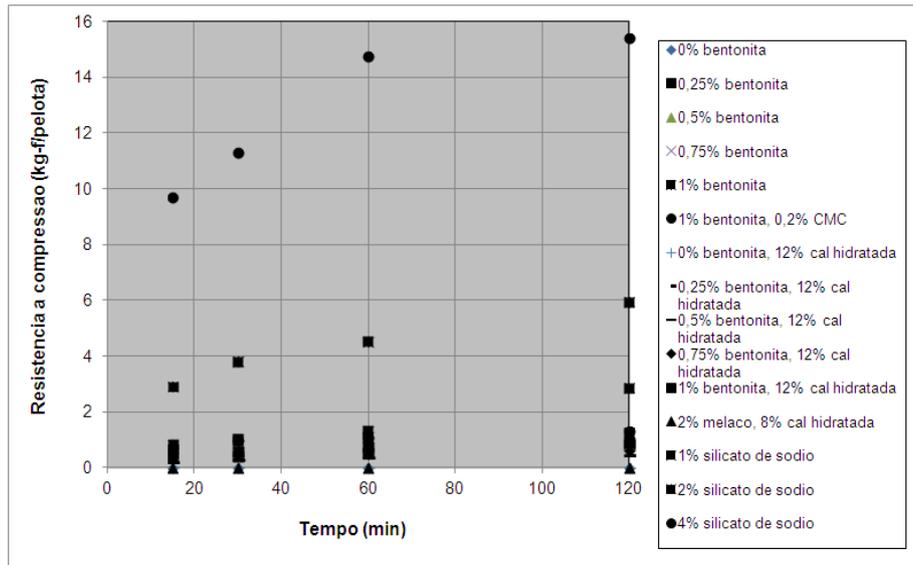


Figura 24. Resistencia a compressão das pelotas (P1 - P15) na temperatura de 1273K.

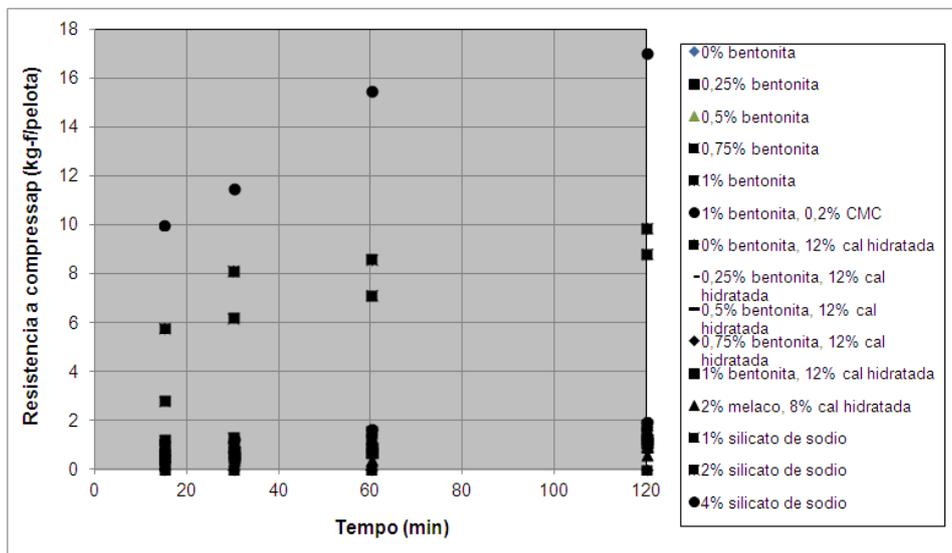


Figura 25. Resistencia a compressão das pelotas (P1 - P15) na temperatura de 1373K.

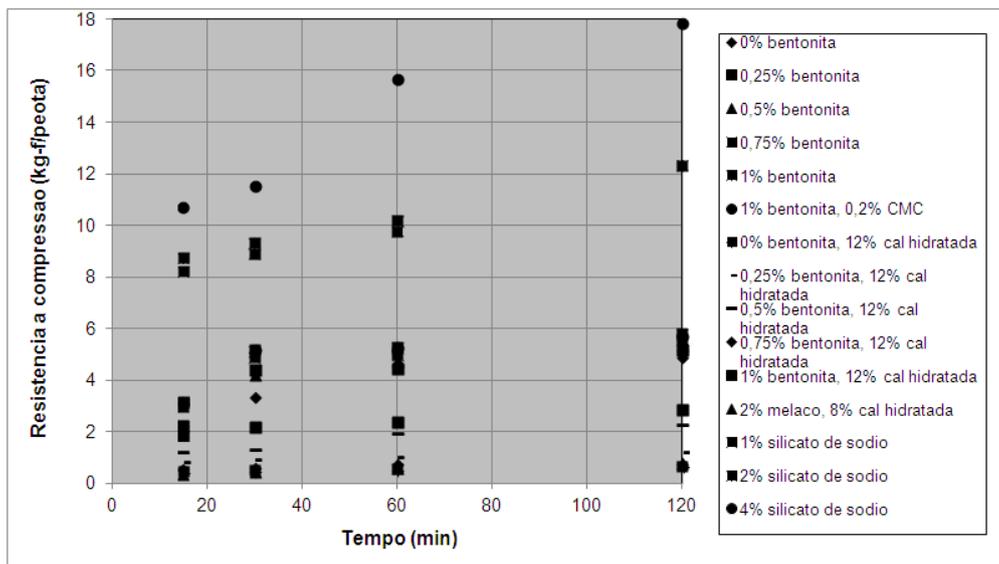
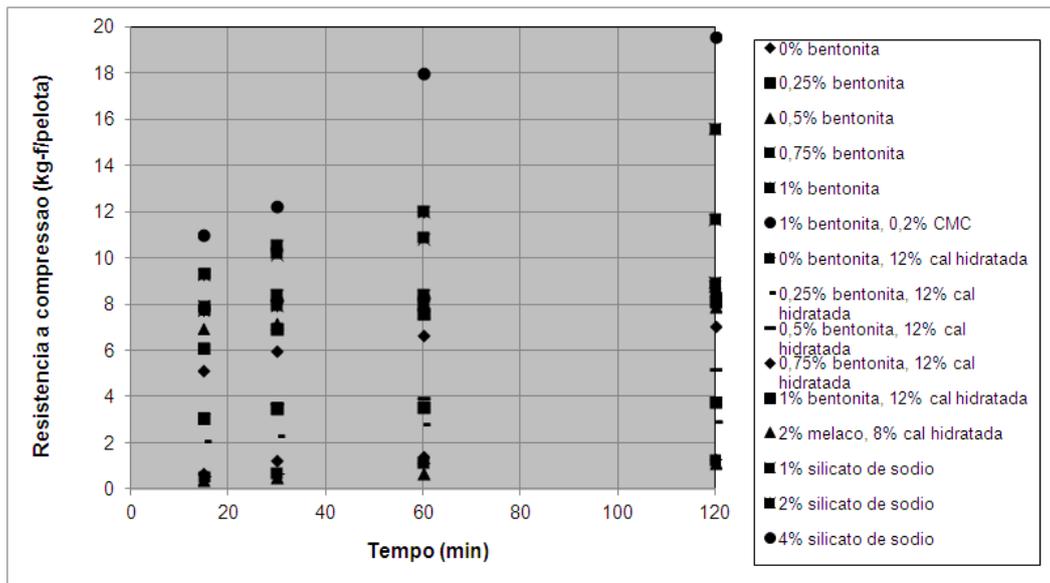


Figura 26. Resistencia a compressão das pelotas (P1 - P15) na temperatura de 1473K.



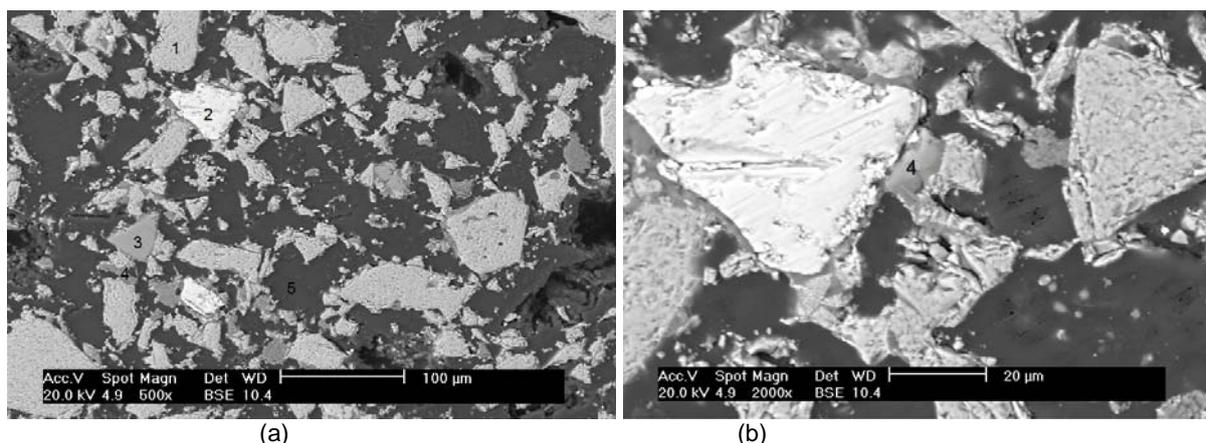
**Figura 27.** Resistência a compressão das pelotas (P1 - P15) na temperatura de 1573K.

A pelota auto-redutora com 4% de silicato de sódio (P15) deu o melhor resultado nas resistências à compressão a frio e a quente obtendo-se 15 kg-f/pelota a 1173K (900°C).

### 3.4 Análises das Micrografias

Tendo-se os melhores resultados com as pelotas P14 e P15 procedeu-se a uma análise micro-estrutural das pelotas feitas por EDS, para verificar o fato da melhora, da sua resistência mecânica a quente.

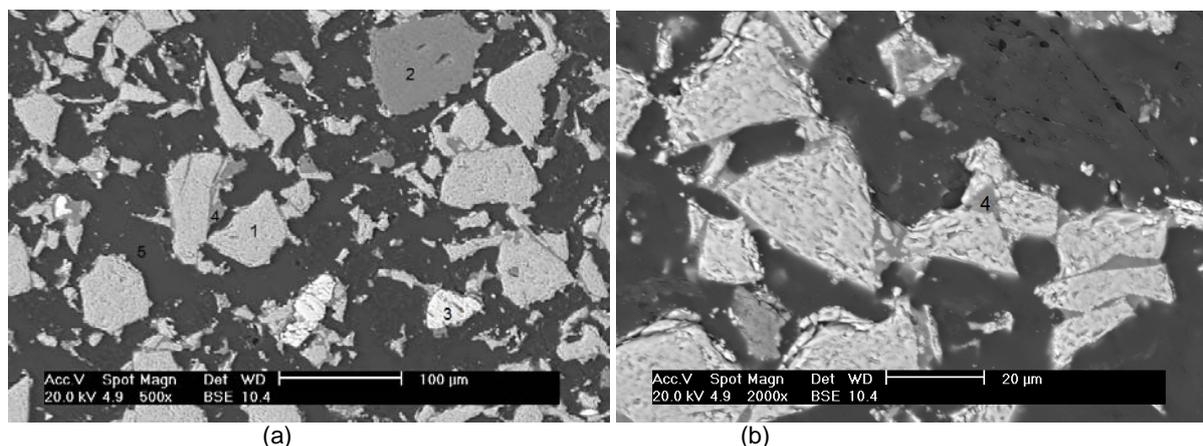
As Figuras 28 e 29 apresentam a parte central das pelotas após os ensaios a 1573K, durante 120 minutos. Pode-se observar que a composição de fases é similar (Tabelas 3 e 4) com formação de uma fase incipiente de escória formado basicamente por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) dissolvendo as partículas de cromita (indicação 1, Figuras 28a e 29a) formando um silicato com óxidos de alumínio, magnésio, cromo e ferro (indicação 4, Figuras 28b e 29b).



**Figura 28.** Elétrons retroespalhados da pelota P14 (2% silicato de sódio), após 1573K, 120 min. (a) 500X, (b) 2000X

**Tabela 3.** Composição química do centro da pelota P14, analisada por EDS no MEV. Temperatura de 1573K (120 minutos), Figura 28

% massa	O	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Fe
1	12,26	11,73	15,25	0,73	0,29	41,78	17,95
2	18,92	5,29	12,36	0,42	0,27	40,93	21,82
3	27,06	23,38	1,47	42,21	0,39	1,24	4,25
4	20,29	0,52	15,99	60,57	1,41	0,77	0,45
5	Resina de embutimento						



**Figura 29.** Elétrons retroespalhados da pelota P15 (4% silicato de sódio), após 1573K, 120 min. (a) 500X, (b) 2000X.

**Tabela 4.** Composição química do centro da pelota P15, analisada por EDS no MEV. Temperatura de 1573K (120 minutos), Figura 29

% massa	O	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Fe
1	14,62	16,66	15,57	0,27	0,31	41,40	11,16
2	26,40	26,98	1,22	40,08	0,20	1,49	3,63
3	14,40	13,98	14,22	0,08	0,20	41,49	15,63
4	20,26	23,10	3,33	43,14	2,51	2,09	5,58
5	Resina de embutimento						

Observando as micrografias atinge-se uma resistência a quente das pelotas P14 e P15 de forma razoável de 16 e 20 kg-f/pelota a 1573K respectivamente, pela formação incipiente de escória exclusivamente pela presença do aglomerante (silicato de sódio), já que para uma boa sinterização, as pelotas auto-redutoras de cromita precisariam ser submetidas mínimo a 1773K. Porém é mais conveniente reduzir nesta temperatura (1773K) e logo fazer fusão para a separação do metal/escória.

### 3.4.1 Ensaios de crepitação

As pelotas P1-P15, foram ensaiadas nas temperaturas de 1173, 1273, 1373, 1473, 1573K, durante 5 minutos obtendo-se como resultados um índice de crepitação (IC) igual à zero, conferindo que as pelotas auto-redutoras não apresentam crepitação nas temperaturas de ensaio.

### 3.4.2 Ensaios a quedas repetidas

As pelotas P1-P15 passaram por ensaios a quedas repetidas, obtendo-se melhores resultados de queda (uma média de 5,1), nas pelotas P15 com aglomerante de 4% de silicato de sódio, após de serem secadas.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as experiências realizadas permitem concluir que:

- o melhor resultado de resistência a compressão da pelota seca foram proporcionado por pelotas com 4% de silicato de sódio (5 kg-f/pelota);
- o melhor resultado de resistência a compressão a frio ao 28º dia foi proporcionado pelas pelotas P12, com 2% melaço e 8% de cal hidratada (5,5 kg-f/pelota);
- o melhor resultado de resistência a compressão a quente, foi proporcionado pelas pelotas P15 (4% de silicato de sódio), com 15 e 20 kg-f/pelota para as temperaturas de 1173 e 1573K respectivamente;
- as pelotas P1-P15 após secas, não apresentam crepitação nas temperaturas de 1173, 1273, 1373, 1473 e 1573K;
- os análises por EDS mostra, que as pelotas P14 e P15 tem formação incipiente de fase escoria ( $\text{SiO}_2$ ), conferindo este, uma maior resistência a compressão;
- o melhor resultado do ensaio a quedas repetidas foi proporcionado pelas pelotas P15 com 4% de silicato de sódio, resistindo em media 5 vezes; e
- os resultados indicam que a pelota P15, poderia ser utilizada, como material de carga do forno elétrico de redução.

## Agradecimentos

À Fapesp (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Pontificia Universidad Católica del Peru, pelo apoio financeiro para a apresentação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 MANTOVANI, M. C. Comportamento a frio e a quente de pelotas auto-redutoras de residuo de aciaria elétrica. 1998. 165p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politecnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- 2 MARCHEZE, E, S. Resistencia mecanica a frio e crepitação em pelotas auto-redutoras. 1994. 72p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politecnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- 3 ZAMBRANO, A. P.; TAKANO, C.; NOGUEIRA, A. E. A. MOURÃO, M. B.; TAGUSAGAWA, S. Y. The reduction of self-reducing chromite pellets at 1773K intrapellet gradients. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. v. 13, n. 1, p. 330-339, 2012.
- 4 ZAMBRANO, A. P.; TAKANO, C.; MOURÃO, M. B.; TAGUSAGAWA, S. Y. IGUCHI, Y. High Carbon Ferro-Chromium by Self-Reducing Process: Effects of Fe-Si and fluxing agent additions. ISIJ International. v. 51, n. 8, p. 1296-1300, 2011.
- 5 ZAMBRANO, A. P.; TAKANO, C.; MOURÃO, M. B.; NOGUEIRA, A. E. A. High Carbon Ferro-Chromium by Self-Reducing Process: Fundamentals. Songklanakarin Journal of Science and Technology Research and Development. v. 31, p. 433-439, 2009.
- 6 ZAMBRANO, A. P.; TAKANO, C.; MOURÃO, M. B.; TAGUSAGAWA, S. Y. High Carbon Ferro-Chromium by Self-Reducing Process. Journal of Iron and Steel Research International. v. 16, p. 1342-1346, 2009.
- 7 ZAMBRANO, A. P.; TAKANO, C.; NOGUEIRA, A. E. A.; MOURÃO, M.B.; IGUCHI, Y. Chromites Reduction Reaction Mechanism in Carbon-Chromites Composite Agglomerates at 1173K. ISIJ International, v. 47, p. 1585-1589, 2007.