



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Trabalho de Formatura

**INFLUÊNCIA DO AGLOMERANTE
NA CURA DE PELOTAS AUTO-
REDUTORAS:**

ASPECTOS MICROESTRUTURAIS

Autor : Harisson Mattos Ferraz

Orientador: Prof. Dr. Cyro Takano

Dezembro de 1999



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Trabalho de Formatura

**INFLUÊNCIA DO AGLOMERANTE
NA CURA DE PELOTAS AUTO-
REDUTORAS :**

ASPECTOS MICROESTRUTURAIS

Autor : Harisson Mattos Ferraz

Orientador: Prof. Dr. Cyro Takano

Dezembro de 1999

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Cyro Takano, pela orientação, constante incentivo e pelo seu exemplo.

À FINEP / PADCT III, que financiou o projeto e pela bolsa de iniciação científica através do Projeto nº3244 , "Reciclagem de resíduos sólidos siderúrgicos".

Aos meus pais, Benício Lemes Ferraz e Maria José Matos Ferraz, pelo amor, confiança que sempre tiveram em mim e pelo exemplo.

Aos professores e funcionários deste Departamento, de quem sempre obtive incentivo e respeito e pela dedicação.

Aos meus colegas de turma pela amizade e por tudo que aprendi com vocês.

À Deus por esta oportunidade e pela força para enfrentar os momentos difíceis.

RESUMO EXECUTIVO

A auto-redução é um processo emergente de produção de ferro gusa, de tecnologia nacional. O processo se baseia no aproveitamento de finos de minério de ferro e de carvão mineral ou vegetal. Estes finos são aglomerados em pelotas auto-redutoras, que podem ser reduzidas como parte da carga em fornos elétricos ou de cubilô ou como 100% da carga no processo TECNORED. Neste último foi desenvolvido o forno de auto-redução.

As vantagens de redução em pelotas auto-redutoras são o tempo de redução, bem inferior ao do alto-forno, o aproveitamento de finos que não podem ser sinterizados e a utilização de matérias primas menos nobres como carvão não coqueificável.

Uma característica importante para as pelotas auto-redutoras é a sua resistência mecânica, para que a pelota possa ser manuseada e suporte a carga dentro de um forno, durante a redução. Para o aumento da resistência mecânica das pelotas são adicionados aglomerantes.

Este trabalho tem por objetivo o estudo de como a adição do aglomerante influencia na resistência mecânica das pelotas auto-redutoras. Para tanto foram usadas a análise da resistência à compressão a frio e a observação no microscópio eletrônico de varredura.

Observou-se que o aumento do teor de aglomerante aumentou a resistência mecânica das pelotas. Porém, a intensidade de aumento conferida pelo aglomerante foi maior na faixa de 6,0 a 8,0 % , que entre outros teores. As pelotas com teores de aglomerante até 6,0% possuíam resistências muito baixas, até cerca de 200N / pelota. Com teores acima de 8,0%, a resistência foi acima de 500N / pelota. As pelotas com teores crescentes de aglomerante entre 6,0 e 8,0 % possuíam um grande aumento da resistência mecânica.

Observou-se a microestrutura das pelotas, pois sabe-se que a microestrutura do material influencia em suas propriedades, como a resistência mecânica. As microestruturas das pelotas com pouco teor de aglomerante e as pelotas com maior teor de aglomerante apresentaram morfologias diferentes.

As pelotas com teores de 2,0 e 4,0% apresentaram baixa resistência mecânica, devido à falta de aglomerante que cobrisse a superfície das partículas. Estas pelotas apresentaram morfologias aciculares, semelhantes à *estringita*.

Já as pelotas com teores de aglomerante acima de 6,5% apresentaram uma presença cada vez maior da formação do gel de silicato de cálcio hidratado. Um maior teor de cimento ocasionou em uma maior cobertura das partículas e conseqüentemente uma maior resistência das pelotas. No gel de silicato de cálcio hidratado, presente nas pelotas, os silicatos estão presentes em uma morfologia bem fina e entrelaçada, que cobrem eficientemente as partículas.

Desta forma, pôde-se relacionar o aumento do teor de aglomerante com o aumento da resistência mecânica das pelotas auto-redutoras. Observou-se também, que este efeito ocorreu com uma mudança de morfologia dos silicatos hidratados de cálcio.

Conclue-se para as condições estudadas que obtém-se maiores benefícios com adições de cimento Portland ARI a teores entre 6 a 8 % na mistura a pelletizar.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1 – INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 – OBJETIVOS | 3 |
| 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1 – PRINCÍPIOS DE REDUÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO..... | 4 |
| 3.2 – O CIMENTO PORTLAND | 5 |
| 3.2.1 – Composição do Cimento Portland | 5 |
| 3.2.2 – Microestrutura do Cimento Portland | 7 |
| 3.3 – PRINCÍPIOS DE PELOTIZAÇÃO | 9 |
| 3.4 – INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGLOMERANTE EM PELOTAS AUTO-REDUTORAS..... | 12 |
| 3.5 – INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DO AGLOMERANTE NA RESISTÊNCIA DE PELOTAS AUTO-REDUTORAS..... | 13 |
| 4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 14 |
| 4.1 – MATERIAIS UTILIZADOS | 14 |
| 4.1.1 – Minério de Ferro | 15 |
| 4.1.2 – Carvão Mineral Antracitoso | 15 |
| 4.1.3 – Cimento Portland ARI..... | 16 |
| 4.2 – COMPOSIÇÃO DAS PELOTAS AUTO-REDUTORAS | 16 |
| 4.3 – MISTURA DOS MATERIAIS..... | 17 |
| 4.4 – O PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO..... | 18 |
| 4.5 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PELOTAS AUTO- REDUTORAS | 19 |
| 4.6 – MICROGRAFIAS DAS PELOTAS AUTO-REDUTORAS..... | 20 |
| 5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1 – ENSAIO MECÂNICO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A FRIO | 22 |
| 5.2 – MICROGRAFIAS DAS PELOTAS AUTO-REDUTORAS | 25 |
| 5.2.1 – Pelotas auto-redutoras com 2,0% de cimento Portland ARI | 25 |
| 5.2.2 – Pelotas auto-redutoras com 4,0% de cimento Portland ARI | 26 |
| 5.2.3 – Pelotas auto-redutoras 6% cimento Portland ARI | 28 |
| 5.2.4 – Pelotas auto-redutoras 6,5% cimento Portland ARI | 29 |
| 5.2.5 – Pelotas auto-redutoras com 7,0% de cimento Portland ARI | 31 |
| 5.2.6 – Pelotas auto-redutoras 7,5% cimento Portland ARI | 32 |
| 5.2.7 – Pelotas auto-redutoras 8,0% cimento Portland ARI | 33 |
| 5.2.8 – Pelotas auto-redutoras 10% cimento Portland ARI | 34 |
| 6 – CONCLUSÕES..... | 37 |
| 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Forno de auto-redução (FAR) ^[1] | 1 |
| Figura 2: Composição aproximada dos óxidos do cimento ^[5] | 7 |
| Figura 3: Micrografia de cristais hexagonais de monossulfato hidratado e cristais aciculares de estringita formados por soluções de aluminato e sulfato de cálcio ^[4] | 9 |
| Figura 4: Tambor rolante ^[6] | 10 |
| Figura 5: Disco Pelotizador ^[6] | 10 |
| Figura 6: Formação de núcleos ^[6] | 11 |
| Figura 7: Formação de núcleos ^[6] | 12 |
| Figura 8: Resistência à compressão a frio em função do teor de cimento para pelotas de minério de ferro e carvão mineral, após 30 dias ^[7] | 13 |
| Figura 9: Misturador de alta intensidade : www.eirich.de | 18 |
| Figura 10: Movimentação em um misturador de alta intensidade: www.eirich.de | 18 |
| Figura 11: Disco Pelotizador utilizado ^[8] | 19 |
| Figura 12: Máquina de resistência universal DIETERT ^[9] | 20 |
| Figura 13: Gráfico da resistência à compressão a frio de pelotas auto-redutoras em função do número de dias de cura para vários teores de aglomerante (cimento Portland ARI) | 23 |
| Figura 14: Gráfico da resistência à compressão de pelotas auto-redutoras em função do teor de aglomerante para vários períodos de cura. | 24 |
| Figura 15: Micrografia de uma pelota com 2,0% de teor de cimento. Aumento de 5000x. A micro mostra uma pequena quantidade de uma morfologia longa e grande. | 26 |
| Figura 16: Micrografia de uma pelota com 2,0% de teor de ARI. Aumento de 10000x. Este aumento possibilita uma melhor visualização da formação dos produtos de hidratação longos. | 26 |
| Figura 17: Micrografia de uma pelota com 4,0% de teor de cimento ARI. Aumento de 5000x. Formação de grande quantidade de produtos longos. | 27 |
| Figura 18: Micrografia de uma pelota com 4,0% de cimento ARI. Aumento de 10000x. Formação de produtos longos. | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 19: Micrografia de uma pelota de 6% de cimento ARI. Aumento de 5000x. | 29 |
| Figura 20: Micrografia de uma pelota de 6% de cimento ARI. Aumento de 10000x. | 29 |
| Figura 21: Micrografia de uma pelota com 6,5% de teor de cimento ARI. Aumento de 5000x. | 30 |
| Figura 22: Micrografia de uma pelota com 6,5% de teor de cimento ARI. Aumento de 10000x. | 30 |
| Figura 23: Micrografia de uma pelota com 7,0% de teor de cimento ARI. Aumento de 5000x. | 31 |
| Figura 24: Micrografia de uma pelota com 7,0% de teor de cimento ARI. Aumento de 10000x. | 31 |
| Figura 25: Micrografia de uma pelota com 7,5% de teor de cimento ARI. Aumento de 5000x. | 32 |
| Figura 26: Micrografia de uma pelota com 7,5% de teor de cimento ARI. Aumento de 10000x. | 33 |
| Figura 27: Micrografia de uma pelota com 8,0% de teor de cimento ARI. Aumento de 5000x. | 34 |
| Figura 28: Micrografia de uma pelota com 8,0% de teor de cimento ARI. Aumento de 10000x. | 34 |
| Figura 29: Micrografia de uma pelota com 10,0% de teor de cimento ARI. Aumento de 5000x. | 35 |
| Figura 30: Micrografia de uma pelota com 10,0% de teor de cimento ARI. Aumento de 10000x. | 36 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Compostos dos cimentos Portland ^[4] | 5 |
| Tabela 2: Compostos dos cimentos Portland comum ^[4] | 6 |
| Tabela 3: Composição das matérias primas na produção das pelotas ^[8] | 14 |
| Tabela 4: Granulometria das matérias primas na produção das pelotas | 15 |
| Tabela 5: Composição das Pelotas, porcentagem em peso (base seca). | 17 |
| Tabela 6: Composição das Pelotas, porcentagem em peso (base úmida). | 17 |

1 – INTRODUÇÃO

O Estudo de pelotas auto-redutoras teve início na década de 60, com trabalhos realizados pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo e pela Universidade de Michigan.

No início da década de 80, iniciou-se o desenvolvimento do processo TECNORED, processo no qual a redução de pelotas ocorre no forno de auto-redução (FAR). Este forno, com cerca de 2 a 3 m de altura, permitiu a utilização de pelotas com menor resistência a compressão.

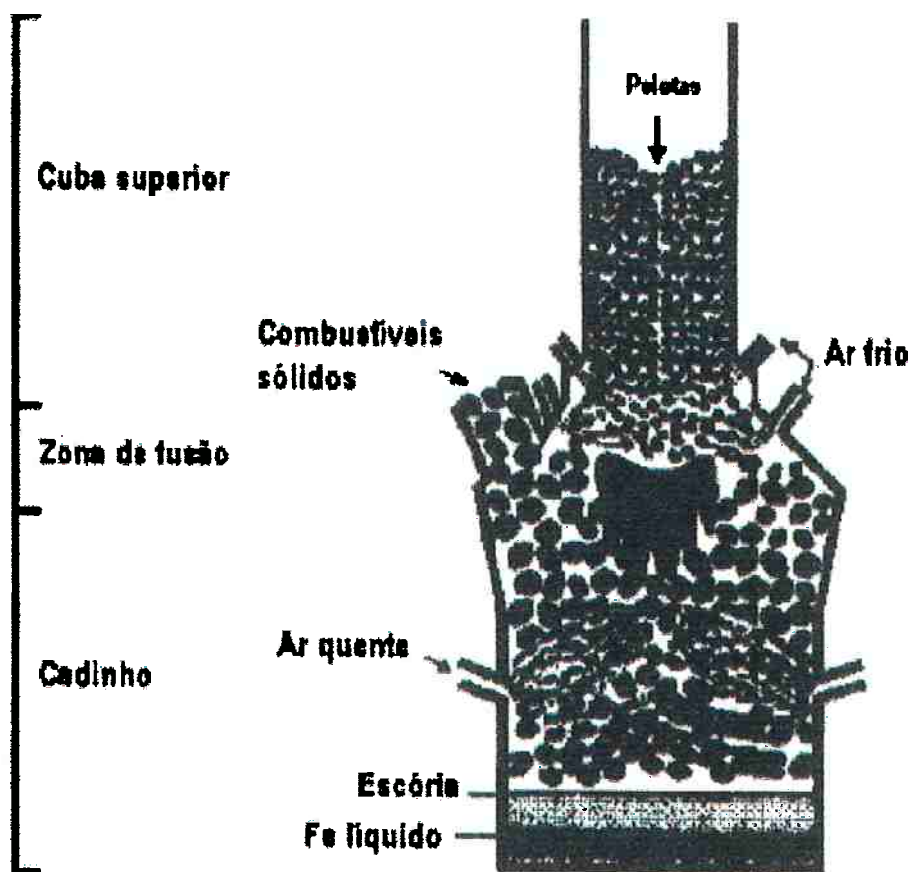


Figura 1: Forno de auto-redução (FAR) ^[1]

Segundo TAKANO e BENEDUCE NETO ^[1] e CONTRUCCI ^[2] vários foram os fatores que influenciaram o desenvolvimento da tecnologia de redução através de pelotas auto-redutoras e o então processo TECNORED.

O alto preço do minério de ferro em granulometria adequada para a sinterização e a abundância em finos de minério não sinterizáveis viabiliza um aproveitamento destes finos. Isto pode ser feito através do processo de pelletização que aproveita resíduos provenientes de processos metalúrgicos como a sinterização e aciaria, favorecendo a captação da poeira gerada nestes processos. O minério utilizado também pode ter baixos teores de ferro, de 60 a 64% de ferro.

No processo convencional de redução, via alto-forno, é necessária a utilização de carvão mineral na forma de coque. O carvão mineral coqueável tem um alto valor comercial e a sua má distribuição torna alguns países insuficientes neste recurso. Os finos de carvão mineral ou vegetal, que podem ser usados no processo TECNORED, possuem baixo custo. Do ponto de vista ecológico, a utilização de finos é bastante adequada, porque elimina uma etapa extremamente poluente da redução via alto-forno, a coqueificação. Economicamente, elimina-se uma etapa no processo de redução do ferro.

Como aglomerantes, pode-se utilizar matérias primas mais baratas como a cal hidratada e escória.

No processo TECNORED, a cura ocorre em pátios abertos ao ar livre e a pelota verde já possui resistência suficiente para o seu manuseio. Somada a não obrigatoriedade de se utilizar granulometrias muito pequenas de finos fazem com que a pelletização possua um baixo custo.

2 – OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o estudo da influência do aglomerante na cura de pelotas auto-redutoras. O aglomerante utilizado é o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (cimento Portland ARI) e as pelotas auto-redutoras são constituídas de finos de minério de ferro e de carvão mineral.

O aspecto analisado durante a cura é o aumento da resistência mecânica da pelota, de acordo com o tempo de cura e o teor de aglomerante. Serão utilizadas no estudo, a medida da resistência à compressão e a análise microestrutural das pelotas.

A resistência mecânica das pelotas auto-redutoras será analisada através da resistência à compressão a frio, medida em uma máquina de compressão de areia.

A análise microestrutural visa o conhecimento de como as partículas constituintes das pelotas estão aglomeradas, e isto poderá ser uma importante ferramenta para que se produzam pelotas mais resistentes e que possuam um menor teor de aglomerante. Esta análise é feita no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

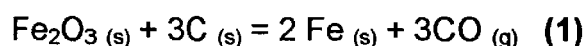
Sabe-se que a microestrutura dos aglomerantes e a forma de como ocorreu sua hidratação influenciará em sua resistência. Esta relação já foi estudada anteriormente, em outros trabalhos, tanto em concretos como no caso específico das pelotas auto-redutoras. Este trabalho objetiva o estudo da microestrutura do aglomerante em pelotas auto-redutoras e a sua relação com a resistência das mesmas.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

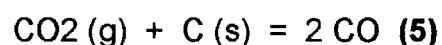
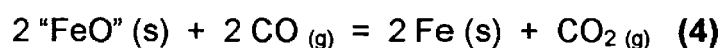
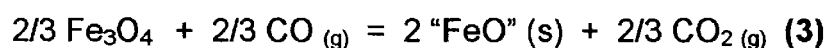
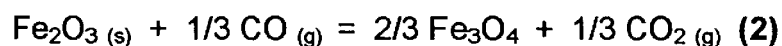
3.1 – PRINCÍPIOS DE REDUÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO

O óxido de minério de ferro, geralmente, é reduzido a partir de carbono sólido. Esta reação ocorre, se o óxido for aquecido acima da temperatura mínima fornecida pela termodinâmica do processo. Essa reação poderia ocorrer através de dois mecanismos, segundo MOURÃO [3]. O primeiro seria através de uma reação sólido-sólido, como na reação (1). O segundo mecanismo, através de reações gás-sólido simultâneas, como mostrado nas reações (2 a 5). Segundo estudado por Baldwin, o mecanismo 2 é muito mais atuante que o primeiro mecanismo.

Mecanismo 1:



Mecanismo 2:



No processo de auto-redução há duas particularidades importantes. O processo de auto-redução pode ocorrer por redução direta, isto é, sem que haja a fusão do minério de ferro. Neste tipo de processo obtém-se como produto o ferro-esponja. Também pode-se ressaltar a maior velocidade com que a redução ocorre. Esta é uma consequência de um maior contato entre o minério de ferro e o redutor.

3.2 – O CIMENTO PORTLAND

3.2.1 – Composição do Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico que consiste basicamente de compostos de cálcio. Este cimento é produzido pela moagem do clínquer, que consiste basicamente de silicatos de cálcio e sulfatos de cálcio, como um produto de adição. A composição dos cimentos Portland, normalmente é expressa em função dos compostos de cálcio, formados por óxidos de cálcio e outros elementos. Isto, porque as análises de composição são fornecidas em função de óxidos, mais fácil de se obter que uma análise direta dos elementos presentes em uma amostra.

É comum o emprego de abreviações na composição dos cimentos. Na Tabela 1, temos os óxidos constituintes do cimento e na Tabela 2, os compostos formados do cimento.

Tabela 1: Compostos dos cimentos Portland ^[4]

| Óxidos | Abreviação |
|--------------------------------|------------|
| CaO | C |
| SiO ₂ | S |
| Al ₂ O ₃ | A |
| Fe ₂ O ₃ | F |
| MgO | M |
| SO ₃ | <u>S</u> |
| H ₂ O | H |

Tabela 2: Compostos dos cimentos Portland comum ^[4]

| Composto | Abreviação | Nome |
|---|--|---------------------------------|
| $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ | C_3S | Silicato tricálcico |
| $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ | C_2S | Silicato dicálcico |
| $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ | C_3A | Aluminato cálcico |
| $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF | Ferro aluminato tetracálcico |
| $4\text{CaO}.3\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_3$ | $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ | Silicato aluminato tetracálcico |
| $3\text{CaO}.2\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$ | $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_4$ | Silicato tricálcico hidratado |
| $\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$ | $\text{C}\underline{\text{S}}\text{H}_2$ | Silicoso cálcico hidratado |

Os componentes básicos do cimento, são o óxido de cálcio (CaO), o óxido de silício (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3) . As composições aproximadas dos cimentos são apresentadas na Figura 1.

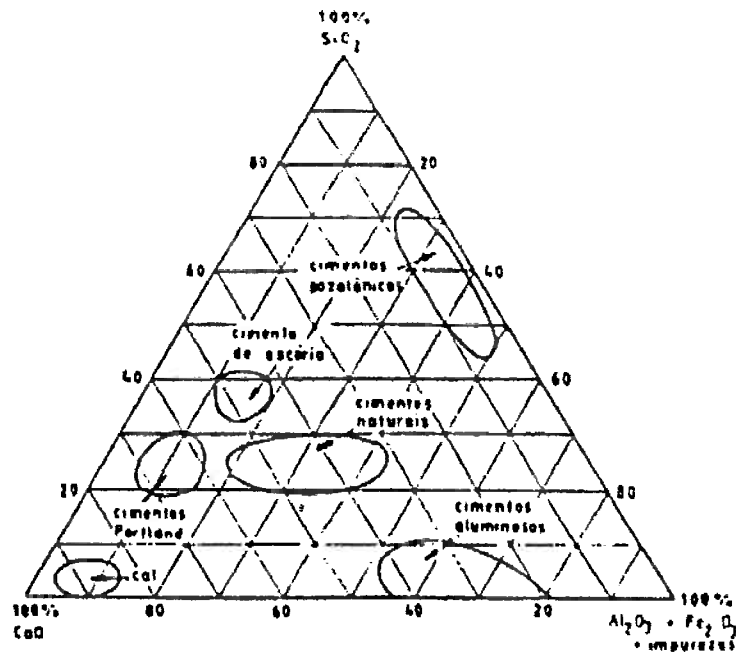


Figura 2: Composição aproximada dos óxidos do cimento ^[5]

O cimento Portland comum é basicamente uma mistura de clínquer moído com gesso. O clínquer é composto de silicato tricálcio - C_3S , silicato dicálcico - C_2S , aluminato tricálcico - C_3A e uma solução sólida de ferro aluminato tetracálcico - C_4AF .

3.2.2 – Microestrutura do Cimento Portland

Com a análise microestrutural de concretos, percebeu-se que se formam quatro tipos de fases sólidas ^[4], que podem ser observadas no microscópio eletrônico, o silicato de cálcio hidratado, o hidróxido de cálcio, os sulfoaluminatos de cálcio e os grãos de clínquer não hidratados.

Silicato de cálcio hidratado. É uma fase com composição do tipo C-S-H. A fórmula apresentada com hífen mostra que sua composição não é muito bem

definida. Sua morfologia é de fibras que podem ser pouco cristalinas ou cristalinas, formando uma estrutura conhecida como **gel** de silicato de cálcio hidratado. Apresenta uma forte adesão, devido a forças de Van der Waals. Esta adesão ocorre não só entre este produto de hidratação, mas também entre o mesmo com outros produtos de hidratação, como sulfoaluminatos e aluminatos de cálcio hidratados, com hidróxido de cálcio, com grãos de clínquer e com partículas de agregado graúdo e miúdo.

Sulfoaluminatos de cálcio. Esta fase pode se apresentar de duas formas. A primeira forma ocorre principalmente nos primeiros estágios da hidratação e corresponde ao trissulfato hidratado, $C_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$, também chamado de estringita, a qual forma cristais aciculares que contribuem pouco para a resistência do agregado. Eventualmente, em pastas de cimento Portland, essa estringita se decompõe em monossulfato hidratado, de estequiometria $C_4\text{ASH}_{18}$, que se cristaliza na forma de placas hexagonais, conferindo uma qualidade de adesão melhor e possuindo o mesmo mecanismo de adesão do silicato hidratado de cálcio. Tanto a estringita como o monossulfato contém pequenas quantidades de óxido de ferro que podem substituir o óxido de alumínio na composição dos cristais.

Hidróxido de cálcio. Possui uma estequiometria definida $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e tende a formar cristais grandes de formas desde não muito bem definidas até de placas hexagonais geometricamente bem definidas. Devido a sua área específica ser bem menor a do gel de silicato hidratado de cálcio, sua contribuição para a resistência da pasta, devido à forças de Van der Waals é menor.

Grãos de clínquer não hidratados. Na seqüência de hidratação, primeiro são dissolvidos os grãos menores e depois os maiores. Porém, alguns grão

podem não serem hidratados, devido ao grau de hidratação da pasta e do tamanho de partículas. Como os produtos de hidratação ocorrem muito próximo às partículas em hidratação, há uma aparência de formação de um revestimento sobre as partículas não hidratadas.

Na Figura 3, temos uma micrografia mostrando as morfologias destes produtos de hidratação de cálcio, nos cimentos Portland.

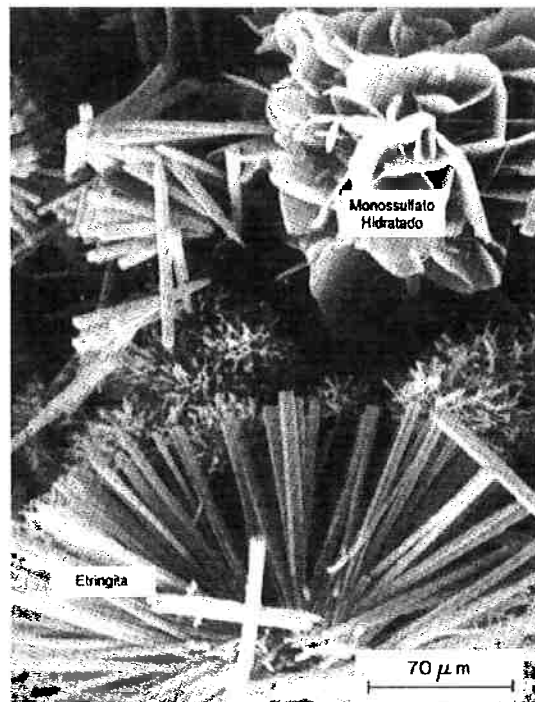


Figura 3: Micrografia de cristais hexagonais de monossulfato hidratado e cristais aciculares de estríngita formados por soluções de aluminato e sulfato de cálcio ^[4].

3.3 – PRINCÍPIOS DE PELOTIZAÇÃO

A pelotização de finos é um procedimento baseado no molhamento, rotação e aglomeração dos mesmos [6]. Os equipamentos mais utilizados neste processo são o tambor rotatório e o disco pelotizador, como mostrados nas Figuras 4 e 5.

Os principais fatores que permitem a aglomeração das partículas são o fenômeno da capilaridade e a compactação sofrida pelo material durante a sua rotação.

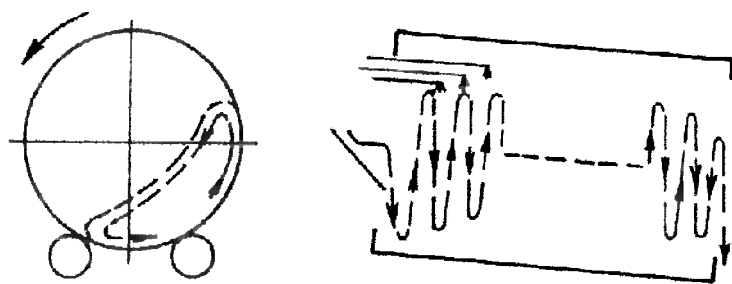


Figura 4: Tambor rolante [6]

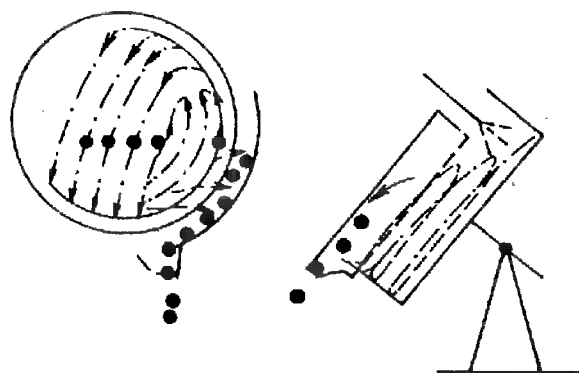


Figura 5: Disco Pelotizador [6]

São duas as fases da formação das pelotas, a formação dos núcleos e o crescimento destes núcleos. Na primeira etapa, a formação dos núcleos, os fatores predominantes são as forças de capilaridade e na segunda etapa, o crescimento dos núcleos, passam a ter grande importância as forças originárias da movimentação das pelotas.

Basicamente, os núcleos começam a ser formados a partir da aspersão de um líquido sobre as partículas. A seguir vê-se dois processos pelos quais pode-se ocorrer a formação dos núcleos. Na Figura 6, as partículas são molhadas e movem-se juntas de modo que acabam se unindo devido à pontes de água e mais partículas vão se unindo, conforme se adiciona umidade. Aos poucos, vai se formando o fenômeno de aglomeração por capilaridade. Na Figura 7, primeiro há um grande molhamento localizado, que atrai as partículas devido à tensão superficial do líquido e o núcleo se forma à medida que novas partículas vão se aderindo ao sistema. Os núcleos, quando muito pouco resistentes, se quebram e dão origem a outros núcleos.

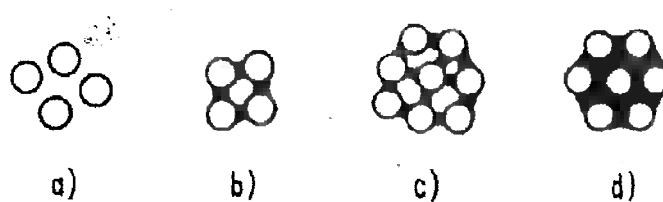


Figura 6: Formação de núcleos ^[6]

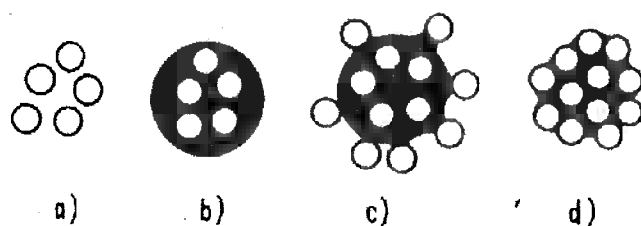


Figura 7: Formação de núcleos ^[6]

3.4 – INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGLOMERANTE EM PELOTAS AUTO-REDUTORAS

A evolução da resistência a frio das pelotas auto-redutoras foi estudado em alguns trabalhos anteriores neste Departamento. Nestes trabalhos também foi levantada uma curva de resistência à compressão a frio em função do teor de cimento Portland ARI, mostrada na Figura 8. A resistência, medida em N / pelota, foi normalizada para pelotas de 18 mm de diâmetro. Este gráfico mostra que teores entre 6% e 8% de cimento Portland ARI existe um aumento brusco da resistência à compressão.

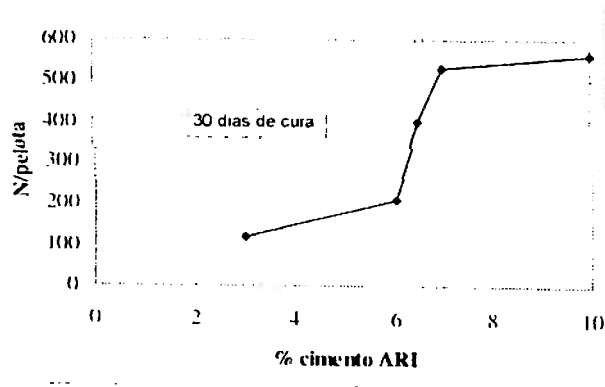


Figura 8: Resistência à compressão a frio em função do teor de cimento para pelotas de minério de ferro e carvão mineral, após 30 dias ^[7].

3.5 – INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DO AGLOMERANTE NA RESISTÊNCIA DE PELOTAS AUTO-REDUTORAS

As várias microestruturas que podem se formar nas ligações entre as partículas, fornecem diferentes resistências às pelotas. Estas morfologias foram estudadas por TAKANO ^[8] e podem ser na forma de produtos alongados, produtos finos alongados, placas hexagonais, produtos finos entrelaçados ou produtos bem finos de formação densa.

Os produtos finos entrelaçados e de formação densa são os que apresentam maior ligação entre as partículas, formando um gel hidratado de silicatos de cálcio. Este gel se forma quando se adiciona uma quantidade maior que 6% de cimento de alta resistência inicial (ARI) . Teores menores que 5% de cimento Portland ARI possuem produtos hidratados grandes e longos, de morfologia acicular, que conferem pouca ligação entre as partículas.

4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 – MATERIAIS UTILIZADOS

Na produção das pelotas auto-redutoras foram utilizados finos de minério de ferro MBR, carvão mineral antracitoso sul africano e cimento Portland ARI. A seguir, na Tabela 3 tem-se a composição das matérias primas e na Tabela 4 tem-se suas granulometrias.

Tabela 3: Composição das matérias primas na produção das pelotas ^[8]

| Componentes | Minério Fino de Ferro MBR | Carvão Antracitoso Sul Africano | Cimento Portland ARI |
|--------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------|
| Fe ₂ O ₃ | 97,29 | | 2,78 |
| SiO ₂ | 0,82 | 6,67 | 19,05 |
| FeO | - | 1,94 | - |
| P | 0,04 | - | - |
| S | - | 0,22 | - |
| CaO | - | 1,35 | 64,30 |
| Al ₂ O ₃ | 0,35 | 4,10 | 4,92 |
| MgO | - | 0,20 | 0,55 |
| MnO | 0,47 | 0,08 | - |
| C _{fixo} | - | 70,51 | - |
| CO ₂ | | | |
| H ₂ O | - | - | - |
| CO | | 1,40 | |
| CH ₄ | | 4,20 | |
| N ₂ | | 1,40 | |
| H ₂ O | | 6,93 | |
| SO ₂ | | | 2,63 |
| K ₂ O | | | 0,73 |
| Na ₂ O | | | 0,00 |
| CaO _{livre} | | | 1,01 |
| Cinzas | | | |
| Voláteis | | | |
| Outros | 1,03 | - | 3,99 |

Tabela 4: Granulometria das matérias primas na produção das pelotas

(% retida) ^[8]

| Peneira ASTM | Minério Fino de Ferro MBR | Carvão Antracitoso Sul Africano | Cimento Portland ARI |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 40 | 0,20 | | |
| 70 | 1,46 | 1,38 | |
| 100 | 6,43 | 6,20 | |
| 140 | 9,00 | 8,23 | |
| 200 | 24,79 | 12,41 | |
| 270 | 9,56 | 11,06 | |
| 325 | 5,81 | 5,60 | |
| <150 | | | 100 |
| <325 | 42,53 | 55,12 | |

4.1.1 – Minério de Ferro

Na preparação da mistura das pelotas, foi utilizado finos de minério de ferro MBR, com a composição e granulometria caracterizadas nas Tabela 3 e 4. Os finos de minério de ferro usados na preparação das pelotas auto-redutoras foram primeiro secados em uma estufa a uma temperatura de 120°C por um período de um dia. Com isso, obteve-se uma umidade de 0.3%. Após a secagem, o minério de ferro passou por um peneiramento em malha de 65 *mesh*, para o aproveitamento dos finos.

4.1.2 – Carvão Mineral Antracitoso

Foi utilizado o carvão caracterizado nas Tabelas 4 e 5. A sua preparação iniciou-se com uma secagem a uma temperatura de 100°C por um dia. O carvão foi secado a uma temperatura menor que o minério para diminuir a perda de

carvão. A umidade final obtida na secagem foi de 1.3%. O carvão seco foi então peneirado em uma malha de 65 *mesh*.

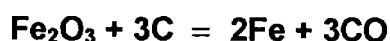
4.1.3 – Cimento Portland ARI

O cimento Portland de Alta Resistência Inicial (Portland ARI) usado na mistura das pelotas, caracterizado nas Tabelas 3 e 4, não sofreu nenhum processamento .

4.2 – COMPOSIÇÃO DAS PELOTAS AUTO-REDUTORAS

Foram produzidas pelotas auto-redutoras a partir de misturas das matérias primas já descritas, finos de minério de ferro MBR, carvão mineral antracitoso sul africano e cimento Portland ARI. Partindo-se de uma mistura de 76,17% de minério de ferro e 23,83% de carvão mineral, base seca, adicionou-se a mesma teores crescentes de cimento de 2,0% a 10% .

O cálculo da relação carvão / minério foi a partir da reação global de redução, visando a total redução do ferro. Para o cálculo, são consideradas as composições do minério de ferro e do carvão, bem como as suas umidades.



As composições das matérias primas são como descritas nas Tabelas 3 e 4. Na Tabela 5 é mostrada a porcentagem em peso das misturas realizadas, na base seca. Considerando-se as umidades medidas de 0.3% para o minério de ferro e 1.3% para o carvão mineral, tem-se a porcentagem em peso mostrada na Tabela 6.

Tabela 5: Composição das Pelotas, porcentagem em peso (base seca).

| Lote | Minério de ferro | carvão mineral | cimento portland ARI |
|------|---------------------|-------------------|-------------------------|
| P1 | 68,55 | 21,45 | 10,00 |
| P2 | 70,08 | 21,92 | 8,00 |
| P3 | 71,60 | 22,40 | 6,00 |
| P4 | 73,12 | 22,88 | 4,00 |
| P5 | 74,65 | 23,35 | 2,00 |
| P6 | 70,46 | 22,04 | 7,50 |
| P7 | 70,84 | 22,16 | 7,00 |
| P8 | 71,22 | 22,28 | 6,50 |

Tabela 6: Composição das Pelotas, porcentagem em peso (base úmida).

| Lote | Minério de ferro | carvão mineral | cimento portland ARI |
|------|---------------------|-------------------|-------------------------|
| P1 | 68,42 | 21,62 | 9,95 |
| P2 | 69,94 | 22,10 | 7,96 |
| P3 | 71,45 | 22,58 | 5,97 |
| P4 | 72,96 | 23,06 | 3,98 |
| P5 | 74,47 | 23,54 | 1,99 |
| P6 | 70,30 | 22,21 | 7,46 |
| P7 | 70,68 | 22,33 | 6,96 |
| P8 | 71,06 | 22,46 | 6,47 |

4.3 – MISTURA DOS MATERIAIS

As misturas foram realizadas em um misturador de alta intensidade de laboratório EIRICH de 5 litros por um tempo de 11 minutos cada mistura. Na Figura 9 é mostrado um misturador deste tipo. Já na Figura 10, tem-se um

esquema mostrando a movimentação do prato em sentido contrário ao da pá, gerando uma suspensão dos pós misturados.



Figura 9: Misturador de alta intensidade : www.eirich.de



Figura 10: Movimentação em um misturador de alta intensidade: www.eirich.de

4.4 – O PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO

A pelletização foi realizada em um prato pelletizador colocado sobre uma betoneira, onde era aspergida água em uma quantidade na mistura até que se formassem os núcleos. Depois de formados os núcleos, adicionava-se pequenas quantidades de mistura para que as mesmas favorecessem o crescimento dos núcleos. Durante a pelletização foi utilizada água destilada, afim de se evitar uma contaminação da pelota com elementos desconhecidos. A permanência da

pelota no prato, depois de terminada a fase de formação das pelotas foi de cerca de 6 minutos, pois fixando-se um tempo igual para todas, tem-se um mesmo grau de compactação.



Figura 11: Disco Pelotizador utilizado^[8].

4.5 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PELOTAS AUTO-REDUTORAS

Durante o período de cura, foi medida a resistência à compressão a frio das pelotas em uma máquina universal de resistência de areias *Dietert*. Esta máquina, normalmente é utilizada para medir a resistência de corpos verdes de areia e foi adaptada para o uso em pelotas. Uma máquina deste tipo é vista na Figura 12.

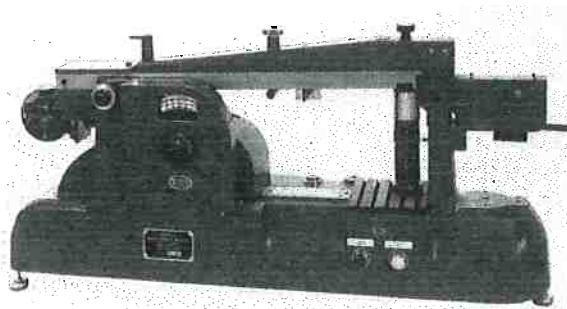


Figura 12: Máquina de resistência universal DIETERT^[9]

Foi analisada a evolução da resistência à compressão a frio em relação ao tempo de cura e ao teor de aglomerante. Durante o período de cura, foram acompanhadas as resistências das pelotas, sendo usadas 5 medidas para cada teor de aglomerante em cada dia de medida. A resistência à compressão foi normalizada segundo a fórmula abaixo, para uma pelota padronizada de 18 mm.

$$\text{Resistência (N / pelota de 18 mm)} = \text{VM} \times 14,3257 \times (18 / d)^2$$

Onde : VM = valor medido na máquina de compressão em psi

d = Diâmetro médio da pelotas (mm)

4.6 – MICROGRAFIAS DAS PELOTAS AUTO-REDUTORAS

Após o período de cura, as pelotas produzidas são observadas no MEV (microscópio eletrônico de varredura) para a análise da microestrutura formada pelo aglomerante e o tipo de ligação entre as partículas dentro das pelotas. A conclusão que se pretende obter desta análise é de como variam as microestruturas e como elas afetam a resistência das pelotas auto-redutoras.

Com base nestes dados deseja-se fazer pelotas com resistência mecânica suficiente e o mínimo de aglomerante.

As pelotas foram quebradas e a superfície da fratura foi recoberta com ouro para observação no MEV. Foram observadas nove regiões diferentes, com aumentos de 5000x e 10000x, para a escolha das microestruturas mais significativas, ou seja, a que melhor representasse a pelota.

5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

5.1 – ENSAIO MECÂNICO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A FRIO

No ensaio de resistência à compressão a frio, pode-se perceber um aumento da resistência mecânica com o aumento de teor de aglomerante, no caso o cimento Portland ARI. Mas, o que chama a atenção no gráfico Resistência (N / pelota) x Teor de cimento, na Figura 13, é a taxa de crescimento da resistência com o teor de aglomerante, muito mais acentuado nas composições entre 6 e 8% de cimento.

Em teores de cimento até 6%, a resistência à compressão chega a atingir pouco mais de 200N / pelota normalizada de 18mm. Em teores acima de 8% de cimento Portland ARI, a resistência à compressão tem no mínimo um valor de 490N / Pelota de 18mm. Entre 6 a 8% de teor de cimento, há um aumento acelerado da resistência da pelota. O aumento ocorrido entre 6 a 8% de cimento apesar de mais acelerado, ocorre de forma uniforme no período. Este efeito pode ser percebido na Figura 13.

Percebeu-se também, no mesmo ensaio, que a resistência das pelotas, em seu período de cura, tem um crescimento acelerado até por volta de 15 dias. Após este período, o crescimento da resistência se dá de forma bastante lenta, às vezes imperceptível, como pode ser visto no gráfico da Evolução da resistência à compressão a frio das pelotas, na Figura 14.

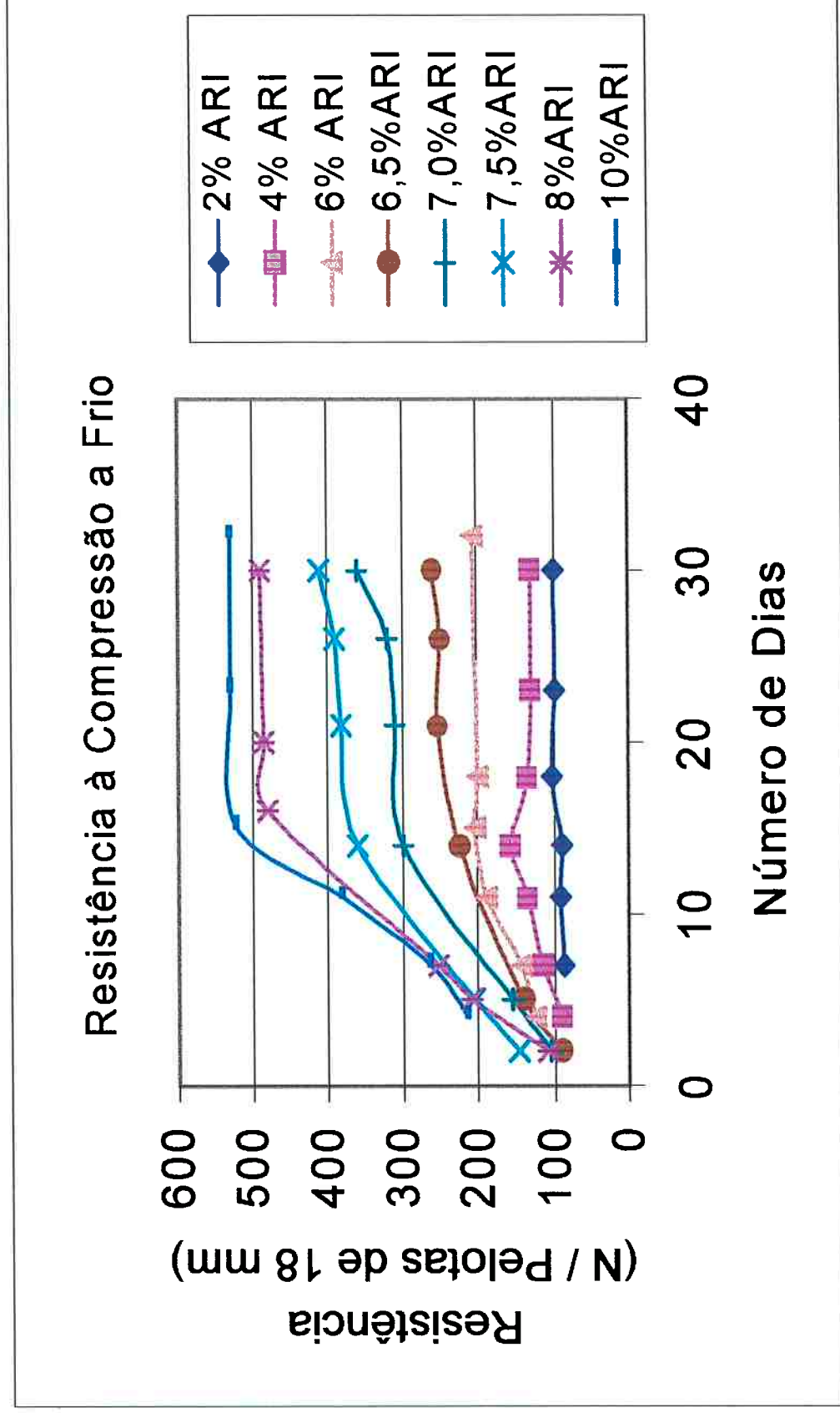


Figura 13: Gráfico da resistência à compressão a frio de pelotas auto- redutoras em função do número de dias de cura para vários teores de aglomerante (cimento Portland ARI)

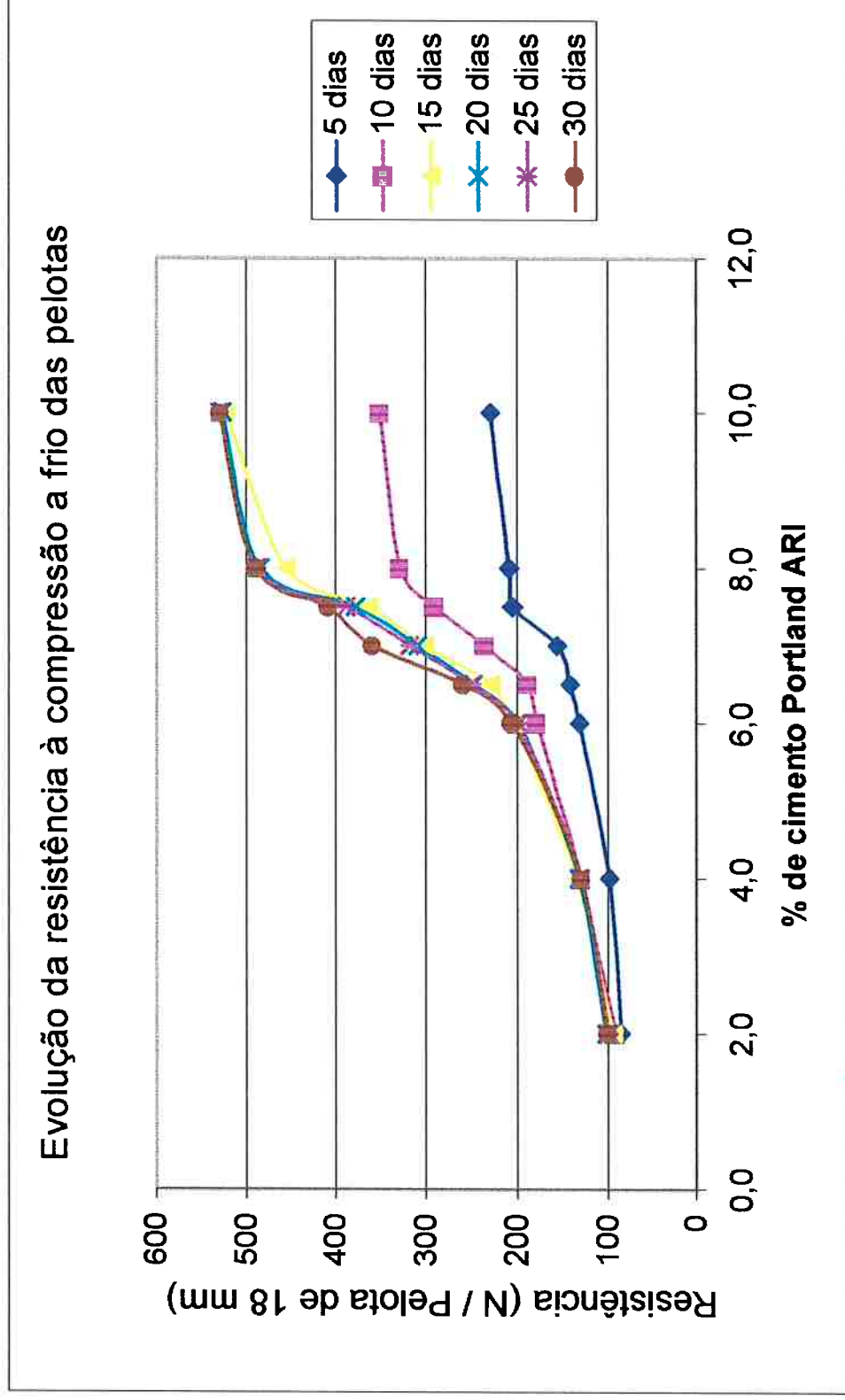


Figura 14: Gráfico da resistência à compressão de pelotas auto-redutoras em função do teor de aglomerante para vários períodos de cura.

5.2 – MICROGRAFIAS DAS PELOTAS AUTO-REDUTORAS

As pelotas auto-redutoras foram, então, observadas no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) para a comparação de suas microestruturas. Isto possibilita o entendimento do fenômeno observado anteriormente na variação das resistências à compressão a frio.

A seguir tem-se as micrografias com as morfologias mais comumente encontradas em cada teor de cimento Portland ARI. Observou-se micrografias com aumentos de 10000x e 5000x.

5.2.1 – Pelotas auto-redutoras com 2,0% de cimento Portland ARI

A quantidade de aglomerante foi insuficiente para cobrir totalmente a superfície das partículas e esta condição favoreceu a formação de produtos hidratados longos e grandes, normalmente de morfologia semelhante à da *estringita*. Esta morfologia, como já visto na revisão bibliográfica, ocorre quando se forma produtos de hidratação que conferem pouca adesão e consequentemente, pouca resistência mecânica para pelota. A morfologia acicular tem pequena superfície, o que também contribui negativamente na adesão. Por isso, esta pelota possui pouca resistência mecânica.

Nas Figuras 15 e 16 tem-se micrografias da pelota com 2,0% de teor de aglomerante com aumentos de 5000x e 10000x respectivamente.

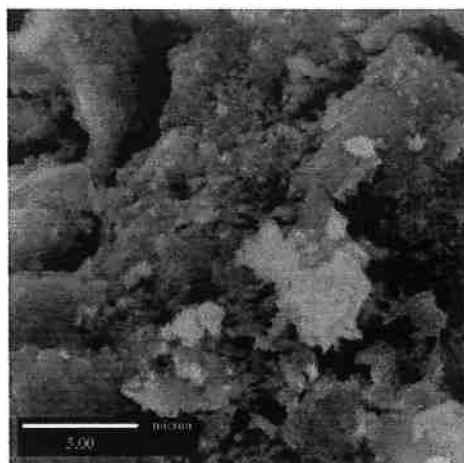


Figura 15: Micrografia de uma pelota com 2,0% de teor de cimento. Aumento de 5000x. A micro mostra uma pequena quantidade de uma morfologia longa e grande.

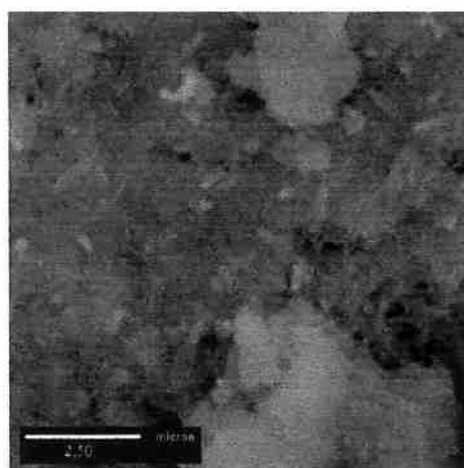


Figura 16: Micrografia de uma pelota com 2,0% de teor de ARI. Aumento de 10000x. Este aumento possibilita uma melhor visualização da formação dos produtos de hidratação longos.

5.2.2 – Pelotas auto-redutoras com 4,0% de cimento Portland ARI

Este teor de aglomerante também se mostrou insuficiente para cobrir as partículas e favorecer uma boa adesão. Com isso, também não ofereceu uma boa resistência. As micrografias destas pelotas mostraram uma quantidade maior

de formação de produtos longos e grosseiros, com morfologia semelhante à das *estringitas*. A *estringita* é um produto de hidratação que confere pouca adesão e pouca resistência mecânica às pelotas. Porém, uma maior quantidade destes produtos conferiu em um pequeno aumento da resistência à compressão em relação às pelotas de 2,0%.

Nas Figuras 17 e 18 tem-se micrografias da pelota com 4,0% de teor de aglomerante, com aumentos de 5000x e 10000x respectivamente.

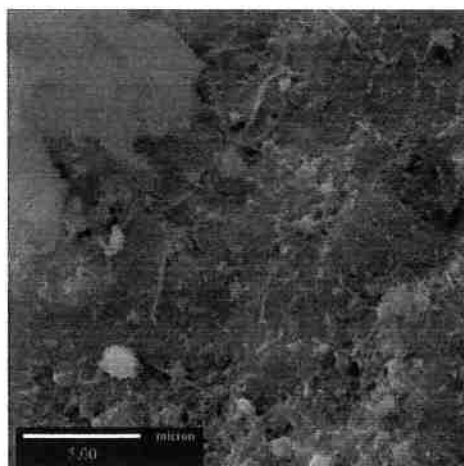


Figura 17: Micrografia de uma pelota com 4,0% de teor de cimento ARI. Aumento de 5000x. Formação de grande quantidade de produtos longos.

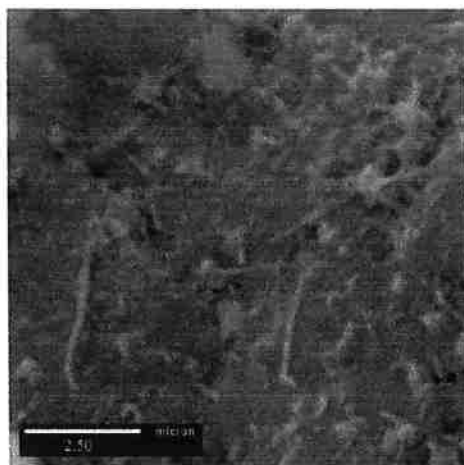


Figura 18: Micrografia de uma pelota com 4,0% de cimento ARI. Aumento de 10000x. Formação de produtos longos.

5.2.3 – Pelotas auto-redutoras 6% cimento Portland ARI

As pelotas com 6,0% de teor de cimento ARI apresentaram em suas micrografias uma diminuição na quantidade de produtos longos e grosseiros. Houve um início de formação de um produto de hidratação mais fino, porém não muito denso. Os silicatos formados do aglomerante já começam a cobrir a superfície das pelotas. Esta morfologia encontra-se de acordo com o previsto, já que a partir de 6,0% inicia-se um aumento brusco de resistência mecânica e o gel de silicato de cálcio hidratado é uma morfologia que confere um aumento à resistência do cimento.

Nas Figuras 19 e 20 tem-se micrografias com aumentos de 5000x e 10000x, respectivamente.

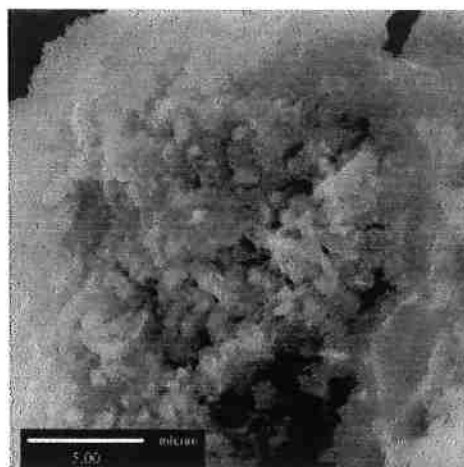


Figura 19: Micrografia de uma pelota de 6% de cimento ARI. Aumento de 5000x.

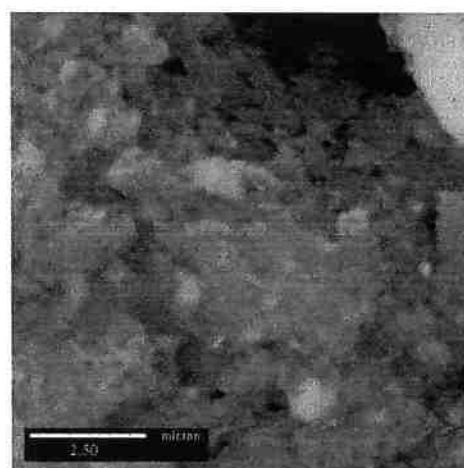


Figura 20: Micrografia de uma pelota de 6% de cimento ARI. Aumento de 10000x.

5.2.4 – Pelotas auto-redutoras 6,5% cimento Portland ARI

O aglomerante já se encontra em teor suficiente para cobrir as partículas das pelotas. A partir de 6,5% a resistência das pelotas aumentará em uma intensidade maior que no intervalo anterior. Nestas pelotas houve a formação do gel de silicato de cálcio hidratado de uma forma mais fina e em maior incidência que as pelotas de 6,0% de aglomerante. O gel formado também se apresentou

de uma forma mais densa. Não foi observada a presença de produtos longos de hidratação.

Nas Figuras 21 e 22 tem-se micrografias de pelotas com 6,5% de teor de aglomerante com aumentos de 5000x e 10000x, respectivamente.

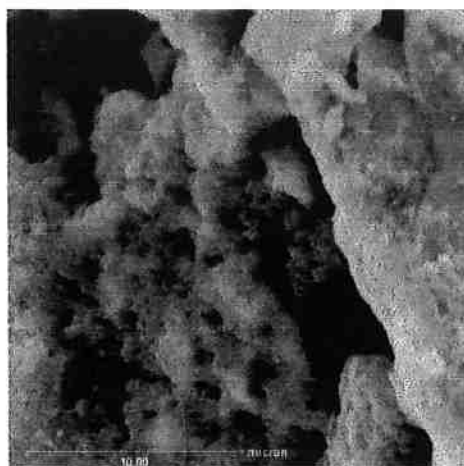


Figura 21: Micrografia de uma pelota com 6,5% de teor de cimento ARI.
Aumento de 5000x.

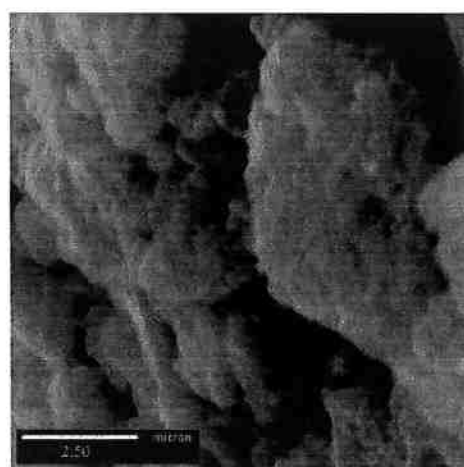


Figura 22: Micrografia de uma pelota com 6,5% de teor de cimento ARI.
Aumento de 10000x..

5.2.5 – Pelotas auto-redutoras com 7,0% de cimento Portland ARI

Nas pelotas auto-redutoras com 7,0% de aglomerante, percebe-se que o aglomerante cobriu bastante as pelotas. Isto se mostrou de acordo com a sua boa resistência mecânica.

Nas Figuras 23 e 24 tem-se micrografias de pelotas com 7,0% de teor de aglomerante com aumentos de 5000x e 10000x, respectivamente.

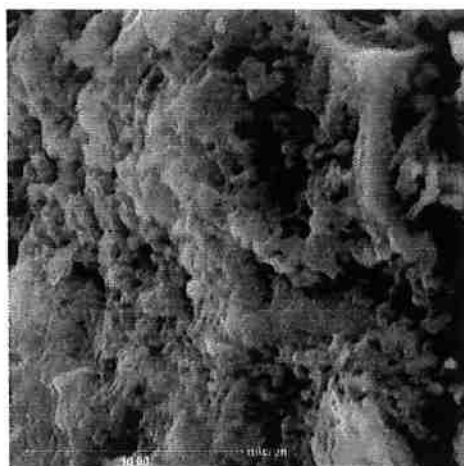


Figura 23: Micrografia de uma pelota com 7,0% de teor de cimento ARI.
Aumento de 5000x.

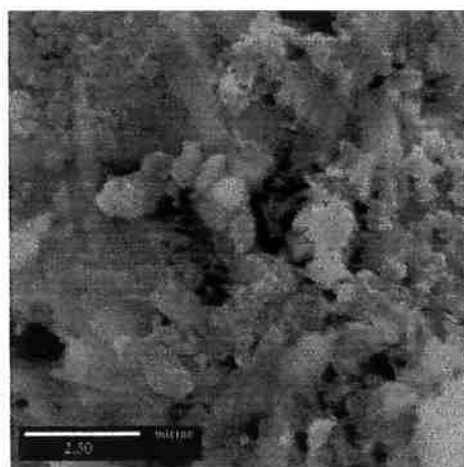


Figura 24: Micrografia de uma pelota com 7,0% de teor de cimento ARI.
Aumento de 10000x.

5.2.6 – Pelotas auto-redutoras 7,5% cimento Portland ARI

Nas pelotas com 7,5% de aglomerante foi observado uma grande densidade do gel de silicato de cálcio hidratado. Este se apresentou de forma bastante uniforme e muito fina. Cobrindo muito bem as pelotas. Com isto já temos uma boa resistência das pelotas auto-redutoras.

Nas Figuras 25 e 26 tem-se micrografias da pelota com 7,5% de teor de aglomerante com aumentos de 5000x e 10000x, respectivamente.



Figura 25: Micrografia de uma pelota com 7,5% de teor de cimento ARI.
Aumento de 5000x.

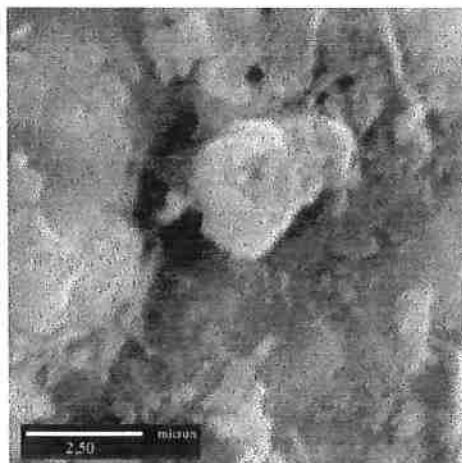


Figura 26: Micrografia de uma pelota com 7,5% de teor de cimento ARI.
Aumento de 10000x.

5.2.7 – Pelotas auto-redutoras 8,0% cimento Portland ARI

Estas pelotas apresentaram também uma grande formação do *gel de silicato de cálcio hidratado*. Esta morfologia é fina e densa, composta de fios entrelaçados de produtos de cálcio hidratados. A morfologia apresentada proporcionou uma cobertura eficiente das partículas e uma boa adesão entre as mesmas.

Nas Figuras 27 e 28 tem-se micrografias de pelotas com 8,0% de teor de aglomerante com aumentos de 5000x e 10000x, respectivamente.

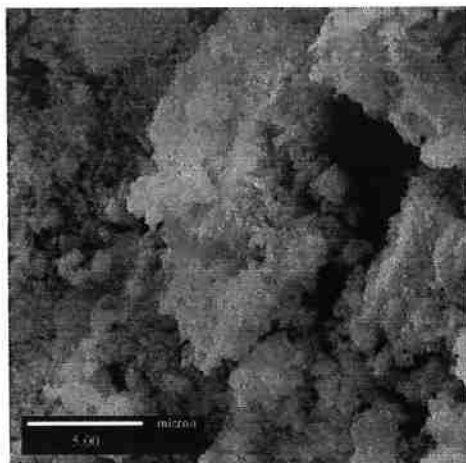


Figura 27: Micrografia de uma pelota com 8,0% de teor de cimento ARI.
Aumento de 5000x.

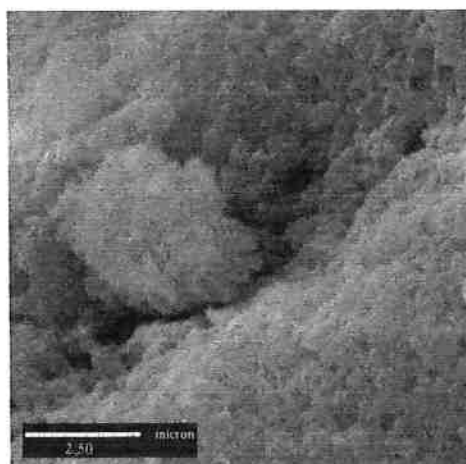


Figura 28: Micrografia de uma pelota com 8,0% de teor de cimento ARI.
Aumento de 10000x.

5.2.8 – Pelotas auto-redutoras 10% cimento Portland ARI

A micrografia das pelotas com teor de cimento Portland ARI igual a 10% apresentou uma grande proporção de *gel de silicato de cálcio hidratado*. O gel de silicato de cálcio hidratado apresenta uma morfologia bastante densa, de fios finos entrelaçados. Este gel, visto na pelota de 10% de cimento, foi encontrado

em maior quantidade e possuía uma morfologia mais densa porém mais gorsseira que as pelotas de 8% de teor de cimento. Por não apresentar grandes modificações entre as microestruturas das pelotas com 8,0 e 10,0% de aglomerante, a diferença de suas resistências foi pequena.

Como visto na revisão bibliográfica, esta morfologia é que confere ao cimento maiores adesão, devido às forças de Van der Waals, e resistência mecânica. Por ser a pelota que apresentou uma maior proporção desta formação, a mesma apresentou maior resistência à compressão a frio.

Nas Figuras 29 e 30 tem-se micrografias de pelotas com 10,0% de teor de aglomerante com aumentos de 5000x e 10000x, respectivamente.

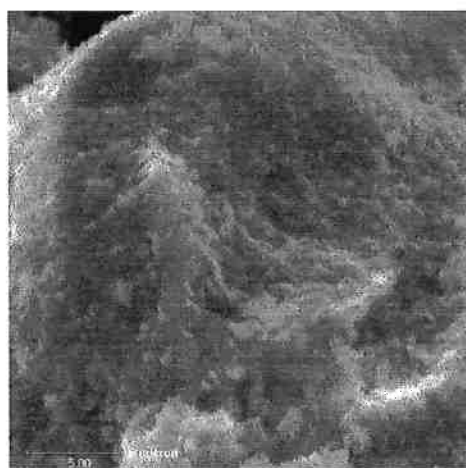


Figura 29: Micrografia de uma pelota com 10,0% de teor de cimento ARI.
Aumento de 5000x.

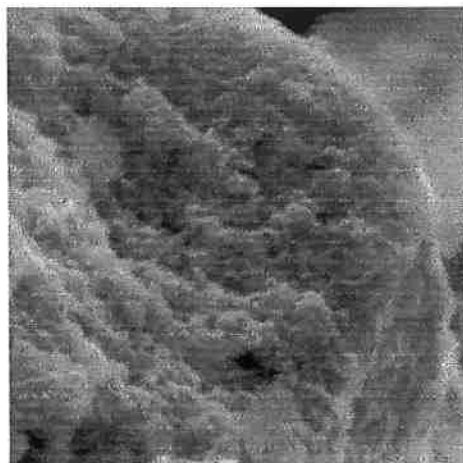


Figura 30: Micrografia de uma pelota com 10,0% de teor de cimento ARI.
Aumento de 10000x.

6 – CONCLUSÕES

De acordo com o estudo da teoria e a realização de experimentos, chegou-se às seguintes conclusões:

1 – Durante a cura das pelotas, observou-se que o aumento da resistência mecânica, medido através da resistência à compressão a frio, ocorria de modo considerável até o 15º dia. Após este período, o aumento da resistência não foi considerado significativo.

2 – Notou-se que há um aumento da resistência mecânica de acordo com o aumento do teor de aglomerante adicionado à mistura da pelota.

3 – O teor de aglomerante ocasionou um aumento na resistência de forma não uniforme. Entre 2,0 e 6,0% de aglomerante e entre 8,0 e 10,0% de aglomerante, a intensidade de aumento da resistência foi pequena. Mas, entre 6,0 e 8,0% de aglomerante, a taxa de aumento da resistência foi significativa. Neste intervalo, a resistência passou de valores até 206N (6,0%) para cerca de 490N (8,0%).

4 – A microestrutura das pelotas mostrou haver uma relação com o aumento acentuado da resistência. As morfologias observadas entre as pelotas de pouca resistência foram diferentes das observadas entre as pelotas de maior resistência.

5 – Nas pelotas auto-redutoras de 2,0 e 4,0 % de cimento Portland ARI a resistência das pelotas após a cura foi baixa, decorrente da falta de aglomerante para cobrir totalmente as superfícies das partículas . Nestas condições propiciaram a formação de produtos de hidratação grosseiros e com morfologia acicular (agulhas). Estes produtos conferem ao sistema uma pequena resistência mecânica, como visto em revisão bibliográfica. Porém uma maior

quantidade destes produtos encontrados nas pelotas de 4,0% ofereceram uma resistência maior que na pelota de 2,0 %.

6 – As pelotas com 6.0 % de aglomerante possuíram uma estrutura diferente das pelotas com menor composição. Não apresentou a formação dos produtos longos, mas também houve pouca presença do gel de silicato de cálcio hidratado.

7 – Entre 6,5 e 7,5 % de aglomerante, as pelotas apresentaram um crescimento da formação de gel de silicato de cálcio hidratado. Este gel, com o aumento do teor de cimento, apresentou-se em maior quantidade e de uma forma mais fina.

8 – Com teores de 8,0 e 10,0 % de cimento, foi observada uma grande formação de gel de silicato de cálcio hidratado. Esta morfologia é a que apresenta maior resistência mecânica. Porém a taxa de aumento de resistência foi menor que na faixa entre 6 e 8%.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – TAKANO, C. ; BENEDUCE NETO, F. Processos emergentes de produção de aço. **Metalurgia e Materiais ABM**, v.53 , n. 469, p. 534-41, set. 1997.
- [2] – CONTRUCCI, M. A. et al. Produção de ferro gusa pelo processo TECNORED. **Metalurgia e Materiais ABM**, vol.49, n. 417, p. 360-8, maio 1993.
- [3] – MOURÃO, M. B. **Análise do processo de redução de minério de ferro por carbono na forma de pelotas auto-redutoras.** São Paulo, 1988. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [4] – MEHTA P. K.;MONTEIRO P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** 1. ed. Editora Pini., 1994.
- [5] – MARCHEZE, E. S. **Resistência mecânica a frio e crepitação em pelotas auto-redutoras.** São Paulo, 1994. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [6] – SRB, Jaroslav e RUZICKOVÁ, Zdenka. **Pelletization of fines.** 1. ed. Praga, Elsevier , 1988.
- [7] – TAKANO, C. Auto-redução e fusão redução. **A pesquisa na Escola Politécnica.** p. 381-4, São Paulo, 1997.
- [8] – TAKANO, C. **Aspectos fundamentais e tecnológicos dos efeitos dos aglomerantes na cura de pelotas auto-redutoras.** São Paulo, 1997. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

-
- [9] – JORSTAD, J. L. , RASMUSEN, W. M. **Aluminum Casting Technology**. 2ª edição, American Foundrymen's Society , 1993