

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

JOSIANE CARNEIRO SOUZA

REUTILIZAÇÃO DE AREIA A VERDE DESCARTADA DE FUNDIÇÃO LIGADA COM
 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}/\text{CO}_2$ NA PREPARAÇÃO DE MOLDES NÃO PERMANENTES

PONTA GROSSA
2012

JOSIANE CARNEIRO SOUZA

REUTILIZAÇÃO DE AREIA A VERDE DESCARTADA DE FUNDIÇÃO LIGADA COM
 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}/\text{CO}_2$ NA PREPARAÇÃO DE MOLDES NÃO PERMANENTES

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de Concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dra. Adriana Scotton Antonio Chinelatto.

Co-Orientador: Prof^o. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira.

PONTA GROSSA
2012

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

Souza, Josiane Carneiro
S729 Reutilização de areia a verde
descartada de fundição ligada com
Na₂SiO₃.XH₂O/CO₂ na preparação de moldes
não permanentes/ Josiane Carneiro Souza.
Ponta Grossa, 2012.
97f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e
Ciência de Materiais - Área de
Concentração: Desenvolvimento e
Caracterização de Materiais), Universidade
Estadual de Ponta Grossa.
Orientadora: Prof^a Dr^a Adriana Scotton
Antonio Chinelatto.
Co-Orientador: Prof. Dr. Ivanir Luiz de
Oliveira.

1.Processo de Fundição. 2.Reutilização
da areia a verde. 3.Sistema silicato de
sódio/CO₂. I.Chinelatto, Adriana Scotton
Antonio. II. Oliveira, Ivanir Luiz de.
III. Universidade Estadual de Ponta
Grossa. Mestrado em Engenharia e Ciência
de Materiais. IV. T.

CDD: 671.2

JOSIANE CARNEIRO SOUZA

REUTILIZAÇÃO DE AREIA A VERDE DESCARTADA DE FUNDIÇÃO LIGADA
COM $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}/\text{CO}_2$ NA PREPARAÇÃO DE MOLDES NÃO
PERMANENTES

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e
Ciência de Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa, área de
Concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais.

Ponta Grossa, 19 de dezembro de 2012.



Profº. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira- Orientador
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR



Profº. Dr. Luiz Veriano Oliveira Dalla Valentina
Doutor em Engenharia de Produção
Universidade do Estado de Santa Catarina- UDESC



Profº. Dr. Marcio Ferreira Hupalo
Doutor em Engenharia Metalúrgica
Universidade Estadual de Ponta Grossa- UEPG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho para as duas mulheres que me ensinaram com amor e dedicação os valores morais e a prática do bem. Mulheres que sempre estiveram do meu lado, auxiliando-me nas dificuldades do cotidiano. Elas são o motivo pelo qual irei por toda a minha vida esforçar-me para proporcionar a felicidade e o merecimento do amor incondicional delas por mim.

À minha mãe Erecê, e à minha vizinha Izalina (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida, por todas as bênçãos concedidas, e por permitir a concretização deste sonho;

À Família, na qual Deus, em sua infinita sabedoria, criou, para que os seres humanos tivessem um lugar de apoio, de encorajamento mútuo, consolo nas horas difíceis;

Aos Orientadores, Professora Dra. Adriana Scotton Antonio Chinelatto e Professor Dr. Ivanir Luiz de Oliveira pela dedicação nas orientações, sugestões e críticas que possibilitam o meu crescimento intelectual. Também pela disponibilidade que sempre manifestaram durante os trabalhos de pesquisa;

Aos demais Professores do DEMA/MECM, principalmente Prof. Dr. Adilson Luiz Chinelatto, Prof. Dr. Osvaldo Cintho, Prof. Dr. Luís Antonio Pinheiro, Prof. Ms. Selaucio Vurobi Júnior, pelos ensinamentos, pela amizade, e pelos conselhos referentes a vida profissional.

Aos Professores da Coordenação de Mecânica da UTFPR/ Ponta Grossa, principalmente Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato e Prof. Dr. Oscar Regis Junior, pela amizade e incentivo à pesquisa.

À Fundação Araucária, à Universidade Estadual de Ponta Grossa, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Ponta Grossa, pelo auxílio financeiro e por possibilitar a realização deste trabalho;

Às Indústrias de Fundação, pela disponibilidade e subsídios fornecidos para realizar esta pesquisa;

Aos funcionários e técnicos, Dirceu, Douglas, Milton e Nilson, Selma, Josely, Ana, Amaury e Elias, pelo auxílio na realização dos ensaios;

Aos amigos e colegas de pesquisa e mestrado, Ana Maria Souza, Araldo Augusto Tisque dos Santos, Cássio Brandhuber, Christiane Lago Ojaimi, Éderson Pauletti, Edson Silva, Eleomar Lena, George Eduardo Martins, Guilherme Gralik, Hudson Loch Haskell, Josiane Silvano, Juliane Ciórcero, Kelly Cristina de Castro, Kethlinn Ramos, Leonardo Wendler, Luana F. Lao, Márcio Kloster, Maurício Marlon Mazur, Nádia Zurba, Nayana Reggiani Peres, Raphael Euclides Prestes Salem, Tales Ferreira, Viviane Teleginski e todos os demais, pelos momentos de estudo, entretenimento e parceria compartilhados;

E a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho de pesquisa.

Faça do tempo uma ampulheta e aproveite cada grão de areia.
(Felipe Cordeiro)

RESUMO

A fabricação de peças metálicas por fundição e moldadas pelo processo em areias a verde (areia base aglomerada com argila) é bastante difundida nas indústrias pelo seu baixo custo e flexibilidade operacional. Uma das grandes vantagens é que os materiais utilizados podem ser reutilizados em novos ciclos de moldagem. Porém, quando o metal líquido entra em contato com o molde, provoca a desativação da argila localmente, gerando materiais inertes que se concentram na areia e limitam ciclos longos de reuso. Com isto, surgem excedentes de areias pela adição de materiais primários novos e a consequente necessidade de descarte para manter o fluxo constante de materiais. Este excedente é um passivo que normalmente é descartado em aterros. Este trabalho buscou uma solução ambiental para este resíduo, por meio da reutilização no próprio processo de moldagem, utilizando silicato de sódio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$)/ CO_2 como ligante. As propriedades obtidas de amostras com areias descartadas e com as areias a verde novas foram comparadas entre si para verificar o real potencial de reutilização da ADF e o efeito de seus componentes inertes e aditivos. Para esta finalidade avaliou-se os mecanismos envolvidos na interação da areia a verde com o silicato, antes e após reação com CO_2 , na faixa entre 0 a 20% (em peso) nas misturas. Propriedades mecânicas foram avaliadas antes e após a gasagem com o CO_2 , tanto com areia descartada de fundição (ADF) quanto com os seus componentes primários. Neste estudo, para caracterização microestrutural foram utilizadas técnicas de Difração de raios X, Microscopia Ótica e Microscopia Eletrônica de Varredura/EDS. Os resultados demonstraram dependência mútua entre as propriedades mecânicas; a morfologia do recobrimento da sílica gel sobre os grãos de areia; e a composição da mistura utilizada.

Palavras-Chaves: Processo de Fundição, Reutilização da areia a verde; Sistema silicato de sódio/ CO_2 .

Abstract

The manufacture of metal parts by molding and molded by the process in the green sand (sand base crowded with clay) is widespread in industries for its low cost and operational flexibility. A major advantage is that the materials can be reused in new molding cycles. However, when the liquid metal comes in contact with the mold, causes disabling clay locally, generating inert materials that focus on the sand and limit long cycles of reuse. Thus, there are surplus sands by adding new primary materials and the consequent need for disposal to maintain the constant flow of materials. This excess is a liability that is usually discarded in landfills. This study sought a solution to this environmental waste, by reuse in the actual molding process using the sodium silicate ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$)/ CO_2 , as binder. The properties obtained from samples with waste foundry sands (WFS) and with the new green sands were compared to verify the real potential for reuse WFS and the effect of its inert components and additives. For this purpose it was evaluated the mechanisms involved in the interaction with the green sand silicate before and after reaction with CO_2 in the range of 0 to 20% (by weight) mixed. Mechanical properties were evaluated before and after gassing with CO_2 , both with WFS and with its primary components. In this study, for microstructural characterization techniques were used for X-ray diffraction, optical microscopy and MEV/ EDS. The results showed mutually dependent mechanical properties, the morphology of the silica gel coating on the sand grains, and the composition of the mixture used.

Key Words: Casting Process, Reuse green sand; System sodium silicate/ CO_2 .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Mistura dos materiais primários para a preparação da areia a verde.....	17
Figura 2.2- Preparação de um molde completo por areia a verde	18
Figura 2.3- Transformações polimórficas da sílica	20
Figura 2.4- Estrutura da argila montmorilonita sódica, principal constituinte da bentonita.....	22
Figura 2.5- As diferentes formas que o grão de areia base pode apresentar. Em (a) grãos arredondados; em (b) grãos subangulares; e em (c) grãos angulares.....	25
Figura 2.6- Exemplo de peneirador mecânico acompanhado das séries de peneiras ABNT para fundição	26
Figura 2.7- Corte transversal de um molde com partição horizontal apresentando os pontos onde os gases são originados	27
Figura 2.8- Representação de uma areia com bentonita inerte, antes e após o processo de vazamento de ferro fundido	28
Figura 2.9- Elementos básicos de um sistema de canais de vazamento para moldes com linha de partição horizontal.....	29
Figura 3.1- Fluxograma da preparação e caracterização das areias a verde de fundição.....	38
Figura 3.2- Momento do descarte na indústria de fundição e coleta da areia descartada de fundição	39
Figura 3.3- Peneiramento da ADF realizado no CETEM. Em (a) ADF sendo peneirada; em (b) ADF peneirada e armazenamento em sacos.....	39
Figura 3.4- ADF quarteadas e quarteador	40
Figura 3.5- Obtenção da areia a verde preparada. Em (a) a adição de bentonita e água na areia base de sílica; em (b) a adsorção de água nas lamelas de bentonita na areia a verde preparada	41
Figura 3.6- Areias estudadas neste trabalho	41
Figura 3 7- Fluxograma das areias estudadas com silicato de sódio/CO ₂	44
Figura 3.8- Molde metálico empregado para a preparação dos corpos-de-prova	45
Figura 3.9- Preparação para a gasagem de CO ₂ no corpo-de-prova de areia a verde preparada com 8% da solução de silicato de sódio.....	46
Figura 3.10- Areia descartada de fundição fraturada no ensaio de resistência à compressão	47
Figura 3.11- Fluxograma do molde de ADF	49
Figura 3.12- Representação esquemática do sistema de canais, massalotes e marcação de machos	50
Figura 3 13- Modelo bipartido em madeira. Em (a) parte superior que representou a cavidade na meia caixa de moldagem superior; e em (b) parte inferior do modelo representado na meia caixa de moldagem inferior	51
Figura 3.14- Adição da solução de silicato de sódio na ADF no interior do misturador	51
Figura 3.15- Preparação do molde de ADF. Em (a) meia caixa de moldagem superior com os canais	

para a gasagem de CO ₂ ; em (b) a cavidade formada pela remoção do modelo	52
Figura 4. 1- Distribuição granulométrica das areias estudadas	56
Figura 4.2- Imagem de partículas de grãos de ADF, obtida por microscopia ótica.....	57
Figura 4.3- Imagens das areias estudadas obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV. Em (a) ADF; em (b) areia a verde preparada; e em (c) areia base de sílica.....	58
Figura 4.4- Difractogramas das bentonitas presentes na ADF	60
Figura 4.5- Difractogramas das areias a verde de fundição e da areia base de sílica	61
Figura 4.6- Compactabilidade das areias a verde de fundição e areia base de sílica em diferentes adições de silicato de sódio antes da gasagem de CO ₂	62
Figura 4.7- Resistência à compressão das areias a verde de fundição e a areia base de sílica antes da gasagem de CO ₂	64
Figura 4.8- Resistência à compressão das areias a verde de fundição e da areia base de sílica com diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO ₂	65
Figura 4.9- Imagens da areia base de sílica em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO ₂ por microscopia ótica. Em (a) com adição de 5% da solução na areia; em (b) com adição de 10% da solução na areia; e em (c) com adição de 15% da solução na areia.....	68
Figura 4.10- Imagens da areia base de sílica em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO ₂ obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV. Em (a) com a adição de 5%; em (b) adição de 10%, e em (c) adição de 15% da solução.....	69
Figura 4.11- Imagens da areia a verde preparada em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO ₂ em microscopia ótica. Em (a) sem adição de silicato de sódio/CO ₂ ; em (b) com 5% da solução; em (c) com adição de 10% da solução; e em (d) com adição de 15% da solução de silicato de sódio.....	70
Figura 4.12- Imagens da areia a verde preparada em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO ₂ obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV. Em (a) adições de 5% da solução; em (b) adição de 10% da solução e em (c) adição de 15% da solução de silicato de sódio.	71
Figura 4.13- Imagens da ADF em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO ₂ em microscopia ótica. Em (a) com adição de 5% da solução; em (b) com adição de 10% da solução; em (c) com 15% da solução de silicato de sódio.....	72
Figura 4.14- Imagens da ADF em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO ₂ obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV. Adições de 5% da solução em (a); em (b) adição de 10% da solução e em (c) adição 15% da solução de silicato de sódio	73
Figura 4.15- Imagem da areia base de sílica com 10% da adição solução de silicato de sódio após a gasagem de CO ₂ , obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV e a microanálise realizada por Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) nessa região	74
Figura 4.16- Imagem da areia a verde preparada com 15% da adição da solução de silicato de sódio após gasagem de CO ₂ obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV e a microanálise	

realizada por Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) nessa região	75
Figura 4.17- Imagem da ADF com 15% da adição da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 , obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV e a microanálise realizada por Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) nessa região	76
Figura 4.18- Difrátogramas de raios X da bentonita ativada com adições de 1,5%, 6% e 12% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2	77
Figura 4.19- Difrátogramas da bentonita ativada com e sem a solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 , apresentado a região característica desta argila	78
Figura 4.20- Difrátogramas de raios X das areias de fundição ligadas 5, 10 e 15% de silicato de sódio/ CO_2 . Em (a) da ADF; em (b) areia a verde preparada, e em (c) areia base de sílica.....	79
Figura 4.21- Canais de vazamento, massalotes e peça fundida após o processo de desmoldagem...	82
Figura 4.22- Diagrama ternário $\text{SiO}_2\text{-NaO-FeO}$ apresentando a fase formada na sinterização da ADF	83
Figura 4.23- Imagem da ADF na região próxima ao metal fundido, obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV.	84
Figura 4.24- Imagem da interface entre as regiões da ADF e do metal solidificado, obtidas com detector de elétrons retroespalhados (BSE) em MEV.	85
Figura 4.25- Mapeamento por Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) dos elementos químicos presentes nas regiões da ADF e do metal solidificado	86
Figura 4.26- Imagens da interface ADF e metal solidificado em MEV. Em (a) Imagem realizada com detector de elétrons retroespalhados (BSE); e em (b) imagem realizada com detector de elétrons secundários (SE)	87

LISTAS DE TABELAS

Tabela 4 1- Análises iniciais das areias estudadas	55
--	----

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO.....	14
2- REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1- O PROCESSO DE FUNDIÇÃO	16
2.2- PROCESSO DE MOLDAGEM EM AREIA A VERDE.....	18
2.2.1- Areias base	19
2.2.2- Bentonita.....	21
2.2.3- Aditivos	24
2.3- PROPRIEDADES DAS AREIAS A VERDE.....	24
2.4- SISTEMAS DE CANAIS DE VAZAMENTO.....	28
2.5- PROCESSO DE MOLDAGEM COM SILICATO DE SÓDIO/CO ₂	30
2.6- ASPECTOS AMBIENTAIS DA ADF	32
3- MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1- PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DAS AREIAS ESTUDADAS	37
3.1.1- Preparação das amostras das areias de fundição.....	38
3.2- A INTERAÇÃO DAS AREIAS COM SILICATO DE SÓDIO/CO ₂	43
3.2.1- Preparação dos corpos-de-prova das areias em diferentes adições da solução de silicato de sódio.....	44
3.2.2- Análises das areias com o agente ligante silicato de sódio/CO ₂	46
3.2.2.1- Resistência mecânica	46
3.2.2.2- Microscopia ótica.....	47
3.2.2.3- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).....	47
3.2.2.4- Difração de raios X	48
3.3- MOLDE DE ADF COM SILICATO DE SÓDIO/CO ₂	48
3.3.1- Preparação do molde de ADF com silicato de sódio/CO ₂	49
3.3.2- Análise microestrutural da ADF após o processo de vazamento	52
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1- CARACTERIZAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)	54
4.2- CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS A VERDE DE FUNDIÇÃO LIGADAS COM SILICATO DE SÓDIO/CO ₂	61

4.2.1- Propriedades mecânicas das areias a verde de fundição ligadas com silicato de sódio/CO ₂	62
4.2.2- Caracterização das areias de fundição com o agente ligante silicato de sódio/CO ₂	68
4.3- MOLDE DE AREIA DESCARTADA LIGADA COM SILICATO DE SÓDIO/CO ₂	80
4.3.1- Preparação e desmoldagem do molde de ADF ligada com silicato de sódio/CO ₂	81
5- CONCLUSÕES.....	89
6- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS	92

1-INTRODUÇÃO

As indústrias de fundição buscam a sustentabilidade em suas atividades para que sejam condizentes com os aspectos ambientais gerados em suas atividades e, ao mesmo tempo, atendam os requisitos legais impostos pelos órgãos ambientais.[1] Os aspectos ambientais gerados pelas atividades da indústria de fundição são as quantidades de vapores e gases, materiais particulados e o excesso de areias descartadas.[2]

Areias de fundição são conceituadas como a mistura de três componentes básicos: um material granulado denominado areia base, um aglomerante compatível como a bentonita e aditivos. Areia a verde é um tipo de areia de fundição constituída normalmente de sílica, de argila como aglomerante e de aditivos carbonáceos, como o pó de carvão Cardiff, celulósicos, amidos e dextrinas, os quais dependem do tipo de peça a ser produzida.

Este tipo de areia pode ser reutilizada em diversos ciclos de moldagem e, por este motivo, e pela facilidade de uso, é um dos materiais mais utilizados nas indústrias de fundição. No entanto, o contato com o metal líquido causa a desativação gradual da argila, gerando materiais inertes que se concentram na areia e limitam os ciclos longos de reuso.

Para resolver o problema, estas indústrias adicionam materiais primários novos. Com isto, surgem excedentes de areias e a consequente necessidade do descarte para manter o fluxo constante de materiais. Estas areias descartadas do processo são aqui denominadas ADF (areia descartada de fundição).

Muitas vezes, a ADF é acondicionada em aterros industriais localizados distante da indústria de fundição, onerando seu transporte; ou são colocadas em aterros dispostos no espaço físico da indústria, impedindo a expansão da atividade produtiva da indústria de fundição.

Atualmente, a ADF está sendo reconhecida como fonte não poluente pelo setor de fundição e pode ser considerada como um resíduo potencialmente reciclável, desde que seja devidamente gerenciado, administrando sua segregação, acondicionamento e custos. [3]

Um incentivo à reciclagem foi a elaboração da norma ABNT NBR 15.984/2011, que estabelece o gerenciamento da ADF para armazenagens temporárias e definitivas em outros locais que não sejam os aterros industriais de

vários resíduos. [4]

Além da areia a verde, um processo bastante conhecido é o da moldagem com areia base de sílica ligada com silicato de sódio/ CO_2 . Este processo apresenta menor impacto ambiental em relação a outros que utilizam aglomerantes poliméricos, como resinas. No entanto, os moldes produzidos apresentam baixa refratariedade e "colapsibilidade", ou seja, dependendo da adição da solução de silicato de sódio, podem ser difíceis de serem quebrados para a retirada das peças fundidas após a solidificação.[5]

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o potencial do reaproveitamento de areias a verde descartadas de fundição na fabricação de elementos de moldes utilizando silicato de sódio/ CO_2 como ligante. Neste sentido, os objetivos específicos desta pesquisa buscaram conhecer os mecanismos envolvidos na interação dos componentes da areia a verde com o silicato de sódio antes e após reação com CO_2 e verificar suas propriedades mecânicas.

2- REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo trata de aspectos relacionados às areias a verde de fundição e ao processo silicato de sódio/CO₂. Na oportunidade trata dos componentes principais das areias, sua caracterização; e finalmente, aborda questões relacionadas aos descartes de areias e aos impactos ambientais associados.

2.1- O PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Há mais de quatro milênios, a fundição é utilizada pelo homem, na fabricação, inicialmente, de objetos de cobre, ouro, prata e ligas de cobre.[5]

As indústrias de fundição de ferro fundido são as indústrias de fundição mais antigas do Brasil.[6] Dados recentes disponíveis na Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) mostram que 275.061 t de peças metálicas ferrosas e não ferrosas foram produzidas no mês de março de 2012. Diariamente há aproximadamente 12.503 t de peças metálicas prontas para serem utilizadas nas mais diversas aplicações. Pode-se verificar que neste mesmo período, os principais materiais de ligas metálicas exportados foram: 47.046 t de peças ferrosas fundidas e 1.462 t de peças não ferrosas fundidas.[7]

Fundição é o processo de fabricar peças metálicas a partir do preenchimento de moldes, permanentes ou não permanentes, com metais líquidos. Os moldes permanentes permitem obter uma série de peças sem a necessidade de perdê-los na extração. Ao contrário, os moldes não permanentes são destruídos para a retirada da peça solidificada, ou seja, permitem a produção de uma única peça, e são normalmente cerâmicos.

Para a confecção dos moldes não permanentes é necessário a utilização de modelos de fundição. Os modelos são elementos que podem ser fabricados em madeira, isopor, ceras, materiais cerâmicos e polímeros, que se assemelham à peça a ser fundida, sendo aplicados para gerar a cavidade do molde.

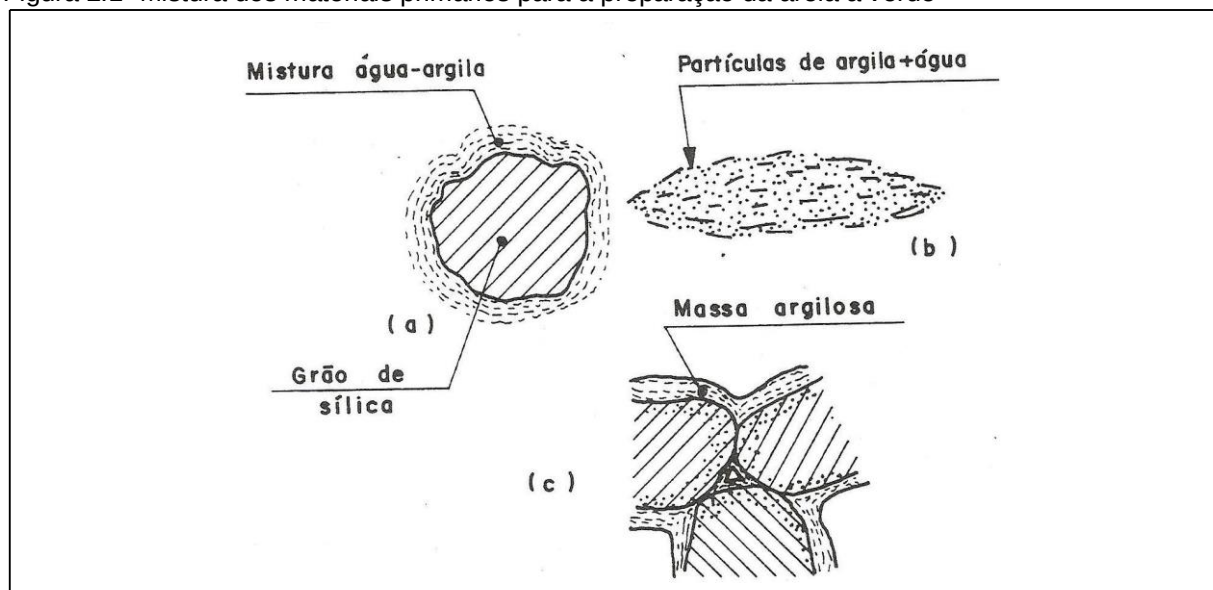
Outros elementos empregados nos moldes não permanentes são os machos. Eles atuam na produção de furos passantes ou rebaixos. Normalmente são fabricados separadamente e colocados na cavidade do molde após a extração do modelo.

Os moldes não permanentes são amplamente utilizados na confecção de

peças ferrosas e não ferrosas, e na maioria dos processos são fabricados a partir das chamadas areias de fundição. Conceitua-se “areias de fundição” à mistura de três componentes: areia base, aglomerantes e aditivos.[8]

Um dos processos mais difundido é da areia a verde, que consiste na mistura dos materiais primários: areia base de sílica, argila, água e aditivos.[2] A figura 2.1 exibe a mistura adequada dos materiais primários para preparar uma areia a verde. A figura 2.1 (a) mostra que cada grão de areia base deve ser envolvido por um filme ou uma camada de argila umedecida; a água é adsorvida nas lamelas da argila, formando as partículas de argila e água, na figura (b). A mistura ideal ocorre quando os grãos de areia base são aglomerados com a argila, como mostra a figura 2.1 (c).

Figura 2.1- Mistura dos materiais primários para a preparação da areia a verde



Fonte: SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de fundição aglomeradas com argila.** Belo Horizonte: DFP/DAT, v.1, 1987. [8]

Os moldes não permanentes em areia a verde são um dos processos de fundição mais antigos e mais utilizados no mundo, em torno de 80% das indústrias de fundição utilizam este processo de moldagem.[8-11] Desde as décadas de 1960 e 1970, a areia a verde vem sendo estudada de forma teórica e na realização de experimentos.[12]

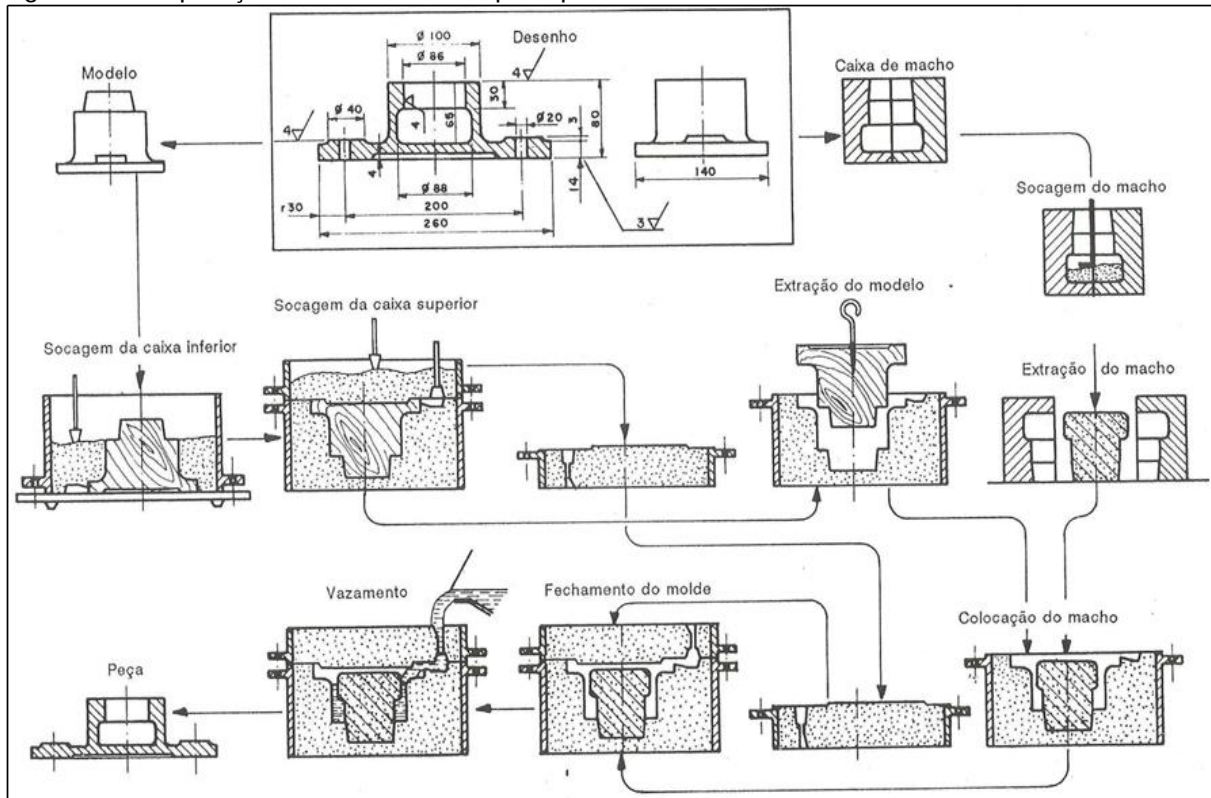
Neste trabalho será dada ênfase ao processo de moldagem realizado em areias a verde de fundição.

2.2- PROCESSO DE MOLDAGEM EM AREIA A VERDE

O termo “areia a verde” decorre da utilização da mistura de seus componentes com um teor controlado de água, de forma a otimizar as propriedades desta areia, sem a necessidade de realizar qualquer tratamento térmico de endurecimento anterior ao vazamento do metal.

Esse processo consiste na compactação, mecânica ou manual, da mistura com a utilização do modelo da peça montado em uma caixa de moldagem.[13] A figura 2.2 mostra o processo de moldagem em areia a verde, exemplificando a preparação de um molde completo por areia a verde.[14]

Figura 2.2- Preparação de um molde completo por areia a verde



Fonte: SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Iniciação à Fundição - Fundição**. Belo Horizonte: DFP/DAT, 1990.[14]

Apesar do conceito de areia a verde citar o uso de argilas em geral, as indústrias de fundição empregam, quase que exclusivamente, as argilas bentoníticas. A denominação bentonita é utilizada para indicar uma argila com grande quantidade de montmorilonita, com estrutura mostrada no item 2.2.2.[15,16]

Uma das grandes vantagens do processo de areia a verde é o fato das

areias poderem ser reutilizadas após a desmoldagem. Após a quebra do molde, é possível recuperar as propriedades desta areia de moldagem pela simples correção de seus componentes. A utilização da bentonita na preparação de moldes de areia a verde garante 90% da recuperação de seus constituintes após um tratamento mecânico e adição de água.[17]

Ziolkowski e colaboradores[18] afirmam a necessidade de otimizar e estabilizar os parâmetros de controle da areia a verde para que a mesma mantenha suas características para a moldagem. Os moldes de areia a verde geralmente possuem resistência nominal à compressão a $18,5\text{N/cm}^2$. [19,20] Este valor é pequeno comparado a outros materiais cerâmicos, por isto, os moldes devem ser preparados em caixas de moldagens para que sejam compactados, transportados e suportem o vazamento dos metais em seu interior.[13]

2.2.1- Areias base

As areias base são os principais materiais primários que compõem as areias de fundição e são responsáveis pelas suas principais propriedades.

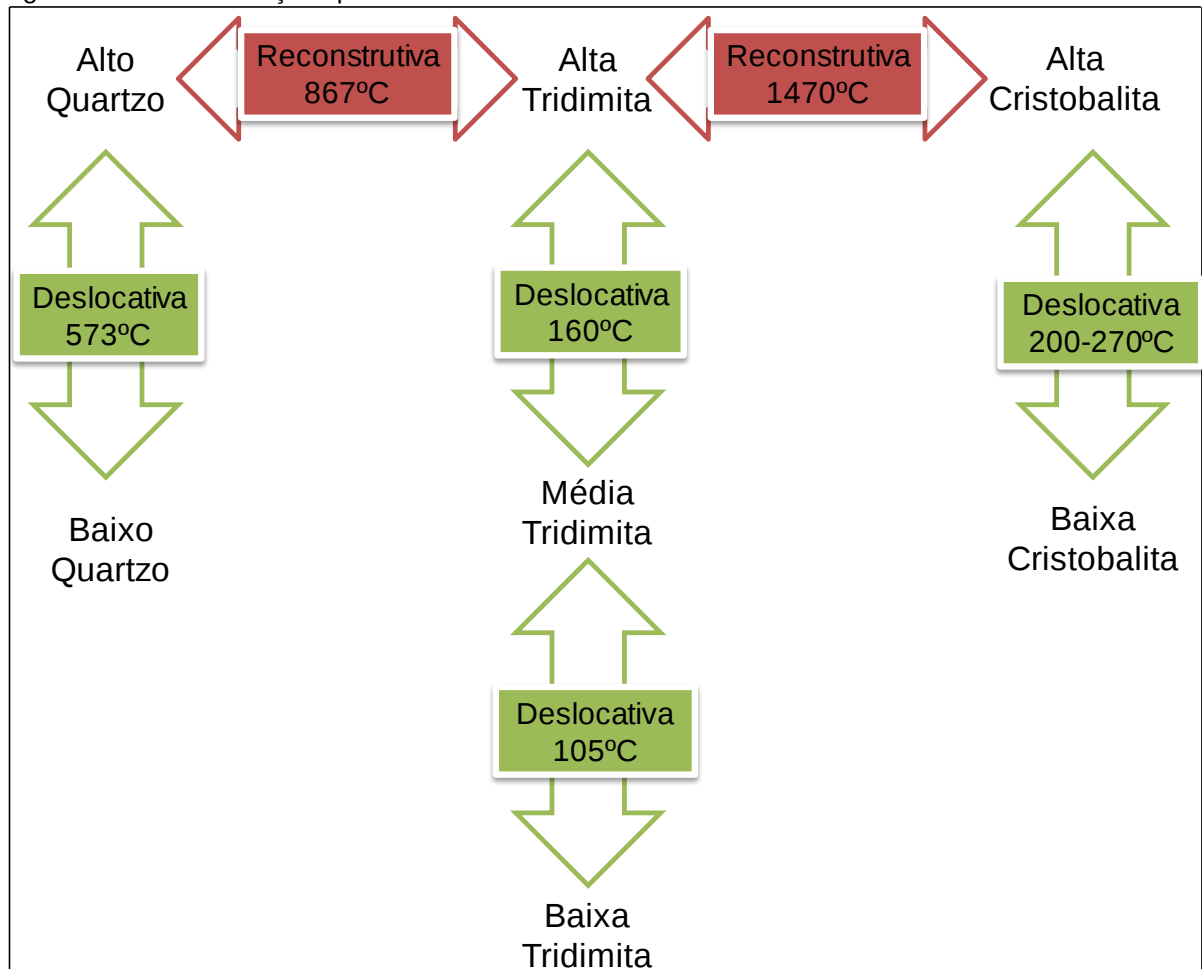
As principais areias base utilizadas nos processos de fundição são as areias de sílica, olivina, chamote, zircônia e cromita. A escolha do tipo de areia a ser utilizada nas indústrias de fundição depende do processo de moldagem empregado.

Dentre as areias de fundição mais utilizadas destacam-se as areias base de sílica, pois estas apresentam um elevado ponto de fusão, são abundantes e baratas. A sílica possui três principais fases polimórficas: quartzo, cristobalita e tridimita, as quais são transformações reconstitutivas.

As estruturas cristalinas dessas fases são formadas por diferentes arranjos de tetraedros SiO_4 e cada fase possui outras subfases, as quais possuem maior simetria com o aumento da temperatura.[21]

Na figura 2.3 são apresentadas as fases da sílica com a temperatura. Pode-se observar que as transformações deslocativas ocorrem entre as subfases e as transformações reconstitutivas são decorrentes das mudanças de fase, ambas as transformações são reversíveis.[22]

Figura 2.3- Transformações polimórficas da sílica



Fonte: Adaptado de CHIANG, Y.; BIRNIE III, D.; KINGERY, W.D. **Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering**. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 1997.[22]

A areia base de sílica empregada nas indústrias de fundição apresenta-se na maioria das vezes como quartzo (baixo quartzo), de densidade $2,65 \text{ g/cm}^3$. [8] Assim, especificamente, a figura 2.3 mostra na temperatura de 573°C uma transformação deslocativa do quartzo baixo para o quartzo alto, na qual ocorre apenas uma mudança nas posições dos átomos, que acarreta um aumento de volume na estrutura da sílica de 0,8%. [22,21]

Nos processos de vazamento, o calor gerado na camada de areia que entra em contato com o fluxo de metal líquido, favorece esta transformação deslocativa; porém, não influencia significativamente na integridade do molde, a ponto de ocasionar defeitos na peça fundida. [8]

O contato com o fluxo de metal líquido faz com que as areias a verde percam gradativamente a umidade pelo efeito de evaporação, assim como o pó de carvão, que atua como um aditivo na areia a verde em fundições de peças ferrosas,

é eliminado pela combustão, e as propriedades mecânicas, refratárias e permeabilidade também são reduzidas. Estas areias podem voltar ao processo de moldagem após o restabelecimento de suas propriedades; e assim, passam a ser chamadas de areias recuperadas, de recirculação ou areias de retorno.[2]

As areias que são utilizadas nos moldes contêm areia de retorno, areia base nova, aditivos e água, os quais são misturados em um misturador para posterior emprego na preparação de novos moldes de areia.[13]

2.2.2- Bentonita

A bentonita caracteriza-se como sendo um argilomineral de montmorilonita composto de 5 a 10% de óxidos alcalinos terrosos, possui alto poder de adsorção e boas propriedades coloidais, além disso, são hidrofílicas e possibilitam a propriedade de plasticidade.[16]

Dependendo de suas impurezas, a bentonita pode ter uma variedade de colorações como branco, preto ou marrom. Esta argila encontra-se naturalmente no subsolo, e ao ser extraída, pode apresentar brilho, no entanto, em contato com o ar, esta argila perde sua coloração tornando-se acinzentada.[16] A adição de bentonita na areia base possibilita a aglomeração da areia base de sílica favorecendo a plasticidade nos moldes de areia a verde.

A argila bentonítica umedecida interage com as areias base envolvendo os grãos e aglutinando-os, sendo um material primário na preparação da areia a verde. A adição de bentonita na areia base fornece a resistência mecânica necessária para que os moldes e machos possam ser submetidos a todo processo de moldagem, vazamento do metal e desmoldagem.[13]

A estrutura da montmorilonita consiste em folhas tetraédricas e octaédricas que se arranjam formando lamelas. A montmorilonita é um argilomineral 2:1, ou seja, suas lamelas são formadas por duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica.[23,24]

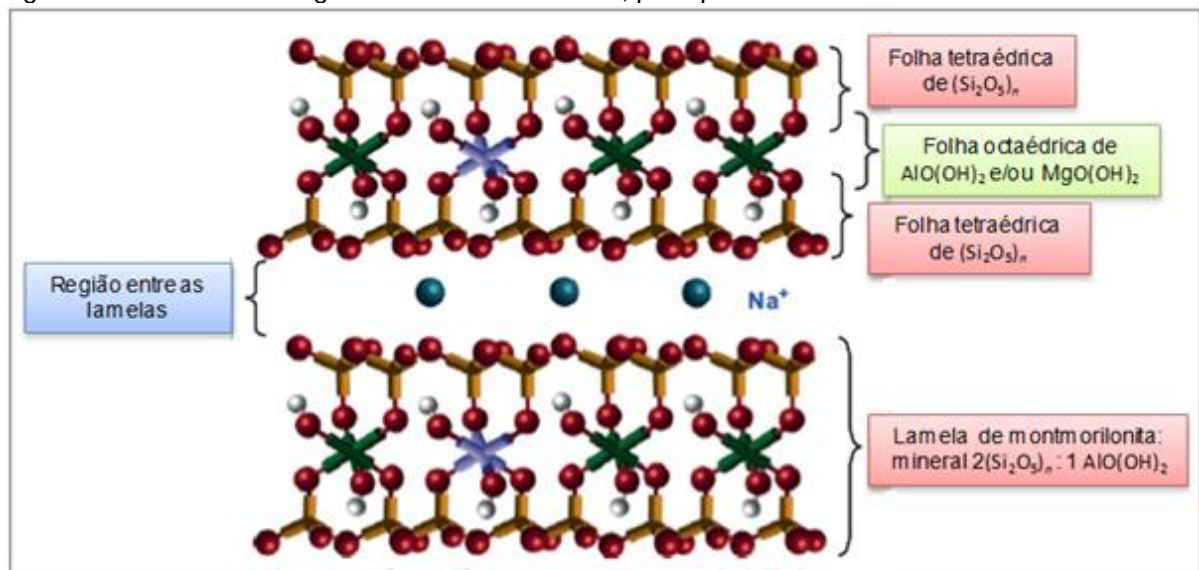
As folhas tetraédricas são formadas por tetraedros de Si-O que compartilham entre si os átomos de oxigênio. Cada tetraedro compartilha três cantos com três tetraedros vizinhos, conferindo uma fórmula estrutural de $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n$ para cada folha tetraédrica de montmorilonita. Já as folhas octaédricas são formadas por cátions (Al^{3+}) ligados em ânions (OH^-) e (O^{2-}) resultando em uma fórmula química

efetiva de $\text{AlO}(\text{OH})_2$. [24]

Na folha octaédrica alguns cátions de alumínio (Al^{3+}) podem ser substituídos por cátions magnésio (Mg^{2+}). [25,26] A diferença de valências entre estes cátions cria cargas negativas distribuídas entre as lamelas da argila, as quais são equilibradas por íons positivos, normalmente por cátions sódio (Na^+). [23] Conforme o elemento químico que está ligado à sua estrutura, a bentonita pode ser cálcica, sódica ou policatiônica. [27]

A figura 2.4 exibe a estrutura esquemática das lamelas de montmorilonita. O empilhamento das lamelas forma as partículas desta argila. Observa-se que se trata de uma montmorilonita sódica, pela presença de cátions sódio na região entre as lamelas. Esta região poderia conter cátions de cálcio, caracterizando esta estrutura como montmorilonita cálcica, ou mesmo a presença de cátions de cálcio e de sódio, sendo assim, uma montmorilonita policatiônica. [23]

Figura 2.4- Estrutura da argila montmorilonita sódica, principal constituinte da bentonita



Fonte: Adaptado de PAUL, D. R.; ROBESON, L. M. Polymer nanotechnology: Nanocomposites. **Polymer**, Austin, v. 49, p. 3187-3204, 2008. [23]

Os cátions na região entre as lamelas de montmorilonita podem ser hidratados, acarretando o acúmulo de moléculas de água nesta região e causando o inchamento ou expansão de suas lamelas. [24] No entanto, ao perder água a mesma desincha e a sua superfície se apresenta macia e seca. [16]

A capacidade de troca catiônica (CTC) representa a quantidade de cátions que podem ser substituídos por outros. O valor é expresso em mili-equivalentes por

100g de argila calcinada a 1000°C (meq/100g). A CTC da montmorilonita está entre 60 a 120 meq/100g,[8] permitindo que sua modificação química interfira nas suas propriedades físico-químicas, sem alterar sua estrutura cristalina.[24] Além disso, possibilita a adsorção de compostos inorgânicos e orgânicos e permite que a montmorilonita seja empregada em diversas aplicações industriais.[27] A capacidade de troca catiônica que ocorre na bentonita é o sinônimo de bentonita ativa.[17]

Observa-se que quanto maior a possibilidade de substituir os cátions Ca^{2+} por Na^+ na bentonita, maior é a plasticidade do molde de areia a verde.[17] Os cátions de sódio são menores que os cátions de cálcio, isso permite que a água tenha maior facilidade de hidratação. Em consequência, a distância entre as lamelas torna-se maior quando a bentonita é sódica.[24]

A bentonita cálcica pode ser facilmente convertida em bentonita sódica, quando na presença de soluções de íons sódio. Comercialmente, a conversão se faz através do uso do carbonato de sódio (barrilha) em água. Este beneficiamento é também denominado de ativação da bentonita ou bentonita ativada, resultando em uma bentonita quimicamente sódica.[28]

O termo “bentonita ativa” refere-se a adsorção ótima de água nas lamelas da argila que possibilita a plasticidade deste material quando adicionado a areia base de sílica para a preparação da areia a verde de fundição. Para determinar quantitativamente o teor de argila ativa, ou seja, a capacidade de troca catiônica das argilas emprega-se uma solução de azul de metileno 0,01mol/L devidamente padronizada.[29]

Nas superfícies próximas ao metal solidificado, aproximadamente 5mm [5] no molde de areia a verde, a bentonita em contato com a alta temperatura torna-se inerte ou calcinada e grande parte desta argila fica aderida aos grãos de areia em camadas contínuas.[30,31] Este material contaminante se mistura com os materiais ainda ativos dos moldes.

A concentração de inertes deve ser controlada na areia a verde para o seu reuso. Nos processos industriais isto é realizado com a adição de novos materiais primários. Porém, isto gera um excesso de areia a verde no sistema que deve ser removido. Este excesso denomina-se areia de descarte e geralmente pode apresentar excelentes propriedades para a moldagem.

2.2.3- Aditivos

Os aditivos são materiais primários, juntamente com a areia base e a argila, na preparação da areia a verde. A adição de aditivos nas areias a verde tem o objetivo de melhorar suas propriedades. No entanto, a maioria dos aditivos têm efeitos colaterais adversos.

Os aditivos orgânicos utilizados na areia a verde podem ser os carbonáceos (pó de carvão ou carvão Cardiff), celulósicos (pó-de-madeira, cascas moídas de milho, aveia e de certas nozes), e amidos e dextrinas (obtidos da mandioca e do milho).[32]

A aplicação do carvão Cardiff na areia a verde é comum nas indústrias de fundição de ferros fundidos.[33] Porém, há restrições para materiais ferrosos com baixo teor de carbono.

Na pirólise do carvão, quando o metal é vazado no molde, na interface metal-molde ocorre a volatilização dos hidrocarbonetos, os quais proporcionam uma atmosfera redutora e o carbono reage com o oxigênio para evitar a oxidação da superfície.[13,33] Ou seja, o uso do pó de carvão Cardiff é aplicado para formar um ambiente redutor e minimizar a oxidação do metal que flui no interior do molde.

O emprego de aditivos carbonáceos pode ocasionar efeitos não desejáveis nas areias a verde, como possibilitar o aumento da quantidade de água necessária para umedecer o aditivo nestas areias e acumular cinzas, interferindo na sua refratariedade. Parte dos voláteis condensa após migrarem para o interior da parede do molde e são depositados sobre os grãos de areia. Estes efeitos podem ser diminuídos pela adição de areia base na areia de retorno.[32]

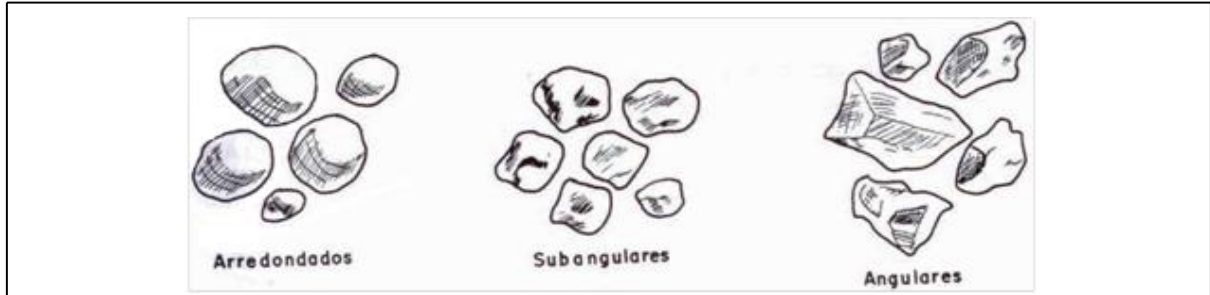
2.3- PROPRIEDADES DAS AREIAS A VERDE

As principais propriedades esperadas das areias a verde são: permeabilidade, moldabilidade; resistência mecânica à compressão, refratariedade, colapsibilidade.[31] Um dos fatores que pode afetar as propriedades das areias a verde é a geometria dos grãos de areia.

A maneira mais comum de observar os grãos de areia é pela lupa e por meio de um microscópio estereoscópico. Pela figura 2.5, verifica-se que os grãos de areia podem ser arredondados, como apresenta a figura 2.5 (a); em (b) grãos

subangulares; e em (c) grãos angulares.[34]

Figura 2.5- As diferentes formas que o grão de areia base pode apresentar. Em (a) grãos arredondados; em (b) grãos subangulares; e em (c) grãos angulares

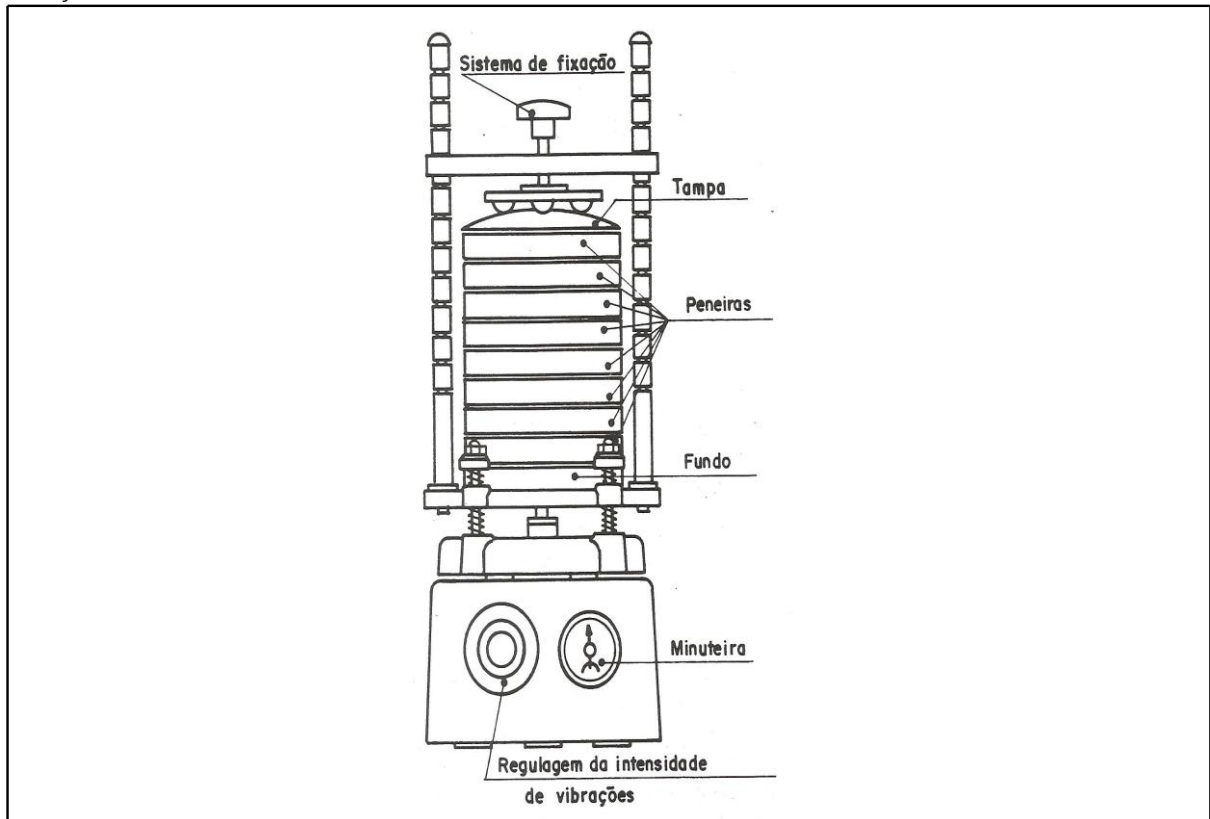


Fonte: SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de fundição aglomeradas com argila.** Belo Horizonte: DFP/DAT, v.2, 1987.[34]

O formato do grão é importante para as propriedades de escoabilidade, compactação, permeabilidade e resistência mecânica. Os grãos angulares possuem escoabilidade e compactação menores, e segundo Siddique et al.[9], podem apresentar resistência maior que os grãos arredondados.

O tamanho dos grãos da areia base normalmente é determinado pelo módulo de finura (MF) que corresponde à média ponderada dos tamanhos de grãos. Cada peneira tem um fator de importância segundo recomendações técnicas da AFS (*Society Foundry American*), obtidos pelo peneiramento de uma amostra de areia em um peneirador mecânico, que apresenta a série de peneiras ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para as atividades de fundição com aberturas de malhas 6,12,20,30,40,50,70,100,140,200, 270 mesh acompanhadas de prato coletor (fundo).[31,34] Para melhor ilustrar a determinação do tamanho dos grãos de areia base, a figura 2.6 mostra o peneirador mecânico acompanhado das séries de peneiras ABNT para fundição.

Figura 2.6- Exemplo de peneirador mecânico acompanhado das séries de peneiras ABNT para fundição



Fonte: SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de fundição aglomeradas com argila**. Belo Horizonte: DFP/DAT, v.3, 1987.[31]

A granulometria dos grãos influencia na moldabilidade da areia, reconhecida pela habilidade que a areia possui de reproduzir as formas do modelo quando compactada para a preparação de moldes. Quanto maior for a moldabilidade, maior são os detalhes reproduzidos pela superfície do modelo.[34]

A moldabilidade representa a consistência, escoabilidade e plasticidade da areia a verde.[34] O ensaio que determina a moldabilidade por normas técnicas denomina-se ensaio de compactabilidade.

A areia a verde obtém certa coesão ou resistência mecânica após ser compactada no interior do molde, resultante da ação conjunta dos grãos da areia base, da argila, da umidade e das características da compactação. O molde de areia a verde deve ser resistente para não deformar ou quebrar na extração do modelo, no manejo, na alocação de machos, e também no vazamento do metal líquido.

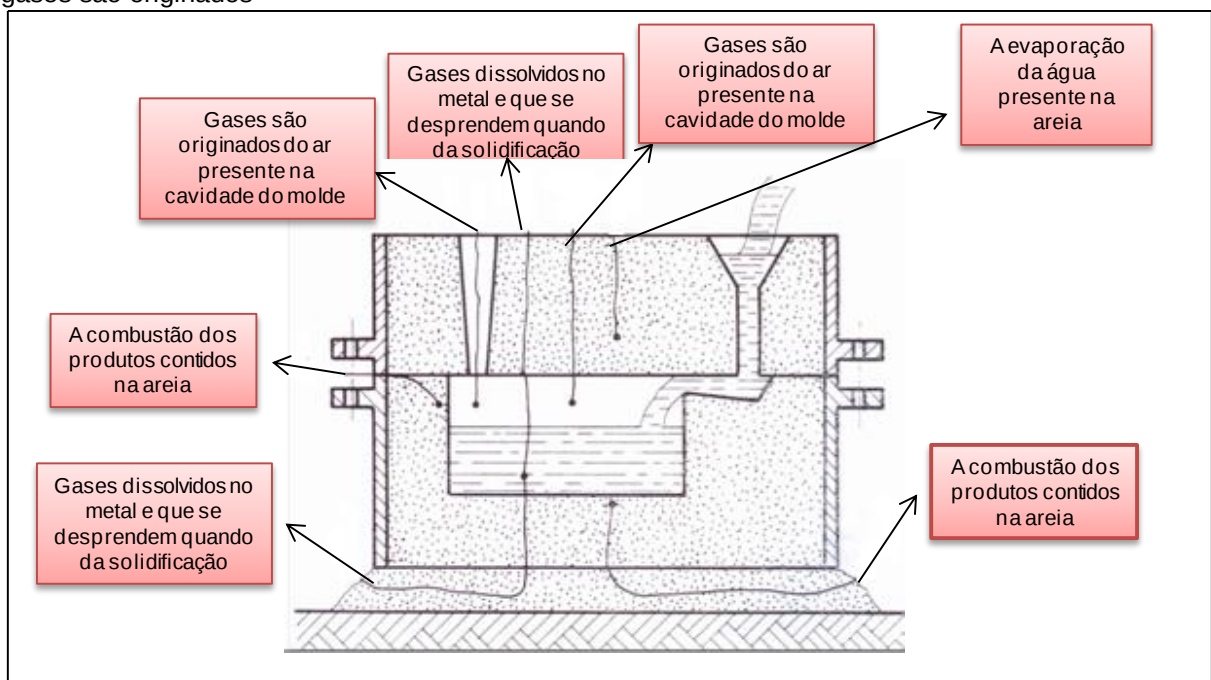
O tamanho do grão médio da areia base influencia na resistência mecânica dos moldes, porque quanto maior o tamanho de grão, menor sua resistência.[34] Outro fator importante é a distribuição do tamanho de grão, que afeta diretamente a

permeabilidade dos moldes. Uma distribuição homogênea, tanto em partículas do mesmo tamanho, quanto distribuídas igualmente entre as peneiras da série padrão, são indesejadas, pois faz diminuir significativamente a permeabilidade.[34]

A permeabilidade está diretamente relacionada com a área específica dos grãos, ou seja, para uma mesma concentração, quanto maior o tamanho de grão (ou menor módulo de finura) maior a permeabilidade. A permeabilidade é uma propriedade importante para permitir a saída de gases gerados nas cavidades do molde.

Os gases são originados do ar presente na cavidade do molde, como mostra a figura 2.7 (a); em (b) da combustão dos produtos contidos na areia; em (c) a evaporação da água presente na areia ou em (d) de gases dissolvidos no metal e que se desprendem quando da solidificação.[34]

Figura 2.7- Corte transversal de um molde com partição horizontal apresentando os pontos onde os gases são originados



Fonte: SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de fundição aglomeradas com argila**. Belo Horizonte: DFP/DAT, v.2, 1987.[34]

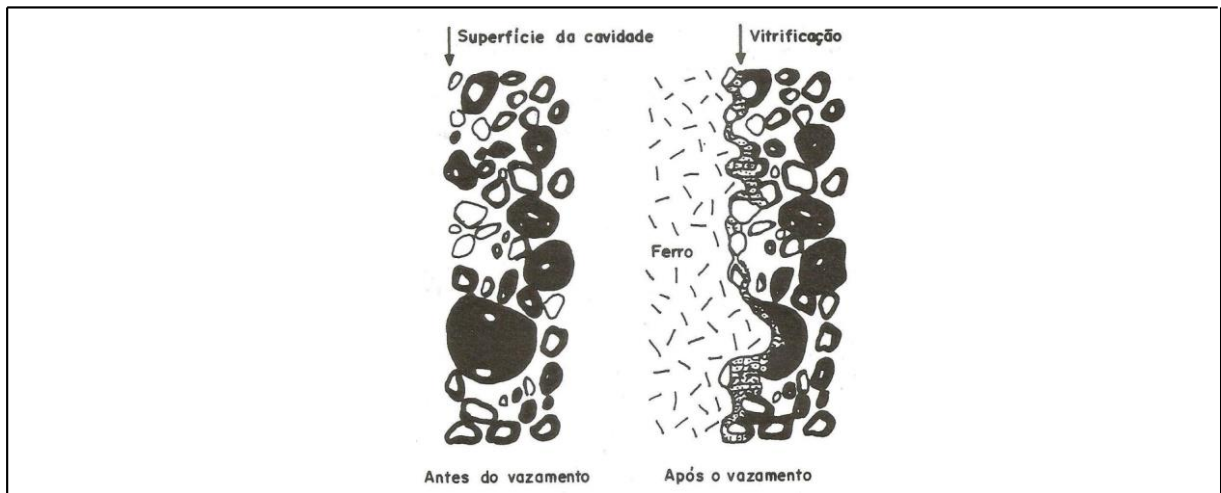
Ferreira[5] relata que as areias são utilizadas no processo de fundição justamente porque possuem a versatilidade de não se fundir e nem amolecer quando recebem o metal líquido a ser vazado no molde. Este comportamento reflete sua propriedade refratária. Porém, a presença de muitas camadas de bentonita inertizadas termicamente podem diminuir a refratariedade das areias no processo de

moldagem,[31] levando a defeitos como a sinterização de areias nas peças e penetração.

A figura 2.8 apresenta uma areia a verde com bentonita inerte antes e após o processo de vazamento de um ferro fundido.[31]

A presença do óxido de ferro como impureza na areia ou gerado pela oxidação do metal fundido age diretamente na diminuição da refratariedade, principalmente na região da interface entre a peça fundida e o molde, onde pode ocorrer fusão dos materiais de moldagem.[5]

Figura 2.8- Representação de uma areia com bentonita inerte, antes e após o processo de vazamento de ferro fundido



Fonte: SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de fundição aglomeradas com argila**. Belo Horizonte: DFP/DAT, v.3, 1987.[31]

2.4- SISTEMAS DE CANAIS DE VAZAMENTO

No interior das caixas de moldagem atuam os sistemas de canais de vazamento que conduzem o metal líquido, proveniente da panela de vazamento, até o interior do molde em uma temperatura e tempo determinados.[35]

Os alimentadores, como os massalotes, são recipientes que armazenam o metal líquido e atuam no momento em que o metal está solidificando, para compensar sua contração. Por isso, os alimentadores localizam-se nas regiões que deverão solidificar em último lugar, denominados de pontos quentes.[5]

Também atuam no interior do molde os resfriadores e os respiros. Os

resfriadores são peças metálicas que, ao entrar em contato com o metal líquido, auxiliam na solidificação da peça fundida. Os respiros são canais que permitem a saída de ar e de gases oriundos do processo de vazamento.[5]

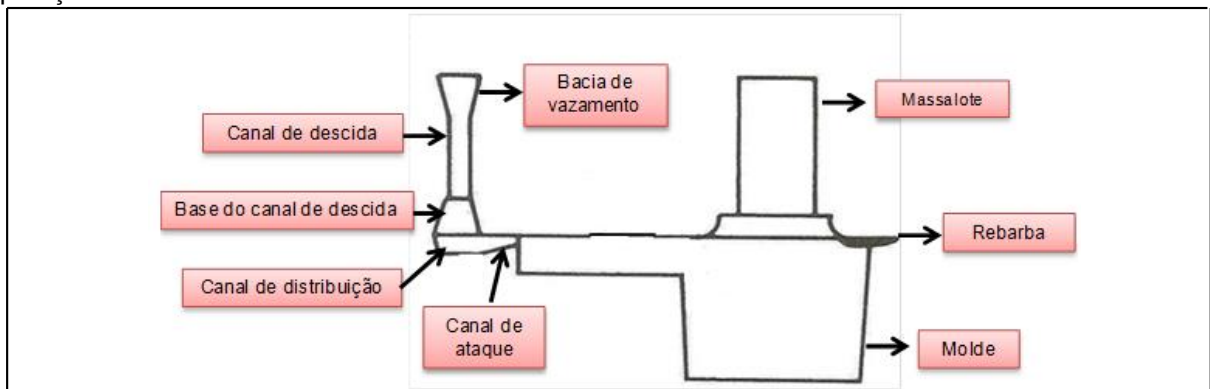
Dependendo do tamanho do molde pode-se empregar o copo, funil ou bacia de vazamento, este elemento é colocado sobre o canal de descida e ao serem mantidos totalmente preenchidos de metal líquido, impede a entrada de ar ou de escórias na cavidade.[36]

Na base do canal de descida, o fluxo do metal líquido muda repentinamente de direção e tem maior velocidade, por isso, seu formato deve ser suavemente convergente para possibilitar um fluxo em forma de filetes de metal líquido paralelos ao eixo do canal, evitando a turbulência do metal líquido no preenchimento do molde e a erosão da areia a verde.[36]

O canal de distribuição permite a repartição do fluxo do metal líquido para os canais de ataque. E os canais de ataque, conectam o canal de distribuição à peça, sendo aonde o metal não tem tempo suficiente para sofrer uma diminuição notável de temperatura. Já o sistema de retenção de escórias previne a formação de inclusões na peça fundida.[36]

Na figura 2.9 são apresentados os elementos do molde de fundição, mostram os canais de ataques que iniciam no topo do canal de distribuição e que se prolonga até à cavidade do molde.

Figura 2.9- Elementos básicos de um sistema de canais de vazamento para moldes com linha de partição horizontal



Fonte: SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Fundição: Acabamento e rebarbagem de peças fundidas.** Belo Horizonte: DFP/DAT, 2 ed.,v.3, 1987.[37]

2.5- PROCESSO DE MOLDAGEM COM SILICATO DE SÓDIO/CO₂

Nas indústrias de fundição, a aplicação do silicato de sódio/CO₂ como agente ligante nas areias ocorreu a partir de 1950.[5,38] A utilização de silicato de sódio e a gasagem de gás carbônico (CO₂) para moldes de areias foi patenteada na Tchecoslováquia por Petrzela em 1948. A necessidade de aumentar a produção sem prejudicar a precisão das dimensões das peças fundidas facilitou a aceitação do processo de moldagem por estas indústrias.[38]

Este processo consiste em misturar cerca de 3 a 4% em peso de silicato de sódio na areia, a qual, ao ser compactada, adquire resistência mecânica à temperatura ambiente, podendo assim produzir moldes e machos. Uma vez preparado o molde ou o macho, ocorre a gasagem de CO₂, em torno de 11% relativo à massa de silicato de sódio⁵ ou uma relação de 0,2% a 1% de CO₂ por 1% de silicato de sódio.[10]

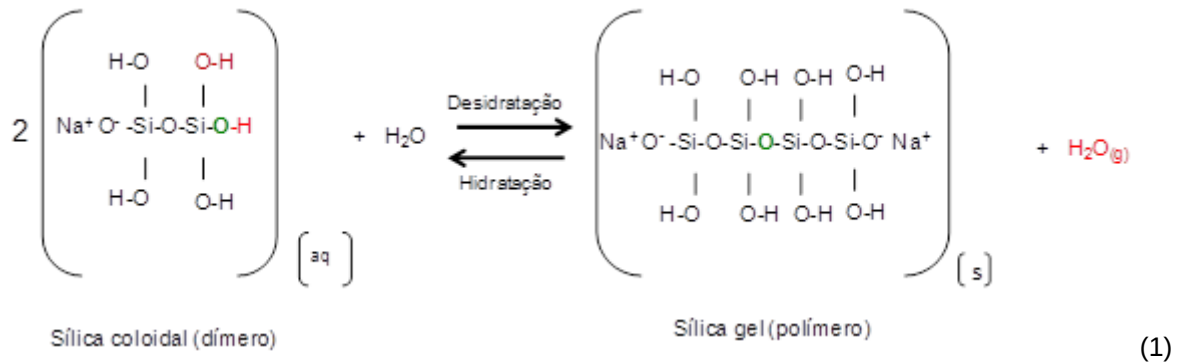
Os cristais de silicato de sódio hidratados contém sílica coloidal (SiO₂.2H₂O) e quando expostos ao gás carbônico, formam um gel “in situ”, aumentando a viscosidade. A sílica gel atua como adesivo quando empregado em grandes quantidades e pode-se dizer que a sílica gel atua como um cimento ao se empregar pequenas quantidades.[38]

A mudança de fase da solução de silicato de sódio para um sólido ocorre nas areias de fundição pelo mecanismo de desidratação e pela mudança de pH ³⁸, que são:

- mecanismo de desidratação: mudança de fase da solução de silicato de sódio (na forma líquida) para fase vítrea (na forma sólida) pela perda de água; e
- mecanismo pela mudança de pH: reação química, pela alteração de pH, entre a solução de silicato de sódio e um reagente ácido, com a formação de novos produtos na forma de géis.

O mecanismo de desidratação da solução de silicato de sódio atua nas areias de fundição quando há calor suficiente para evaporar a água da solução e do teor de umidade das areias.[10,38] Para que haja a perda de água, pode-se empregar o ar de convecção a quente; a exposição à energia de microondas; ou a reação exotérmica resultante a partir de compostos orgânicos e inorgânicos. Na

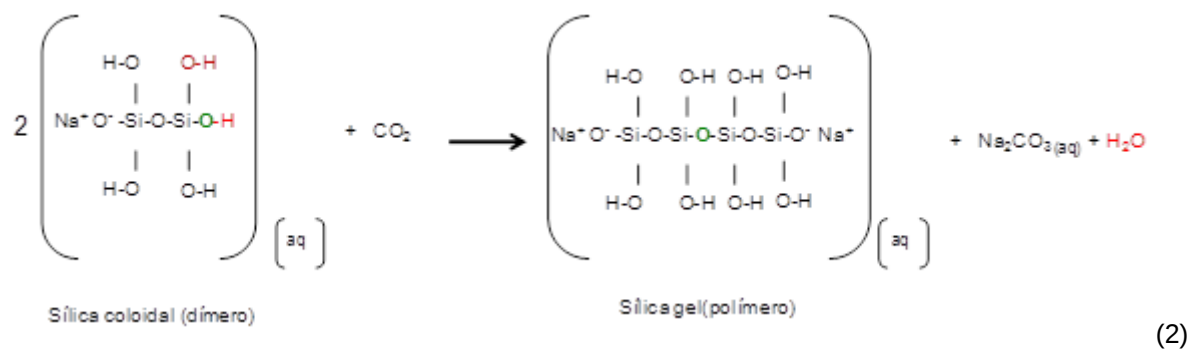
equação química (1) é apresentada a formação do silicato de sódio na forma de polímero, chamado de sílica gel.[38]



Fonte: Adaptado de OWUSU, Y.A. Physical-chemical study of sodium silicate as a foundry sand binder. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 18, p. 57-91, 1982.[38]

O mecanismo pela mudança de pH envolve a reação entre um reagente que atua como endurecedor e a solução de silicato de sódio que reveste os grãos de areia. Durante a reação ocorre a diminuição de pH pela formação de espécies ácidas, facilitando a precipitação da sílica gel que atua unindo os grãos de areia.[38,10] O gás carbônico é um reagente que modifica o pH, por isso, ele é empregado nas indústrias de fundição para solidificar o molde, em um processo chamado moldagem em areia silicato de sódio/CO₂. [38,39]

A aplicação de CO₂ nas areias de fundição favorece a formação do monômero sílica coloidal a qual se polimeriza perdendo uma molécula de água, como é mostrada na reação de polimerização, na equação química (2). Este gás, segundo Owusu[38] permite a redução do pH e a formação de polímeros com ligação covalente (O-Si-O), denominado de sílica gel.



Fonte: Adaptado de OWUSU, Y.A. Physical-chemical study of sodium silicate as a foundry sand binder. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 18, p. 57-91, 1982.[38]

Na preparação de uma solução de silicato de sódio em meio aquoso, a água auxilia na formação de dímeros de sílica coloidal e ao passar o fluxo de CO_2 , ocorre a diminuição do pH da solução, propiciando a formação da sílica gel e também do carbonato de sódio, como é apresentada na equação química (2).

No processo silicato de sódio/ CO_2 deve-se controlar o tempo da gasagem do gás, a temperatura e a umidade relativa, pois, a resistência mecânica da areia com este processo diminui devido à solubilidade em água do silicato de sódio.[5]

Deste modo, quanto maior é o tempo do fluxo do gás nos moldes de areia, maior é a polimerização da solução de silicato de sódio para formar polímeros siloxanos, também conhecidos como sílica gel.

A solidificação de moldes e machos pelo processo de silicato de sódio/ CO_2 em temperatura ambiente é considerado um processo ecológico,[40] pois, o agente ligante não apresenta odor, é atóxico, não é inflamável e possui solubilidade em água.[5]

2.6- ASPECTOS AMBIENTAIS DA ADF

Estima-se que 231.000 t de areia a verde em excesso estejam envolvidas no processo de fundição mensalmente no Brasil, para garantir a demanda média nacional de produção de metais.[2]

As adições dos materiais primários na areia a verde, empregados para preparar novos moldes, geram um excedente destas areias, que é rejeitado, ocasionando um passivo ambiental.[41,42]

As formas de reciclagem da areia de fundição podem ser internas, como a regeneração e a recuperação, e também externa, quando a areia descartada é utilizada em atividades externas às das indústrias de fundição.[2]

A areia a verde é recuperada após o processo de desmoldagem, pela retirada de torrões de areia, finos inertes, resíduos metálicos e adicionando materiais primários novos. O termo recuperação é distinto de regeneração.

Neste caso, o objetivo da regeneração passa a ser a remoção de materiais aderidos aos grãos de areia base, por ações mecânicas e/ou aumento da temperatura. De maneira que apenas a areia base possa ser empregada para preparar novos moldes descartando-se os demais componentes da areia de fundição.

As areias a verde permitem um número indefinido de ciclos de recuperação o que as tornam de grande valor para as indústrias de fundição. Grefhorst e colaboradores[17] relatam que o ciclo de vida útil das areias a verde está na qualidade da bentonita utilizada na produção dos moldes.

Isto ocorre, porque, ao entrar em contato com o calor presente no processo de vazamento de metais, a bentonita perde sua plasticidade e torna-se inerte, fazendo com que a areia a verde tenha que ser descartada (ADF), gerando assim um resíduo sólido não-inerte.[9,1]

Uma vez que a ADF é denominada resíduo sólido, ela precisa ser classificada segundo os órgãos ambientais competentes. Para classificar a ADF é necessário identificar todo o processo de fundição a partir dos moldes de areia a verde, ou seja, verificar os materiais primários das areias a verdes e suas características. A coleta deste resíduo na fonte geradora e sua origem são quesitos de fundamental importância nos laudos de classificação de resíduos sólidos.[1]

A classificação dos resíduos sólidos, quanto aos riscos ao meio ambiente e à saúde pública, é dividida em dois grupos, independentes de suas fontes geradoras, sendo perigosos e não perigosos. Estes são ainda classificados como não inerte e inerte.[1]

A maioria da ADF é classificada, segundo Şahmaran e colaboradores[42] como resíduo classe II-A, ou seja, resíduo não inerte; não perigoso, sendo assim, não tóxico ou reativo, corrosivo e inflamável.

Há a necessidade em gerenciar este resíduo de forma a recuperá-lo e diminuir seus custos de descarte.[30,43] Estes custos para destinar a ADF, aliados as preocupações ambientais refletem um interesse crescente em incorporar esta areia em ciclos de produção alternativos, realizando sua reciclagem, ou então, tentar reutilizá-la na própria indústria de fundição.[44]

As características químicas e físicas da ADF podem ser diferenciadas dependendo do processo de fundição aplicado, bem como, do setor da indústria do qual se origina.[9]

As areias descartadas de fundição podem ser originadas de areia aglomerada com argila (areia a verde) ou quimicamente ligada. A areia a verde apresenta como materiais primários, além da areia base de sílica e da argila, aditivos carbonáceos.

A ADF pode ter uma destinação final em aterros industriais específicos para

resíduos não-inertes,[45,1] porém tem a capacidade de interagir com os lixiviados de outros resíduos que apresentem uma determinada umidade. A lixiviação denominada pela NBR 10005 é um “Processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator.”[46]

A utilização dos aterros implica na impossibilidade de aproveitar eficientemente estas areias a verde. Além de minimizar a vida útil dos mesmos, faz das indústrias de fundição dependentes de empresas que disponibilizam os aterros, onde em caso de incidentes, as geradoras da ADF são responsabilizadas.

Contudo, o expressivo aumento da severidade nos quesitos ambientais tem instigado o aprimoramento de estudos para elucidar formas de aproveitamento das areias descartadas e fazer delas uma fonte lucrativa para as indústrias de fundição.[2]

A associação Brasileira de Fundição (ABIFA) relata que a ADF pode ser reutilizada na construção civil, fabricação de concreto, material para construção, cobertura de aterros e na preparação de solos especiais.[4]

Os estudos sobre possíveis aplicações da ADF estão sendo desenvolvidos, mesmo com dificuldades para descrever as características químicas, principalmente no que se refere ao comportamento de lixiviação e de compostos tóxicos das diversas ADF, principalmente das areias oriundas dos processos de macharia.[10]

Além da norma da ABNT NBR 15.984/2011,[4] o Comitê Brasileiro de Fundição (ABNT/CB-59) estão em fase de projeto, “Areia Descartada de Fundição-Guia/Diretrizes para Aplicações Geotécnicas Confinadas e Construção Civil” com a intenção de normatizar critérios específicos para a ADF, como o tratamento, a utilização, o reaproveitamento, o armazenamento e o transporte.

A mobilização por definir estes critérios incentiva a busca por novas tecnologias ambientais como Toledo[47] que visou à produção de cerâmica vermelha a partir de argila natural, empregando micro esferas de vidro proveniente da poeira de jateamento e ADF.

Neste estudo, uma das amostras com 65% de ADF, 25% de argila natural e 10% de micro esferas de vidro apresentou alta resistência à flexão e baixa absorção de água, o que resultou em uma patente de invenção PI0500508-6 “Método de utilização de areia de fundição e resíduos de poeira de jateamento (micro esferas de vidro) para produzir cerâmica vermelha”. [48]

Muitas aplicações da ADF estão sendo realizadas na fabricação de materiais para a construção civil, minimizando a adição de matérias-primas naturais e, ao mesmo tempo, a reciclagem das areias descartadas de fundição.[9]

Dungan e colaboradores[49] preocuparam-se com a população microbiana do solo, por isso, adicionaram ADF proveniente da moldagem e da macharia para verificar a atividade da enzima desidrogenase. Observou-se que há o aumento da atividade enzimática.

A enzima atua como um indicador ambiental que avalia as ADF provenientes do processo de fundição de ferro, alumínio e bronze, podendo ser adequado para uso na melhoria ambiental do solo, pois, os microrganismos no solo utilizam as resinas (fenólicas e formaldeídos) como fonte de carbono.

Siddique e colaboradores[41] misturaram parcialmente a ADF substituindo as partículas finas no concreto e determinaram várias propriedades mecânicas onde puderam concluir que a adição de ADF foi satisfatória.

Dungan & Dees[50] estudaram a caracterização de metais totais (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V, e Zn) e lixiviáveis na areia de macharia e compararam com solos agricultáveis, percebendo que as quantidades de metais presentes na areia de macharia eram semelhantes aos mesmos. Os lixiviados (Ag, As, Ba, Cd, Cr, e Pb) apresentaram altas concentrações e não satisfaz os órgãos ambientais.

Ji e colaboradores[10] também estudaram os compostos orgânicos e características de lixiviação na ADF, onde foram analisados 32 hidrocarbonetos poliaromáticos e outros compostos orgânicos em 11 diferentes ADF. Foram realizados ensaios de lixiviação para verificar a concentração de As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se, Ag, Cu e Zn.

Observou-se que os hidrocarbonetos poliaromáticos estão em maior quantidade na areia a verde do que na areia quimicamente ligada. Apesar de que nas areias fenólicas houve maiores quantidades de hidrocarbonetos poliaromáticos do que nas areias de silicato. Os metais de lixiviação apresentaram baixos teores nas ADF.

Santurde e colaboradores[44] pesquisaram a possibilidade de a areia a verde descartada de fundição (ADF) ser aplicada em tijolos de argila com teor máximo de 35% (em peso) de ADF, os quais foram caracterizados. Os corpos-de-prova com 30% (em peso) de ADF apresentaram melhores resultados, exceto para o

chumbo e o cromo os outros elementos químicos apresentaram baixas concentrações de lixiviados, pois, grande parte dos elementos químicos são inertizados durante a queima para a produção de tijolos.

Furlani e colaboradores[45] estudaram adições de argila vermelha e amarela na areia de fundição de olivina descartada de fundição, sendo sinterizadas por 1h em temperaturas 900 a 1140°C e posteriormente caracterizadas. Verificou-se que após a sinterização as composições apresentaram fase vítrea ao redor dos grãos cristalinos, pela difração de raios X não foi detectado a presença de metais pesados.

Com as possibilidades de reutilizar, recuperar e regenerar este resíduo busca-se neste trabalho uma metodologia eficaz que possibilite a fabricação de elementos de moldes pela reutilização da ADF, mas especificamente da areia a verde.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos utilizados para estudar os mecanismos envolvidos na interação dos materiais primários da areia a verde com o silicato de sódio, antes e após reação com CO_2 , associando-se às diversas propriedades das areias a verde de fundição e de seus componentes.

A partir das diferentes adições da solução de silicato de sódio nas amostras de ADF e da areia a verde preparada, avaliou-se as propriedades físicas obtidas com silicato/ CO_2 comparando-se a amostras usuais de fundição.

Para a realização deste trabalho estudou-se as areias descartadas de fundição coletada numa indústria de materiais ferrosos na região dos Campos Gerais-PR. Neste estudo, foram preparados materiais de referência no laboratório de fundição na UTFPR/campus Ponta Grossa.

Estes materiais e seus componentes foram caracterizados neste laboratório de fundição, e nos laboratórios de caracterização de materiais da UEPG foram feitas todas as análises, após reação do CO_2 com a solução de silicato de sódio, nas areias estudadas.

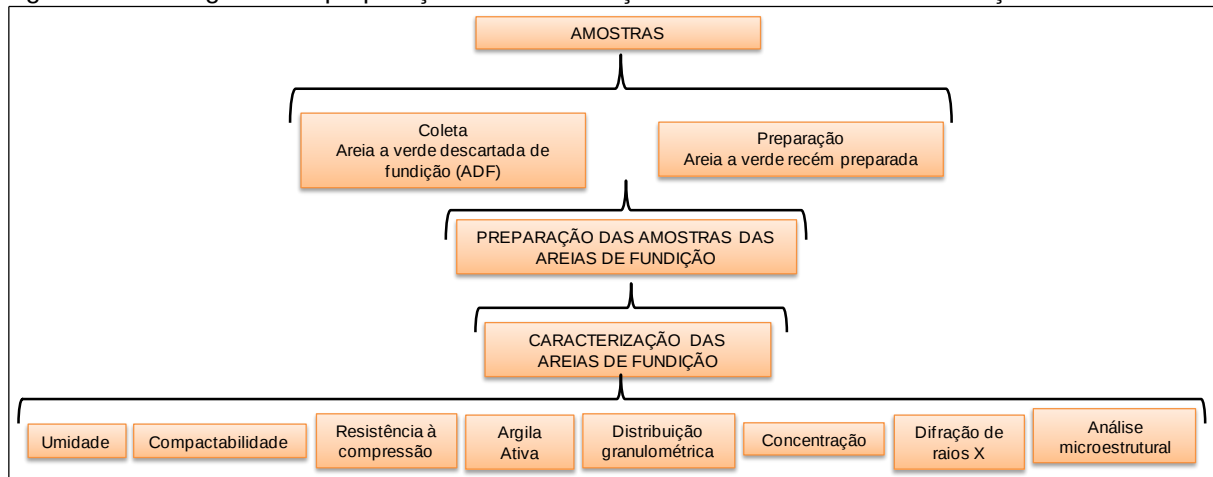
Para verificar a possibilidade de reutilizar a ADF na fabricação de elementos de moldes de fundição, foi estudada a interação do silicato de sódio/ CO_2 nessas areias de fundição. A partir desse estudo foi feito um molde com a mistura de ADF ligada com silicato de sódio/ CO_2 .

3.1- PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DAS AREIAS ESTUDADAS

Previamente se realizou a caracterização dos materiais utilizados nesse trabalho. A ADF foi coletada na indústria parceira no momento de seu descarte, pós-desmoldagem. Na areia a verde nova preparada não foram adicionados os aditivos, porém, utilizou-se a mesma areia base de sílica da indústria parceira.

Na figura 3.1 é apresentado o fluxograma da preparação e caracterização das areias estudadas.

Figura 3.1- Fluxograma da preparação e caracterização das areias a verde de fundição



Fonte: A autora.

A areia base de sílica e a ADF foram quarteadas e parte da areia base de sílica foi empregada para fazer a areia a verde preparada. As análises tradicionais realizadas nas indústrias de fundição apresentadas na figura 3.1 foram utilizadas para verificar se as características da ADF são semelhantes às areias a verde de fundição comumente utilizadas por outras indústrias.

3.1.1- Preparação das amostras das areias de fundição

A areia a verde preparada foi feita a partir de uma areia base de sílica e com uma bentonita ativada. Esses materiais foram doados pela indústria de fundição. A areia base de sílica foi retirada do interior de silos e armazenada em recipientes devidamente lacrados. A bentonita doada estava contida em recipientes para manter a sua umidade.

As coletas de ADF na indústria de fundição foram feitas manualmente na intenção de minimizar a captura de impurezas e de machos presentes nesta areia. Segundo as informações recebidas desta indústria, a ADF é originária dos processos de vazamento de ferro fundido cinzento e contém água, pó de carvão Cardiff e bentonita sódica e ativada, e areia base de sílica.

Na figura 3.2 é apresentado o momento do descarte da ADF em caçambas, antes de serem transportadas para o aterro industrial, o qual é a destinação final das ADF nesta indústria.

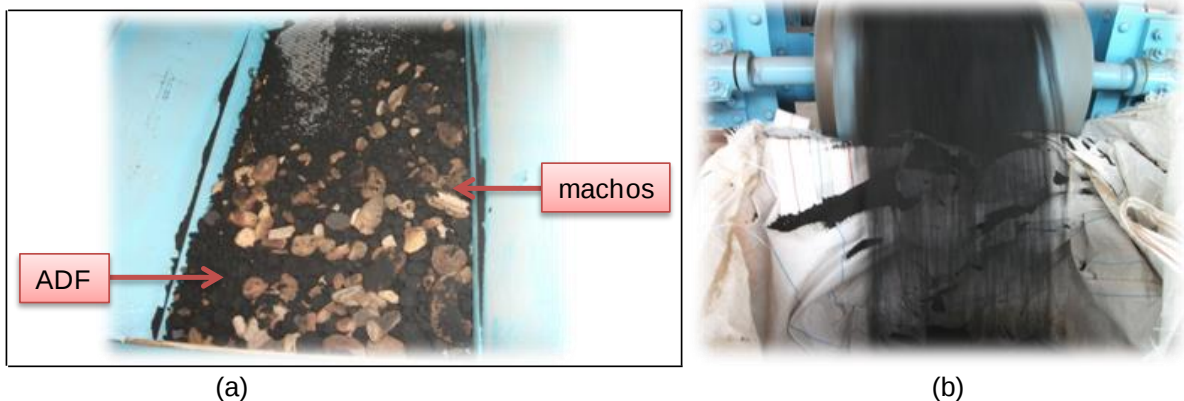
Figura 3.2- Momento do descarte na indústria de fundição e coleta da areia descartada de fundição



Fonte: A autora.

A preparação das amostras das areias de fundição foi realizada no laboratório CETEM (Centro Termo- transformação de Materiais) na UTFPR- campus Ponta Grossa. A ADF coletada foi peneirada em uma peneira vibratória de marca Bromberg® como é apresentada na figura 3.3. Em (a) é mostrada a areia descartada de fundição sendo peneirada e em (b) a ADF peneirada e acondicionada provisoriamente em sacos. Este procedimento foi realizado para separar as areias de macharia das areias a verde, pois, esta é de interesse neste trabalho.

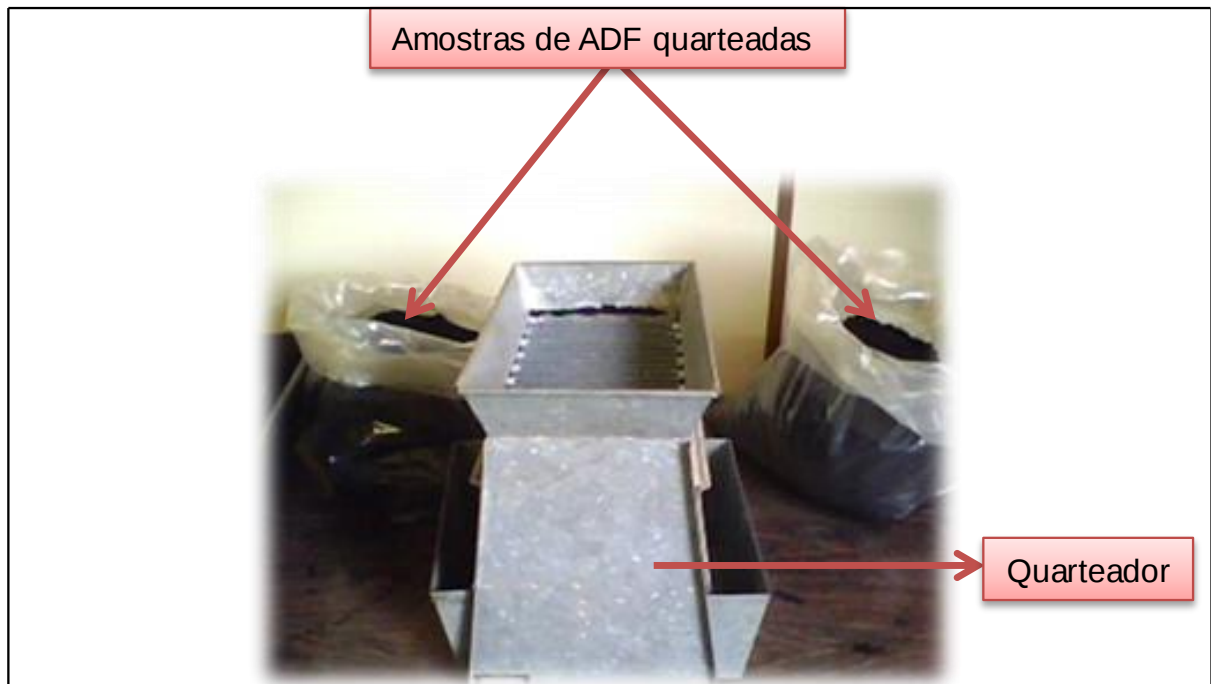
Figura 3.3- Peneiramento da ADF realizado no CETEM. Em (a) ADF sendo peneirada; em (b) ADF peneirada e armazenamento em sacos



Fonte: A autora.

A areia base de sílica e a ADF foram quarteadas para obter amostras que pudessem representar as características das areias coletadas, conforme a recomendação CEMP- 151.[51] A figura 3.4 exibe o quarteador (separador de chão) e a ADF quarteada.

Figura 3.4- ADF quarteadas e quarteador



Fonte: A autora.

Após o quarteamento da areia base de sílica, uma parte desta areia foi utilizada para fazer a areia a verde preparada a partir da adição de 8% de bentonita e de 2 a 4% de água (em peso de areia), sendo que as quantidades de argila e água acrescentadas são recomendadas segundo Wang e colaboradores.[52]

A mistura foi homogeneizada num misturador de mós rotativo de marca Mar-Girius Continental por 15 minutos. Na figura 3.5 é apresentada a adição de bentonita e água na areia base de sílica em (a); e em (b) a areia a verde, onde a água foi adsorvida nas lamelas de bentonita favorecendo a plasticidade da areia a verde preparada.

Figura 3.5- Obtenção da areia a verde preparada. Em (a) a adição de bentonita e água na areia base de sílica; em (b) a adsorção de água nas lamelas de bentonita na areia a verde preparada



Fonte: A autora.

Na figura 3.6 são apresentadas as areias de fundição e a areia base de sílica, as quais são as principais matérias-primas utilizadas para a realização deste trabalho. A areia base de sílica não apresenta aglomerante, a adição de aglomerante nesta areia caracteriza-se a areia a verde preparada.

No entanto, a ADF diferencia-se da areia a verde preparada pela presença de pó de carvão Cardiff, o que possibilita a coloração preta desta areia. Quanto à granulometria destas areias, a areia base de sílica apresenta-se mais fina do que as areias a verde, por não possuir aglomerante.

Figura 3.6- Areias estudadas neste trabalho



Fonte: A autora

Os ensaios iniciais das areias a verde de fundição e da areia base de sílica foram realizados de acordo com a recomendação CEMP (Comissão de Estudos de Matérias-Primas), comissão esta pertencente à ABIFA. As recomendações da CEMP foram empregadas neste trabalho e são muito utilizadas nas indústrias de fundição

nacionais.

O teor de umidade das areias de fundição foi determinado segundo a recomendação CEMP- 105.[53] A compactabilidade das areias foi determinada conforme a CEMP- 65.[54]

Para isso, moldes padronizados foram totalmente preenchidos com areia, sem aplicação de pressão e em seguida foram dadas três percussões consecutivas, no equipamento Marteleto de marca Solotest[®], e medida a compactabilidade, percentualmente, representando a redução de altura sofrida por uma determinada massa solta.

Para verificar a capacidade de preparar moldes de areias de fundição que suportem o manuseio e o transporte das caixas de moldagem, foi determinada a resistência à compressão, por meio de uma máquina de ensaio de resistência mecânica de areias,[55] de marca Solotest[®].

As análises granulométricas foram realizadas tanto nas areias de fundição como na areia base utilizada por meio de um peneirador mecânico Servitech modelo Vibrotech CT-025, com as areias de fundição devidamente secas, o que permitiu a determinação da curva de distribuição granulométrica.[56] Por esta distribuição calculou-se a concentração das areias pelo somatório da maior porcentagem retida em três peneiras consecutivas.

A análise microestrutural das areias de fundição e da areia base de sílica foi realizada pela microscopia ótica e pela microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para a observação do formato e da textura dos grãos das areias, as amostras foram colocadas sobre uma lâmina de vidro e a observação visual foi realizada com auxílio de uma lupa da marca LEICA, modelo M26, com placa de captura de imagem Vidicap.

As areias foram também observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um microscópio Shimadzu, modelo SSX-550. Para isso, as areias foram recobertas com uma fina camada de Au pelo método de *sputtering* em equipamento de recobrimento a plasma, marca Shimadzu, modelo *Ion Coater* IC-50.

Para auxiliar nas micrografias obtidas pelas areias estudadas, foi determinado o teor de argila ativa (AA) [25,57] pela separação da argila da areia utilizando uma solução de pirofosfato de sódio 2%. Esta solução foi misturada com a areia e fervida para a remoção da argila sobre os grãos de sílica. Após resfriamento desta mistura, ocorreu a titulação usando uma solução padronizada (fatorada) de

0,01 mol/L de azul de metileno.

Esta solução foi adicionada lentamente sobre a mistura e sob a agitação, para que azul de metileno fosse adsorvido nas lamelas da argila. E assim, pode-se quantificar a porcentagem de argila ativa nas areias a verde de fundição, através da saturação que ocorre na forma de um halo ao redor da gota depositada da solução num papel de filtro faixa azul.

As análises de difração de raios X foram realizadas nas amostras de areias a verde e nos materiais primários, estas amostras foram colocadas sobre uma placa de vidro sem adicionar solventes. Foi empregado um difratômetro Shimadzu, modelo XRD-6000, com uma velocidade de varredura $2^\circ/\text{min}$ e 2θ variando de 5 a 90° foi realizada para verificar a bentonita presente nas areias de fundição e o tipo de areia base.

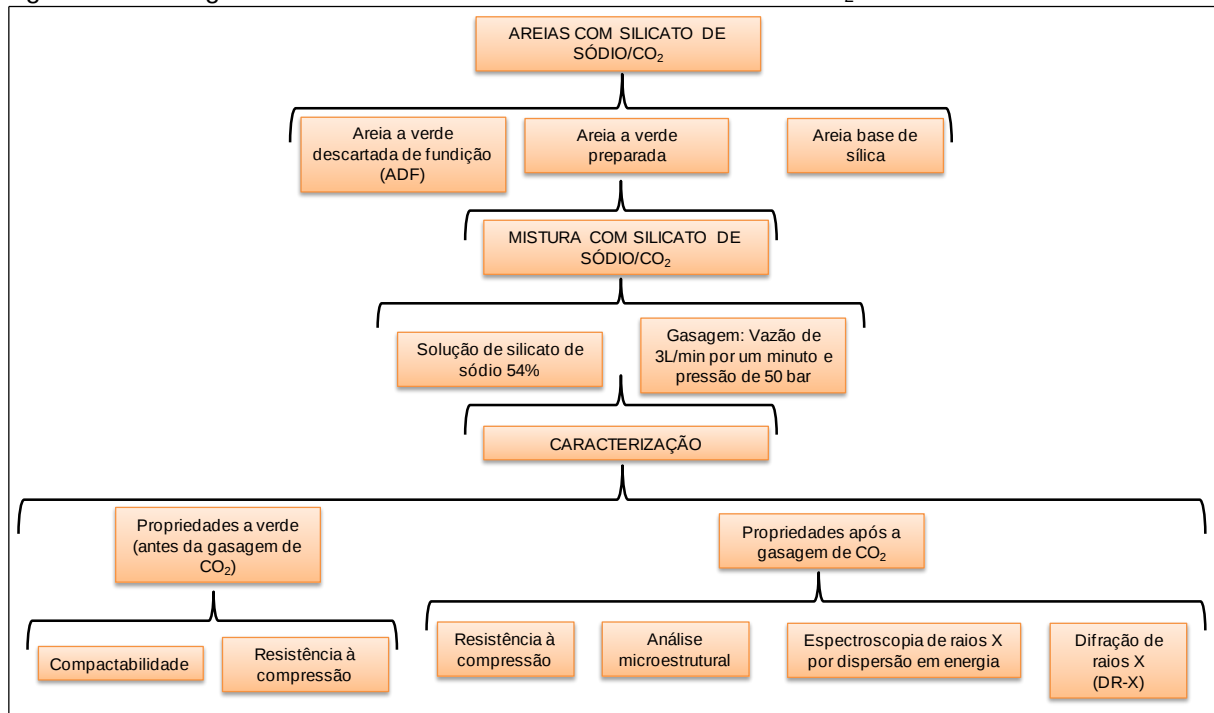
3.2- A INTERAÇÃO DAS AREIAS COM SILICATO DE SÓDIO/CO₂

A segunda etapa deste trabalho foi a preparação dos corpos-de-prova e as análises das areias estudadas com a solução de silicato de sódio antes e após a gasagem de CO₂.

Os corpos-de-prova foram preparados a partir da mistura da solução de silicato de sódio 54% nas areias de fundição e na areia base de sílica. Foram realizados estudos quanto à compactabilidade e a resistência à compressão em adições de 0 a 20% desta solução.

Após a gasagem de CO₂ determinou-se a resistência à compressão em uma máquina universal de ensaios, e a partir da ruptura dos corpos-de-prova, obteve-se as amostras para realizar as análises de microestrutura ótica e eletrônica; EDS (Espectroscopia de raios X por dispersão em energia) e Difração de raios X.

No fluxograma 3.7 são apresentados os procedimentos realizados para verificar a interação do silicato de sódio/CO₂ nas areias estudadas, a fim de comparar os resultados obtidos com a ADF.

Figura 3 7- Fluxograma das areias estudadas com silicato de sódio/CO₂

Fonte: A autora.

3.2.1- Preparação dos corpos-de-prova das areias em diferentes adições da solução de silicato de sódio

A análise das areias a verde de fundição e da areia base de sílica com silicato de sódio/CO₂ foi realizada variando-se a quantidade da solução de silicato de sódio adicionado entre 0 e 20% em peso, antes e após a gasagem de CO₂.

As misturas das areias com o silicato de sódio foram preparadas de acordo com a recomendação CEMP 60.[55] Para isso, após a adição da solução de silicato de sódio, as areias estudadas foram peneiradas, compactadas com Marteleto e após foram medidas sua resistência à compressão, antes da gasagem de CO₂, por meio de uma máquina de ensaio de resistência mecânica de areias, de marca Solotest®.

Com isso foram obtidos os resultados de compactabilidade e resistência à compressão. Após a realização da resistência à compressão, as amostras foram homogeneizadas novamente para a adição do gás carbônico.

Para a gasagem de CO₂ foram preparados os corpos-de-prova com 350g das areias de fundição num molde metálico com 51 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Na figura 3.8 é mostrado o molde contendo o corpo-de-prova de areia a verde preparada com adição de 10% da solução de silicato de sódio.

Figura 3.8- Molde metálico empregado para a preparação dos corpos-de-prova



Fonte: A autora.

No centro do corpo-de-prova foi feito um pequeno orifício para facilitar a gasagem. Este fluxo de gás foi passado por um canal adaptado na válvula do cilindro de gás carbônico. Os corpos-de-prova foram submetidos a 3L/min de CO_2 em uma pressão de 50bar, por um minuto.

Estas condições de gasagem foram estabelecidas para manter a integridade dos moldes de areia misturados com o agente ligante e também, porque se observou que, quanto maior é o tempo da gasagem, maior é a polimerização da sílica gel. Por isso, fixou-se o tempo de 1 minuto do fluxo de CO_2 em todos os corpos-de-prova das areias neste estudo.

O corpo-de-prova de areia a verde preparada com 8% da solução de silicato de sódio sendo preparado para a gasagem de CO_2 , conforme apresentado na figura 3.9.

Figura 3.9- Preparação para a gasagem de CO₂ no corpo-de-prova de areia a verde preparada com 8% da solução de silicato de sódio



Fonte: A autora.

3.2.2- Análises das areias com o agente ligante silicato de sódio/CO₂

Os corpos-de-prova ligados com silicato de sódio/CO₂ foram caracterizados por medidas de resistência mecânica e a interação deste agente ligante com as areias estudadas foi analisada nos laboratórios do DEMA/UEPG por difração de raios X, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura com microanálise, descritas no decorrer deste texto.

3.2.2.1- Resistência mecânica

Após a gasagem de CO₂ nos corpos-de-prova foram realizados os ensaios de resistência à compressão em uma máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu AG-I 10 kN, com velocidade de carregamento de 0,5 N.m/s. A figura 3.10 mostra o corpo-de-prova de ADF com adição de 10% da solução de silicato de sódio/CO₂ fraturado.

Figura 3.10- Areia descartada de fundição fraturada no ensaio de resistência à compressão



Fonte: A autora.

3.2.2.2- Microscopia ótica

Para verificar a morfologia das partículas de sílica e sua interação com o agente ligante, foram realizadas as análises de microscopia ótica nas amostras das areias de fundição e da areia base de sílica com adições de 5,10 e 15% da solução de silicato de sódio, utilizando uma lupa da marca LEICA, modelo M26, com placa de captura de imagem Vidicap.

3.2.2.3- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)

A microscopia eletrônica de varredura foi feita nas amostras de ADF, na areia a verde preparada e na areia base de sílica contendo 5, 10 e 15% da solução de silicato de sódio para observar a interação do agente ligante com as areias. E também nas amostras de areia localizada próxima ao metal solidificado e na interface areia e metal solidificado, no molde de ADF.

As microanálises de EDS foram feitas nas amostras de areia base de sílica com adição de 10% da solução de silicato de sódio, na areia a verde preparada e na ADF, ambas com 15% da solução de silicato de sódio para determinar a composição química de uma dada região de interação entre o agente ligante e as areias.

As amostras foram recobertas com uma fina camada de Au pelo método de *sputtering* em equipamento de recobrimento a plasma, marca Shimadzu, modelo *Ion Coater* IC-50, para a observação da microestrutura das amostras e sua microanálise por EDS, técnica acoplada ao microscópio eletrônico de varredura Shimadzu, modelo SSX-550.

3.2.2.4- Difração de raios X

As amostras foram maceradas empregando pistilo e almofariz e colocadas sobre uma placa de vidro sem adição de solventes. A difração de raios X foi feita nas amostras das areias de fundição e na areia base de sílica com adições de 2,5%, 5% e 10% da solução de silicato de sódio 54%.

Para auxiliar o entendimento destes difratogramas, foram realizados a difração de raios X na bentonita ativada com adições de 1,5, 6 e 12% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO₂, nas mesmas condições experimentais. A adição 1,5% da solução de silicato de sódio foi a mínima que permitiu a solidificação da bentonita ativada+solução de silicato de sódio, entretanto, a máxima adição de 12%, possibilitou a solidificação após um minuto de gasagem de CO₂.

3.3- MOLDE DE ADF COM SILICATO DE SÓDIO/CO₂

Nesta etapa, a areia descartada de fundição (ADF) foi empregada para a preparação de um molde de areia. Como esta areia é proveniente do processo de vazamento de ferro fundido cinzento, optou-se para fundir este metal.

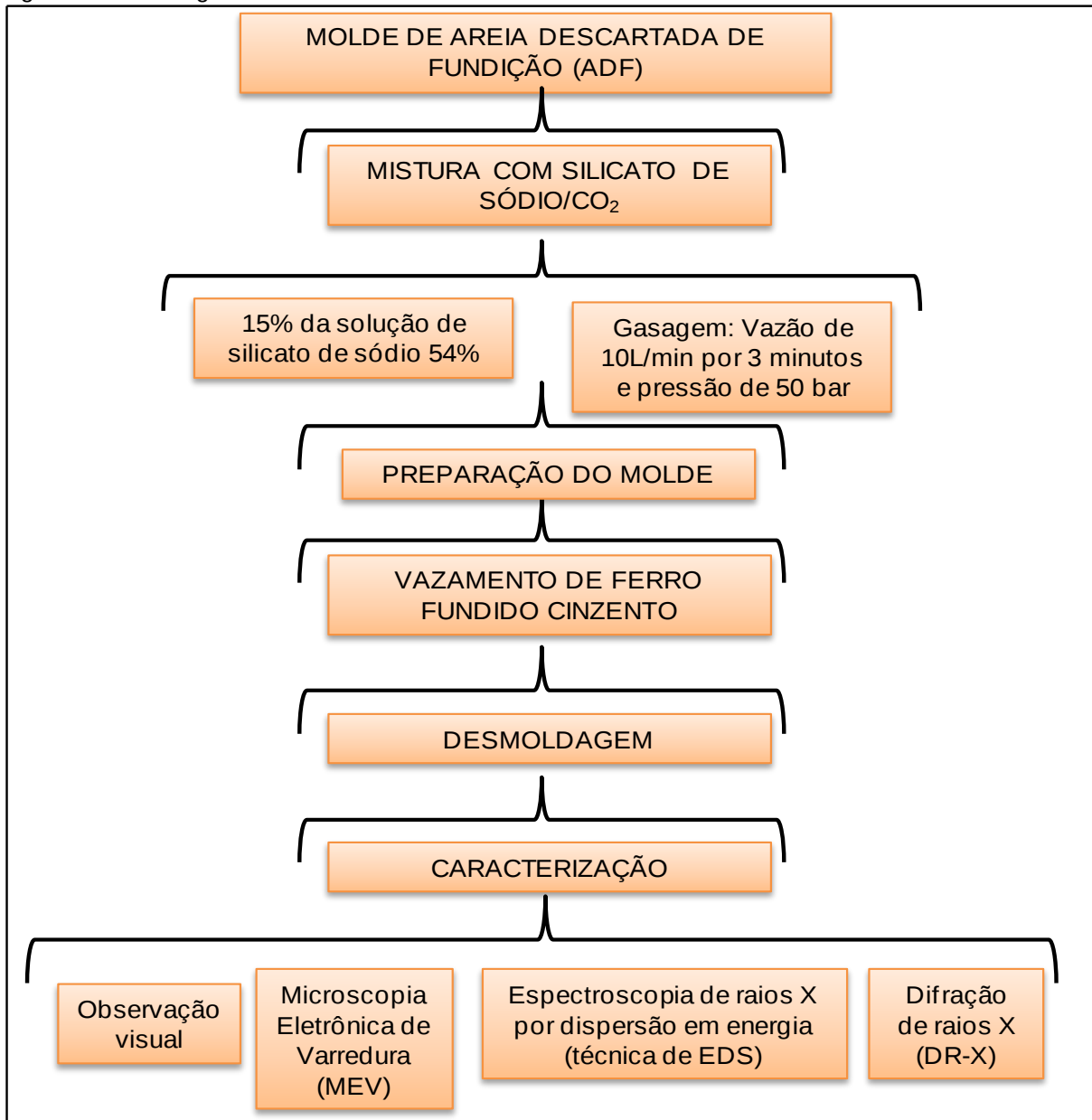
As adições de 15% da solução de silicato de sódio na preparação do molde de ADF, e de 10% desta solução na preparação dos machos de areia base de sílica foram utilizadas a partir dos melhores resultados de resistência à compressão, obtidas nesta areia.

A preparação do molde de ADF possibilitou verificar o excesso da solução de silicato de sódio na ADF; a observação visual da areia; sua morfologia na região próxima ao ferro fundido cinzento solidificado e o mapeamento desta região que identificou os elementos químicos atuantes nesta areia.

Na figura 3.11 é apresentado o fluxograma das atividades realizadas para o

estudo da ADF na preparação de peças fundidas.

Figura 3.11- Fluxograma do molde de ADF

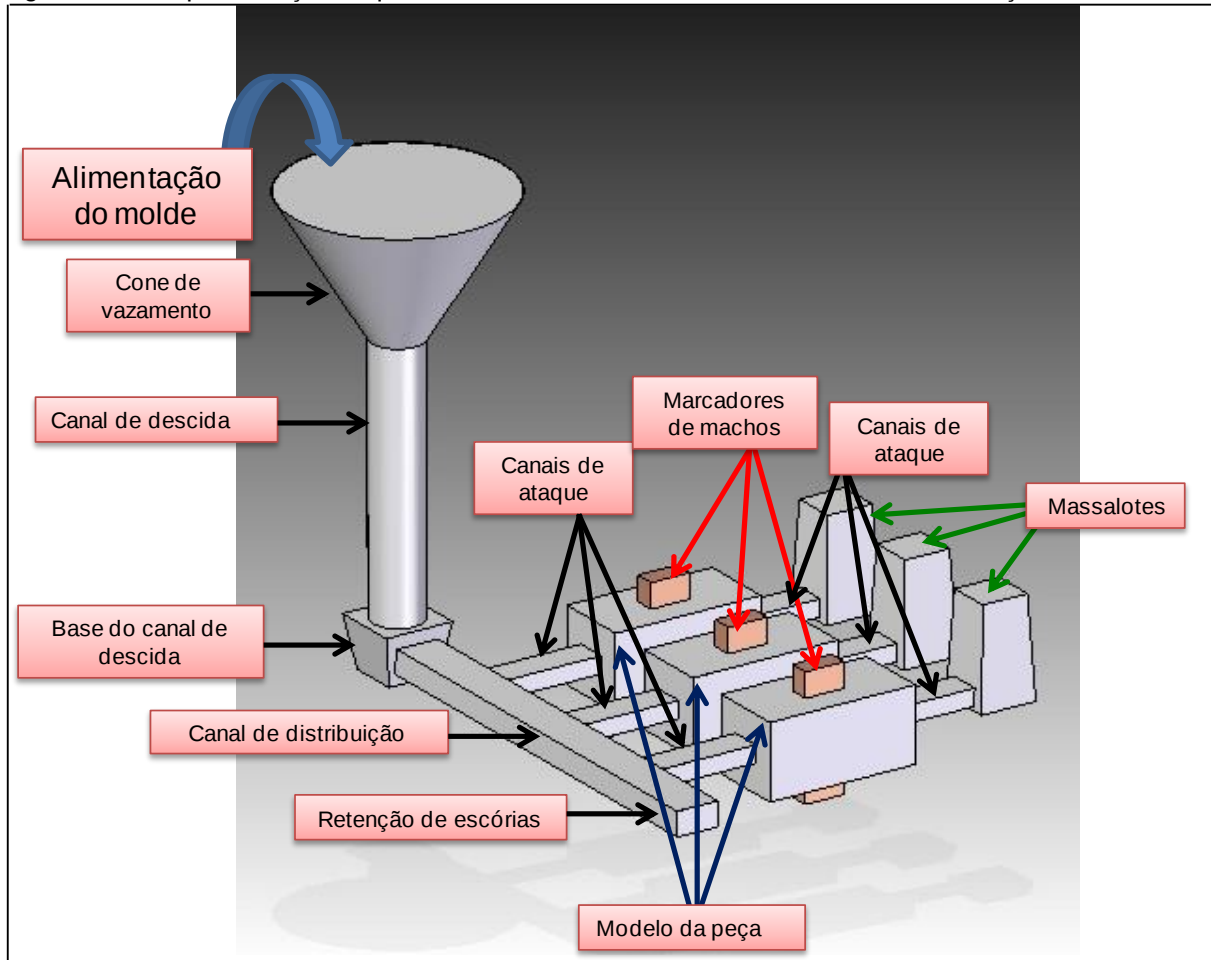


Fonte: A autora.

3.3.1- Preparação do molde de ADF com silicato de sódio/CO₂

Para a construção do molde foi escolhido um modelo-placa em madeira. A figura 3.12 mostra a representação esquemática desse molde, que apresenta sistema de canais de vazamento, massalotes, marcação de machos, cone de vazamento, canal de descida, base do canal de descida, canal de distribuição, três canais de ataques e três massalotes cegos.

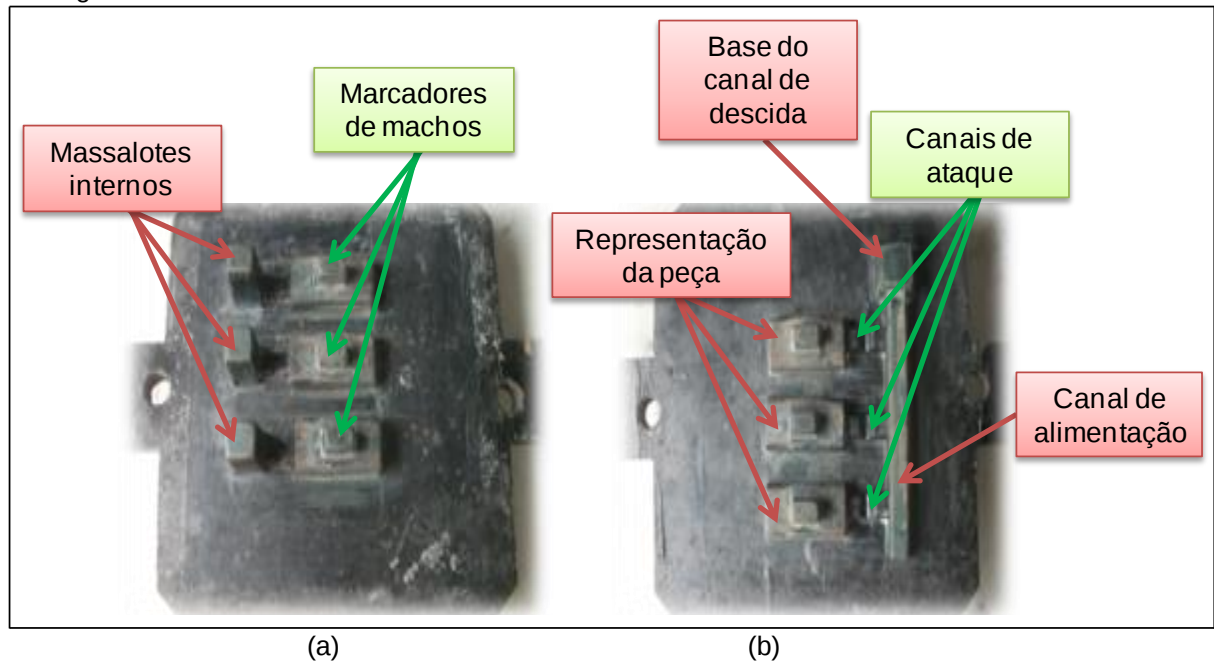
Figura 3.12- Representação esquemática do sistema de canais, massalotes e marcação de machos



Fonte: A autora.

O modelo bipartido empregado na preparação do molde, na figura 3.13 é apresentado a parte superior do modelo em (a) que ficou na meia caixa de moldagem superior e em (b) a parte inferior do modelo localizada na meia caixa de moldagem inferior.

Figura 3 13- Modelo bipartido em madeira. Em (a) parte superior que representou a cavidade na meia caixa de moldagem superior; e em (b) parte inferior do modelo representado na meia caixa de moldagem inferior



Fonte: A autora.

Os machos foram feitos com areia base de sílica com 10% da solução de silicato de sódio e a areia de faceamento e de enchimento foram feitas a partir de uma mistura de ADF e 15% da solução de silicato de sódio. As areias foram homogeneizadas por batelada por 5 minutos em um misturador, como apresentada na figura 3.14.

Figura 3.14- Adição da solução de silicato de sódio na ADF no interior do misturador



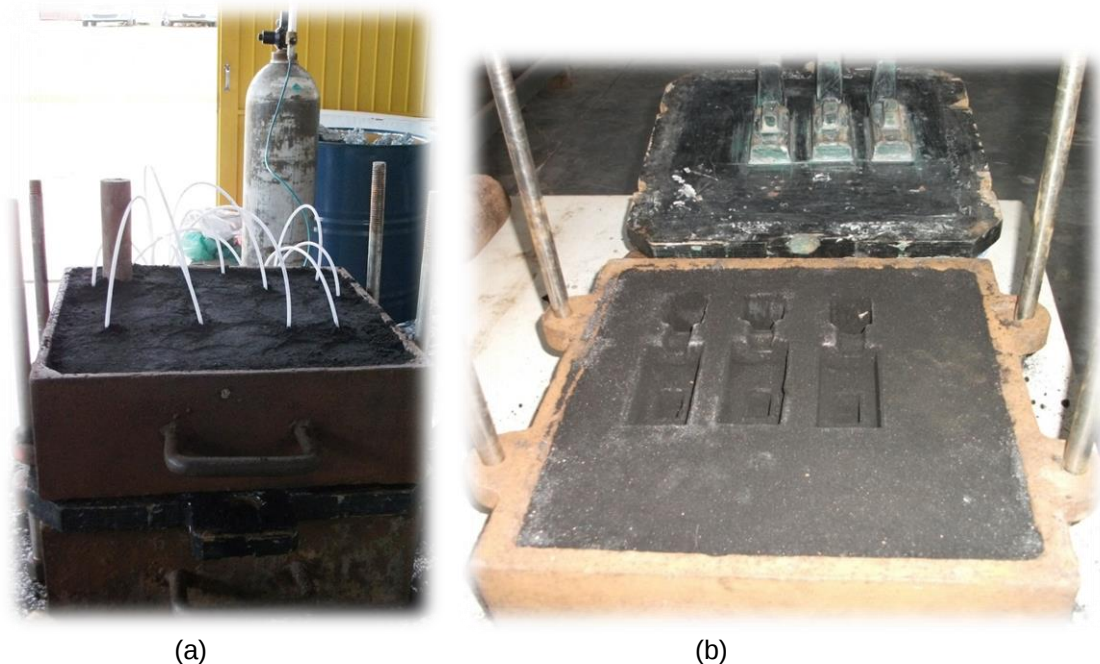
Fonte: A autora.

A gasagem de CO₂ com pressão de 50bar, vazão de 10L/min foi distribuído sobre o molde com o auxílio de válvulas pneumáticas, por 3 minutos. O fluxo de gás foi feito em uma caixa de moldagem por vez.

As caixas de moldagem foram abertas após a gasagem para a remoção do modelo, e posteriormente foram submetidas ao processo de vazamento de ferro fundido cinzento, devido a ADF ser advinda do processo de fundição deste metal.

Na figura 3.15 são apresentadas em (a) a gasagem na meia caixa de moldagem superior; e em (b) a cavidade formada pela remoção do modelo. O processo de vazamento foi realizado em uma indústria de fundição na cidade de Ponta Grossa que fabrica peças ferrosas.

Figura 3.15- Preparação do molde de ADF. Em (a) meia caixa de moldagem superior com os canais para a gasagem de CO₂; em (b) a cavidade formada pela remoção do modelo



Fonte: A autora.

No processo de desmoldagem, retirou-se cuidadosamente a areia que estava na caixa superior e inferior de moldagem, e verificou-se visualmente o comportamento da ADF após o processo de vazamento do ferro fundido cinzento.

3.3.2- Análise microestrutural da ADF após o processo de vazamento

As análises microestruturais foram realizadas nas amostras de areia

localizada próxima ao metal solidificado e na interface areia e metal solidificado.

A amostra que representou a interface areia e metal solidificado foi removida numa região próxima ao canal de ataque e o massalote utilizando uma serra fita. Não foi necessário embutir a amostra.

A região do metal solidificado foi polida para identificar as características do ferro fundido, porém a amostra foi observada perpendicularmente ao polimento realizado na parte superior da mesma, para visualizar a região da interface areia e metal fundido.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na caracterização das areias a verde de fundição, evidenciando-se as diferenças e semelhanças micrográficas obtidas destas areias, bem como, a caracterização das areias estudadas com o agente ligante silicato de sódio/CO₂.

A discussão sobre a areia descartada de fundição (ADF) é baseada comparativamente aos resultados obtidos na areia a verde preparada e na areia base de sílica. A determinação das características da ADF foi verificada pela preparação do molde de ADF após o processo de vazamento de ferro fundido cinzento pelas análises visuais e microestruturais desta areia obtida após o processo de desmoldagem.

4.1- CARACTERIZAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)

A caracterização da areia descartada de fundição (ADF) permitiu identificar a possibilidade de esta ser reutilizada nos processos de moldagem. Para tanto, a areia a verde preparada e a areia base de sílica também foram caracterizadas para comparar seus resultados com os obtidos pela ADF.

A tabela 4.1 resume as propriedades das amostras utilizadas no presente trabalho incluindo: a concentração granulométrica da areia base; umidade; compactabilidade e resistência à compressão das areias a verde. Também foi avaliado o teor ótimo de água na ADF por meio de ensaios de compactabilidade. Adotou-se neste trabalho o teor de referência de umidade como sendo aquele relativo a 50% de compactabilidade.[58]

Observa-se que a areia base de sílica não apresentou umidade, pois estava totalmente seca e a areia a verde preparada apresentou teor de umidade de 2,17%. O maior teor de umidade na ADF (recebida), em relação às outras areias, pode ser atribuído à presença de outros componentes residuais dos processos de recuperação.

Tabela 4 1- Análises iniciais das areias estudadas

Areias estudadas	Umidade (%)	Compactabilidade (%)	Resistência à compressão (N/cm²)	Concentração granulométrica (%)
ADF (coletada)	2,67	40	11	86,9 (70, 100 e 140 mesh)
ADF com umidade ótima	3	50	11	86,9 (70, 100 e 140 mesh)
Areia a verde preparada	2,17	50	9	85,9 (50, 70 e 100 mesh)
Areia base de sílica	0	5	0	91,9 (50, 70 e 100 mesh)

Fonte: A autora.

A ADF utilizada para a realização deste trabalho foi a que apresentou 3% de água, devido ao resultado ótimo de compactabilidade, conforme apresentada na tabela 4.1. A umidade da areia a verde preparada foi de 2,17% o que representa a água a ser adsorvida nas lamelas da bentonita, e um pequeno excesso responsáveis pela moldabilidade da areia a verde.

A compactabilidade está relacionada à quantidade de água na bentonita e na areia base de sílica, os quais são os materiais primários na ADF. A quantidade de água precisa ser adsorvida pela areia permitindo a união dos grãos durante a moldagem.

O resultado de compactabilidade da ADF foi de 50%, semelhante a areia a verde preparada. Segundo a literatura,[20] esta areia de descarte ainda poderia ser empregada na moldagem em máquinas de alta pressão, com alta produtividade e em máquinas convencionais e para moldagem manual.

A compactabilidade de 5% determinada na areia base de sílica foi muito inferior se comparado com a ADF. Isto pode ser decorrente do ajuste das partículas durante a compactação na máquina de ensaio indicando um formato de grão adequado para a moldagem.

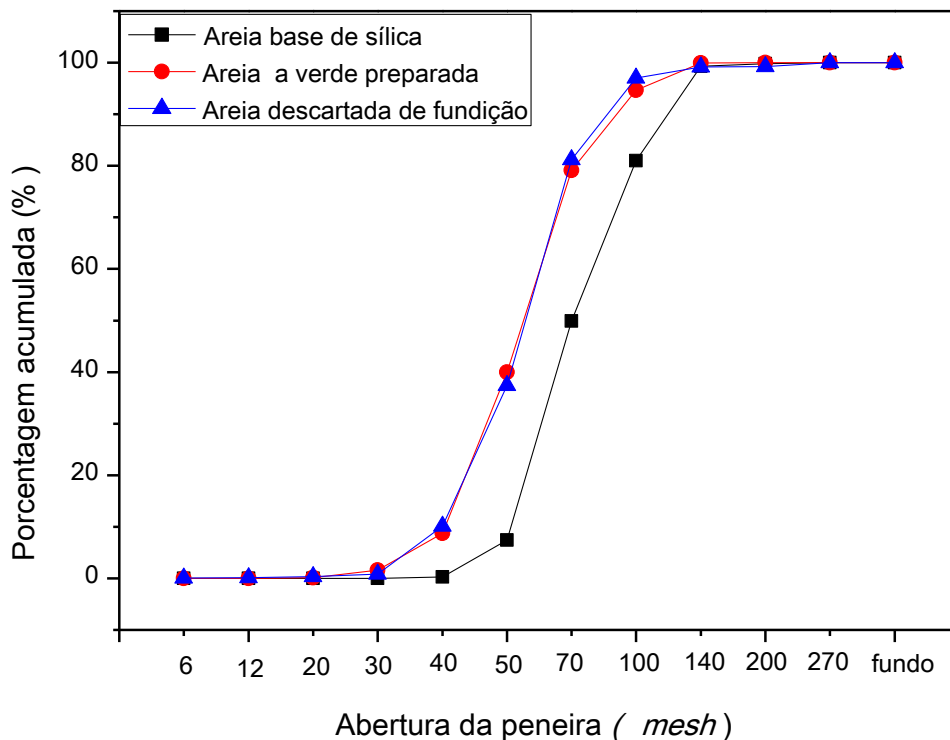
Quanto à resistência mecânica, observa-se pela tabela 4.1 que a areia verde preparada apresentou uma resistência à compressão de 9N/cm², menor do que a ADF. Isto pode ser explicado pelo menor tempo para adsorção de água na bentonita nova em relação à existente na ADF. Este aglomerante na ADF por ter sido intensamente utilizada nos ciclos de moldagem está mais ativada.

A distribuição granulométrica das duas areias a verde de fundição apresentaram curvas semelhantes, como é apresentado na figura 4.1. Na ADF e na

areia a verde preparada, o tamanho médio de partículas (d_{50}) foi de 273,5 μm , referente a peneira 55,76 *mesh*.

Já a areia base de sílica apresentou tamanho médio de partícula de 210 μm , referente a peneira 70 *mesh*. Estes resultados mostram que a ADF e da areia a verde preparada apresentam uma granulometria mais grosseira que a areia base de sílica. Novamente verifica-se a semelhanças nos resultados obtidos da areia a verde descartada (ADF) com a areia a verde preparada.

Figura 4. 1- Distribuição granulométrica das areias estudadas



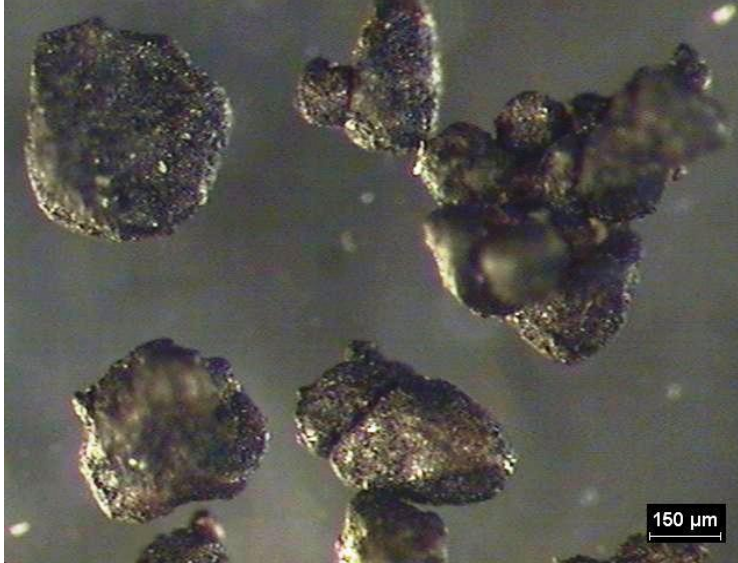
Fonte: A autora.

Quanto ao resultado da concentração granulométricas das areias, observa-se uma similaridade dos resultados obtidos da ADF e da areia a verde preparada, pois, 86,9% e 85,9%, respectivamente, de seus grãos concentraram-se na faixa granulométrica de 50, 70 e 100 *mesh*.

No entanto, na areia a base de sílica, 91,9% de seus grãos ficou retida nas peneiras 70, 100 e 140 *mesh*. Esta diferença nos resultados desta areia com as demais pode ser atribuída à presença de argila que recobre os grãos das areias de fundição.

A análise microestrutural da ADF, obtida pela microscopia ótica é apresentada na figura 4.2. Observam-se grãos de diversos tamanhos, o que está de acordo com a distribuição granulométrica da ADF apresentada na figura 4.1. Os grãos menores, na ordem de $150\mu\text{m}$, apresentam-se aglomerados, possivelmente pela presença de argila bentonítica.

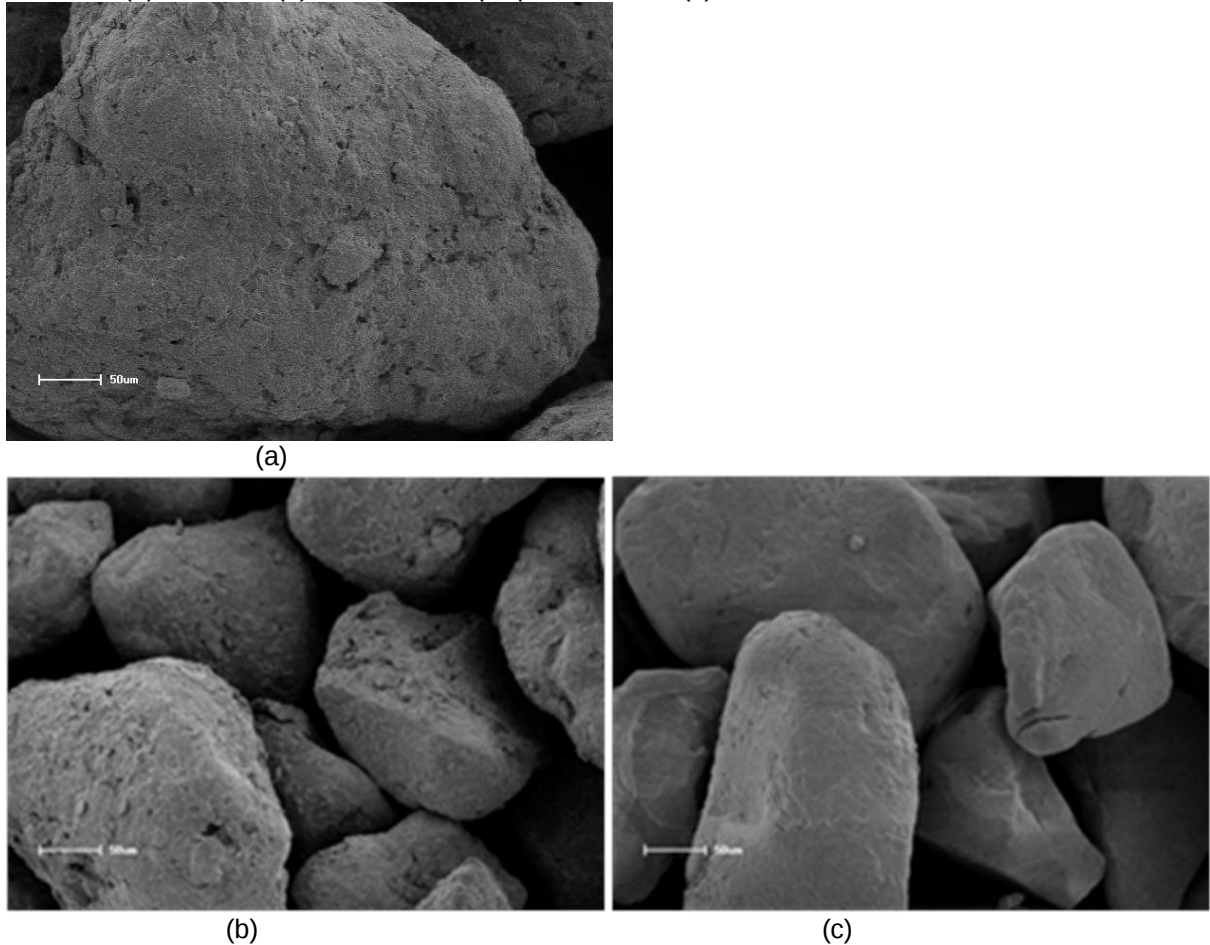
Figura 4.2- Imagem de partículas de grãos de ADF, obtida por microscopia ótica



Fonte: A autora.

Uma análise mais detalhada realizada por microscopia eletrônica de varredura é vista na figura 4.3. Observa-se que sobre a superfície do grão de ADF (figura 4.3 (a)) e também dos grãos de areia a verde preparada (figura 4.3 (b)), há um recobrimento nítido comparado com uma areia base de sílica (figura 4.3 (c)). Essa camada delgada que recobre os grãos de sílica na ADF e areia a verde (figuras 4.3 (a) e (b)), mostra que a argila bentonítica fica aderida sobre os grãos de sílica.

Figura 4.3- Imagens das areias estudadas obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV. Em (a) ADF; em (b) areia a verde preparada; e em (c) areia base de sílica



Fonte: A autora.

Para confirmar a presença desta argila recobrindo os grãos de sílica foram realizados ensaios de teor de argila ativa [29,54] no laboratório da indústria de fundição que forneceu a areia base de sílica e a ADF para este estudo.

Esta indústria prepara a areia a verde adicionando-se 12% de bentonita (ativada e sódica) na areia base de sílica e, após o primeiro processo de desmoldagem, esta areia torna-se areia de retorno onde é acrescentado mais 1% destas argilas.

Em média o teor de argila ativa ideal é de 6,5% nas areias a verde desta indústria presente no sistema. Esta areia, uma vez descartada do processo, torna-se a ADF objeto deste estudo. Para essa argila, determinou-se o teor de 6,82% de argila ativa, portanto uma porcentagem de 5,18% desta argila não foi adsorvida pela solução de azul de metileno. A argila não adsorvida pode estar calcinada ao redor dos grãos de ADF devido ao processo de vazamento de ferro metálico que tornou a bentonita inerte.

No entanto, a areia a verde preparada com 8% de bentonita (em peso de areia), teve 6,12% de argila ativa, o que implica que 1,88% de bentonita não foram adsorvidas pela solução de azul de metileno.

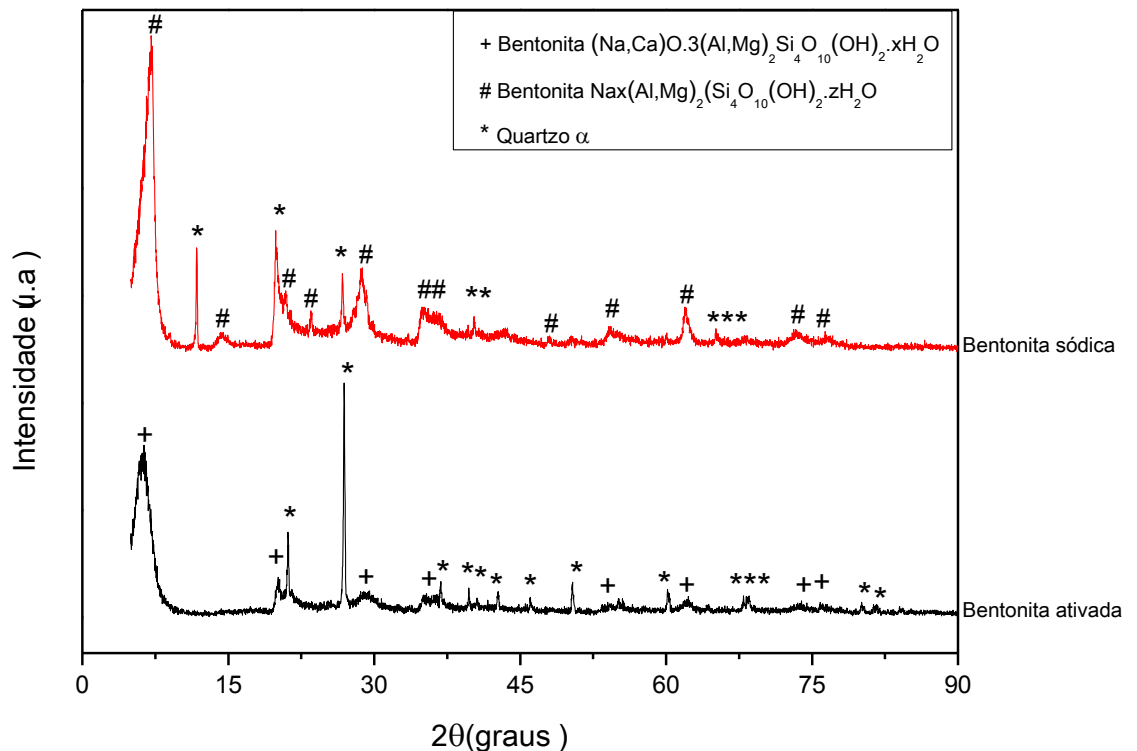
Considerando que o teor ótimo é de 6 a 7 % de argila ativa na areia a verde a partir da adição de 0,5 a 0,8% de bentonita na areia de retorno,[20] os resultados de argila ativa na ADF e na areia a verde preparada comprovam que a camada que está aderida nos grãos de sílica destas areias é a bentonita, conforme mostram as micrografias, nas figuras 4.3 (a) e (b) respectivamente.

Já na areia base de sílica, investigou-se a possível presença de materiais argilosos, porém, não houve a formação do halo azul escuro com as adições da solução de azul de metileno. Por isso, na micrografia desta areia, na figura 4.3 (c), não se observou a camada de argila aderida aos grãos de sílica.

Os aglomerantes presentes nas areias a verde foram identificados pela técnica de difração de raios X. Na areia a verde preparada foi adicionada somente a bentonita sódica artificial de origem ativada, enquanto que na ADF, além desta argila foi adicionada uma bentonita naturalmente sódica.

Os difratogramas de raios X da figura 4.4 apresentam quartzo α nas bentonitas e a bentonita ativada com composição química $(\text{Na,Ca})\text{O} \cdot 3(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ e a bentonita sódica com composição química $\text{Na}_x\text{Al,Mg}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$.

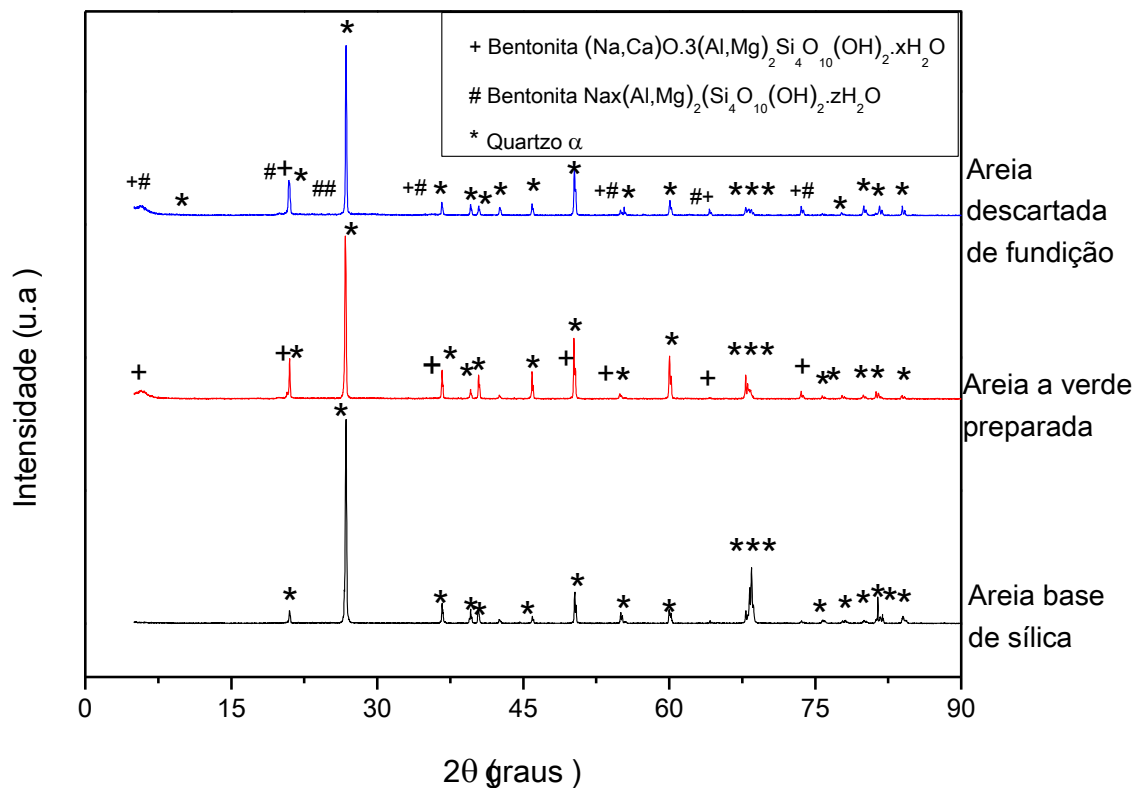
Figura 4.4- Difratomogramas das bentonitas presentes na ADF



Fonte: A autora.

Na figura 4.5 são apresentados os difratogramas da ADF, areia a verde preparada e areia base de sílica. Observa-se, como esperado, que a areia base de sílica apresenta apenas picos referentes a fase cristalina do quartzo α , enquanto que na ADF e na areia a verde preparada estão presente também os picos de difração referentes a bentonita ativada $(\text{Na,Ca})\text{O} \cdot 3(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Na ADF, além desta argila também há a fase $\text{NaX}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot z\text{H}_2\text{O})$. A indústria que forneceu a ADF e as bentonitas não informou a quantidade destas argilas que são adicionadas para a preparação de uma areia a verde nova no sistema.

Figura 4.5- Difratomogramas das areias a verde de fundição e da areia base de sílica



Fonte: A autora.

As características da areia descartada de fundição (ADF) apresentadas neste trabalho evidenciam a qualidade desta areia para potencial reuso na indústria de fundição, conforme explanado no item 2.6. A bentonita sódica presente na ADF possui maior distanciamento interlamelar e por isso, permite maior plasticidade às areias.

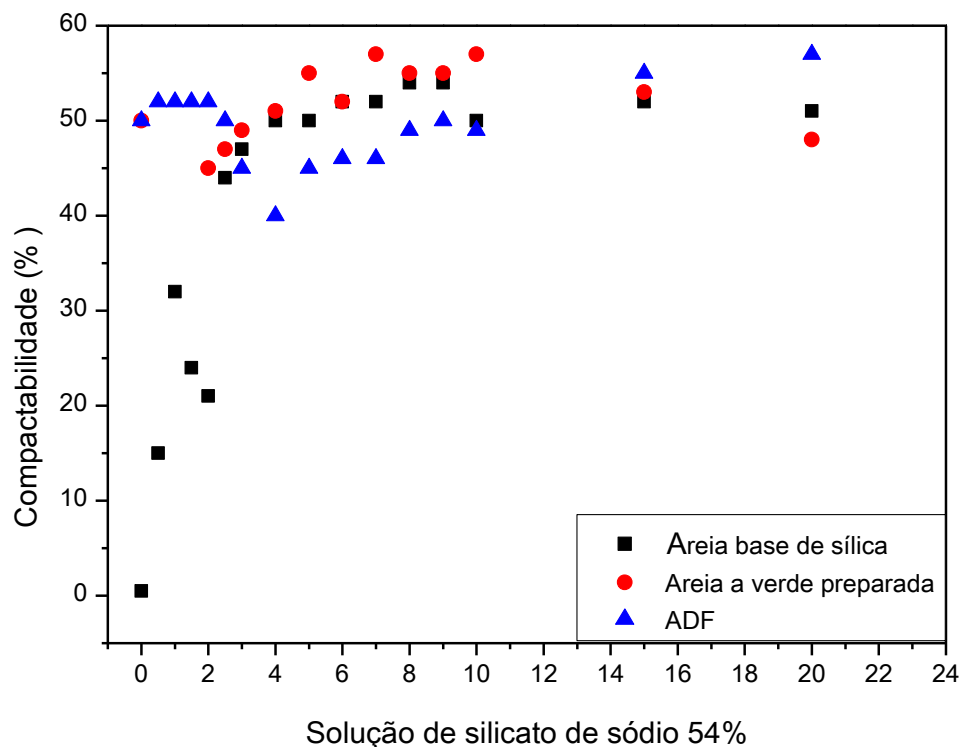
4.2- CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS A VERDE DE FUNDIÇÃO LIGADAS COM SILICATO DE SÓDIO/CO₂

Nesta seção são apresentados os resultados da interação da areia descartada de fundição (ADF) com as adições da solução de silicato de sódio antes e após a gasagem de CO₂. Os resultados das propriedades mecânicas, análises microestruturais e difração de raios X obtidos nesta areia usada foram comparados com os da areia a verde preparada nova e com a areia base de sílica para discutir a interação que as adições da solução de silicato de sódio possuem antes e após a gasagem, e suas influências sobre os grãos de sílica e a bentonita.

4.2.1- Propriedades mecânicas das areias a verde de fundição ligadas com silicato de sódio/CO₂

Na figura 4.6 é apresentada a variação da compactabilidade das areias estudadas com a adição de silicato de sódio antes da gasagem de CO₂.

Figura 4.6- Compactabilidade das areias a verde de fundição e areia base de sílica em diferentes adições de silicato de sódio antes da gasagem de CO₂



Fonte: A autora.

Pode-se observar que a adição da solução de silicato de sódio proporcionou um aumento significativo na compactabilidade da areia base de sílica. A compactabilidade desta areia, sem a adição da solução de silicato de sódio, é de 5% e com a adição de 9%, atingiu o valor de 54%, podendo ser empregada em diversos tipos de moldagem.[20]

A adição de 9% da solução de silicato de sódio na areia base de sílica mostrou ser a quantidade ótima para uma maior compactabilidade. As adições superiores a 10% provocaram o decaimento da compactabilidade.

Os resultados de compactabilidade da areia a verde preparada e da ADF foram influenciados pela água adsorvida nas lamelas da bentonita, presente no teor

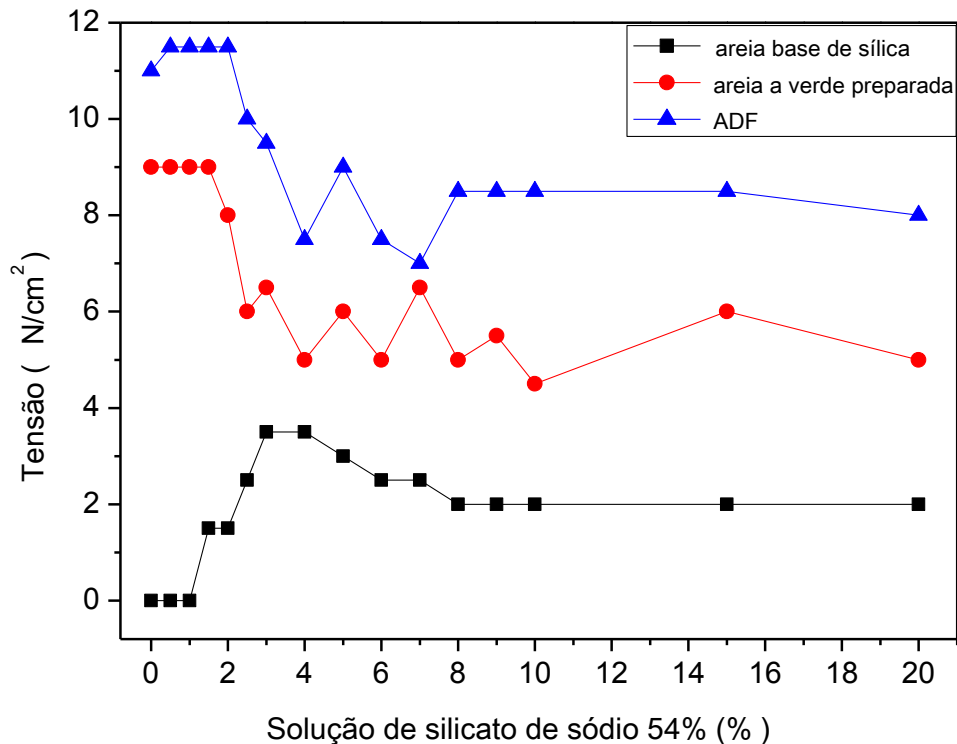
de umidade destas areias. As adições de 5, 7 e 10% da solução de silicato de sódio na areia a verde preparada proporcionaram melhores resultados quando comparados à compactabilidade desta areia sem a adição da solução de silicato de sódio.

Para a ADF, os resultados de compactabilidade foram menores que os da areia base de sílica e da areia a verde preparada. Isso pode ser atribuído ao maior teor de umidade da ADF. No entanto, a ADF com a adição de 4% da solução, obteve o mesmo resultado que sem a adição da solução de silicato de sódio (50%).

As demais adições acarretaram resultados superiores de compactabilidade, podendo possibilitar o emprego da ADF com a solução de silicato de sódio na preparação de moldes e/ou sistemas de canais de vazamento, utilizando os tipos de moldagem citados por Romanus.[20]

Para verificar a possibilidade da ADF ligada com silicato de sódio poder ser utilizada para preparar sistemas de canais de vazamento e alimentadores resistentes, foi determinada a resistência à compressão antes e após a gasagem de CO₂. Os resultados de resistência à compressão antes da gasagem de CO₂ para a areia base de sílica, a areia a verde preparada e ADF, como apresentado na figura 4.7.

Figura 4.7- Resistência à compressão das areias a verde de fundição e a areia base de sílica antes da gasagem de CO₂



Fonte: A autora.

Observa-se pela figura 4.7 que a ADF apresentou os maiores valores de resistência à compressão quando comparada com a areia a verde preparada e a areia base de sílica.

Na areia base de sílica, a água proveniente da solução de silicato de sódio foi a que influenciou na resistência a verde nos corpos-de-prova preparados, uma vez que, essa areia não tinha umidade. Esta água umidificou a areia e pode ter favorecido a dispersão do silicato de sódio entre os grãos de sílica, favorecendo o aumento da resistência nos corpos-de-prova na medida em que foi adicionada uma maior quantidade da solução de silicato de sódio.

Observou-se também, que a areia base de sílica com adições de 3 e 4% de silicato de sódio obtiveram maiores resultados de resistência (3,5N/cm²), este resultado é bem significativo quando comparado com a areia sem a adição da solução de silicato de sódio, na tabela 4.1, a qual não pode ser conformada sem a presença de água e de argila.

Já para as areias a verde nova e usada, que apresentam umidade, o

excesso de água fez com que a resistência à compressão fosse diminuída à medida que se adicionava maiores quantidades de silicato de sódio.

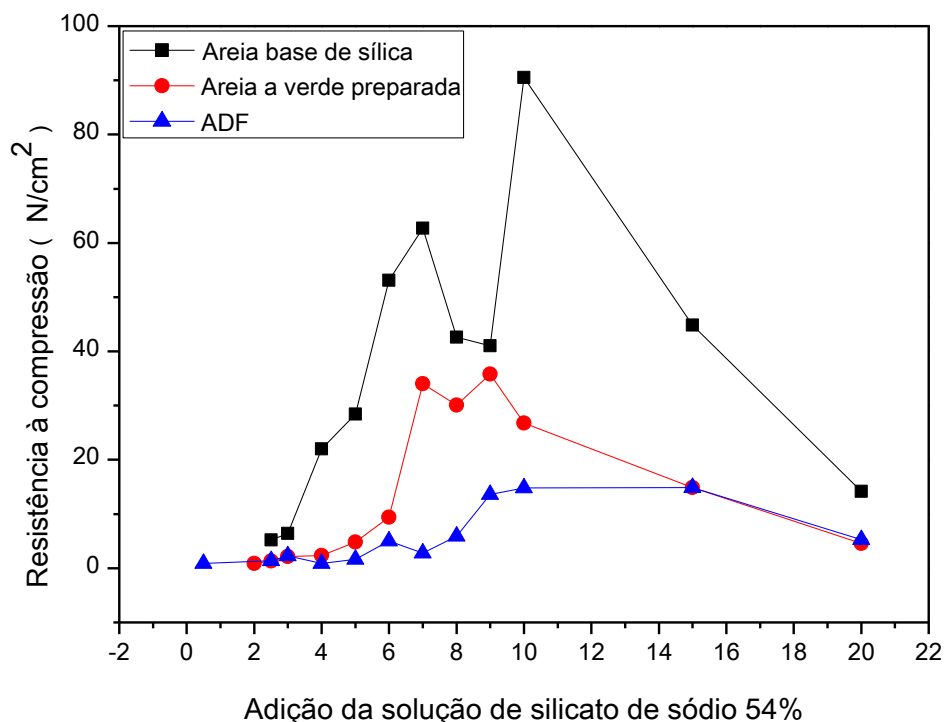
Para adições de até 1,5% de solução de silicato de sódio, observaram-se os maiores resultados de resistência à compressão porque a água é adsorvida entre as lamelas de bentonita e com isso ocorre o aumento a moldabilidade da areia a verde preparada e da areia descartada de fundição, logo aumenta também a resistência.

Com as adições de até 1,5% da solução de silicato de sódio na areia a verde preparada atingiram-se valores de 9N/cm^2 , sendo este, o mesmo resultado quando comparado com a areia sem a adição da solução, como mostra a tabela 4.1.

Porém, as adições superiores desta solução, acarretaram a diminuição da resistência mecânica. A ADF apresentou o mesmo comportamento que a areia a verde preparada, atingindo valores de $11,5\text{N/cm}^2$ nas adições de 0,5 a 2% da solução.

Na figura 4.8 são apresentados os resultados de resistência à compressão da areia base de sílica e das duas areias a verde de fundição com a adição de diferentes quantidades da solução de silicato de sódio e com a gasagem de CO_2 .

Figura 4.8- Resistência à compressão das areias a verde de fundição e da areia base de sílica com diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2



Fonte: A autora.

Pela figura 4.8 verifica-se que a resistência à compressão da areia base aumenta à medida que se adiciona a solução de silicato de sódio, até uma quantidade de 10% da solução, atingindo um valor de $90,5\text{N/cm}^2$. Com quantidades maiores de silicato de sódio, a resistência mecânica diminui. Esta redução na resistência à compressão pode ser atribuída ao excesso de água que dissolve os íons do silicato de sódio e dificultam a formação da sílica gel. As adições inferiores a 2,5% da solução de silicato de sódio não apresentaram conformação suficiente para realizar a resistência à compressão antes da gasagem de CO_2 , devido à ausência da bentonita na areia base de sílica que possibilitaria a plasticidade a estes corpos-de-prova.

Nos corpos-de-prova com adições de 8 e 9% da solução de silicato de sódio, verificou-se a presença de microtrincas, o que causou pequenas inflexões na curva de resistência à compressão, e consequente queda da resistência à compressão.

A gasagem de CO_2 nos corpos-de-prova de areia base de sílica proporcionou um aumento significativo na resistência mecânica devido à formação da sílica gel, que proporcionou a solidificação dos corpos-de-prova da areia base de sílica.

A gasagem de CO_2 nos corpos-de-prova favoreceu a polimerização da sílica gel coloidal, pela perda de água, como apresentou a reação (2) no item 2.5. Conforme Owusu,[38] o gás carbônico permite a redução do pH e a formação de polímeros de sílica gel com ligação covalente O-Si-O,[38] responsável pela solidificação dos corpos-de-prova.

Pela figura 4.8 observa-se que há um aumento na resistência à compressão dos corpos-de-prova de areia a verde preparada até a quantidade adicionada da solução de 9% de silicato de sódio. Com quantidades superiores a 9% ocorre um decaimento da resistência à compressão. Os corpos-de-prova com adições inferiores a 2% da solução de silicato de sódio não solidificaram após serem submetidos à gasagem de CO_2 , impossibilitando obter os resultados de resistência à compressão.

A areia a verde preparada com 9% da solução de silicato de sódio apresentou resistência à compressão de $35,6\text{N/cm}^2$. As adições superiores desta solução na areia a verde preparada apresentaram menores resistências, devido provavelmente ao excesso de água, que não foi removido durante a gasagem, dificultando a formação do polímero de sílica gel. A gasagem de CO_2 permitiu o

aumento de 647,27% na resistência da areia a verde preparada com 9% da adição da solução de silicato de sódio, quando comparado sem a gasagem de CO_2 .

De uma maneira geral, ocorre um aumento da resistência mecânica com o aumento da quantidade da solução de silicato de sódio na ADF, até a quantidade de 15% de silicato de sódio. Com a adição de 20%, a resistência mecânica diminui. As adições de 10 e 15% apresentaram resistência à compressão próxima a 15N/cm^2 , e ao adicionar 20% da solução de silicato de sódio, a resistência diminuiu, decorrente do excesso de água presente na solução de silicato de sódio e do teor de umidade de ADF, que acarretou a dissolução do silicato de sódio dificultando a polimerização da sílica gel.

Observa-se na figura 4.8, que a solução de silicato de sódio e o CO_2 nos corpos-de-prova de ADF, nas adições de 10 e 15% de silicato de sódio, proporcionaram um aumento de 176,47% na resistência mecânica.

Ao comparar os corpos-de-prova preparados com as diferentes areias, observa-se que os resultados de resistência à compressão foram decrescentes da areia base de sílica > areia a verde preparada > areia descartada de fundição. A ocorrência disso pode ser atribuída ao fato de que a areia base de sílica não contém nenhum aglomerante recobrindo seus grãos e por isso, a aderência da sílica gel fica mais facilitada. Já na areia a verde preparada, há um recobrimento de bentonita em seus grãos e assim, a aderência do silicato de sódio entre seus grãos fica um pouco limitada.

A ADF apresentou menores resultados de resistência à compressão porque além da bentonita, os grãos dessa areia possuem aditivos que dificultam a interação do silicato de sódio entre eles.

Os moldes de areia a verde apresentam normalmente resistências à compressão inferiores a $18,5\text{N/cm}^2$. [19,20] Os resultados obtidos possibilitaram à ADF atingir valores de 15N/cm^2 , com 10% de silicato de sódio/ CO_2 ; a areia base de sílica atingir valores de $90,5\text{N/cm}^2$ e a areia verde preparada valores de $26,8\text{N/cm}^2$.

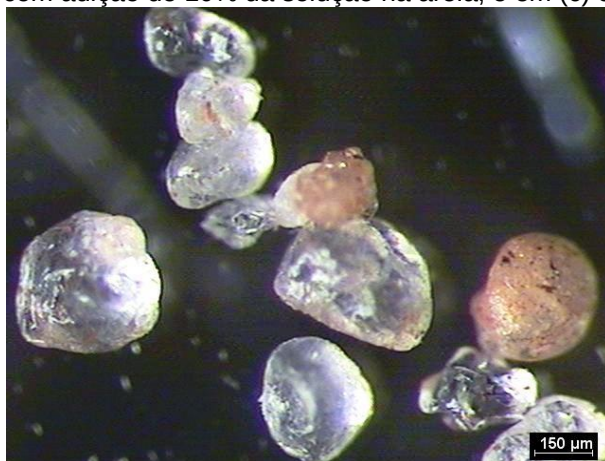
Observa-se que, mesmo a ADF que apresentou os menores valores de resistência, apresenta uma resistência compatível com os melhores moldes de areia de fundição, indicando que ela pode ser utilizada na preparação de moldes, podendo substituir os canais de vazamento e alimentadores no molde. Sua ação é proteger as areias que preenchem as cavidades dos moldes do contato direto com os metais vazados, evitando a desativação da bentonita e o descarte destas areias.

4.2.2- Caracterização das areias de fundição com o agente ligante silicato de sódio/CO₂

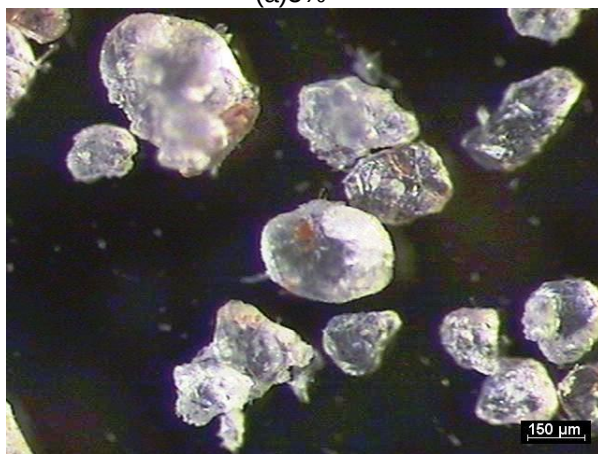
Na figura 4.9 são apresentadas as imagens da areia base de sílica, com adições de 5, 10 e 15% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO₂. Com a adição de 5%, observa-se na figura 4.9 (a) que há a aproximação dos grãos de sílica devido à formação da sílica gel que atuou como um ligante na areia.

Em (b), é possível observar o recobrimento da sílica gel ao redor dos grãos da areia base de sílica, favorecendo o endurecimento do corpo-de-prova. A adição de 15% apresentada na figura 4.9 (c) apresenta o excesso da sílica gel sobre os grãos desta areia.

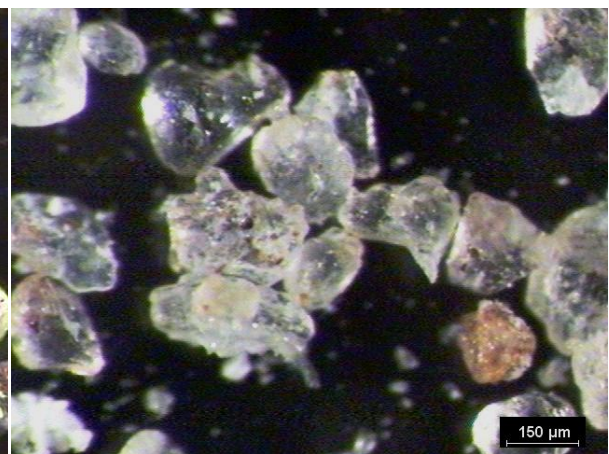
Figura 4.9- Imagens da areia base de sílica em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO₂ por microscopia ótica. Em (a) com adição de 5% da solução na areia; em (b) com adição de 10% da solução na areia; e em (c) com adição de 15% da solução na areia



(a)5%



(b)10%



(c)15%

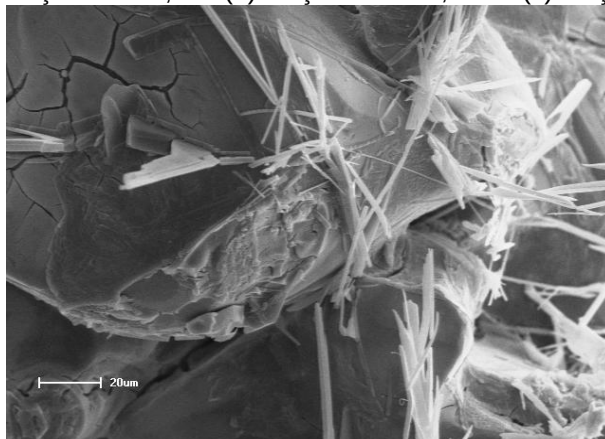
Fonte: A autora.

As micrografias da figura 4.10 obtidas por MEV detalham nos corpos-de-

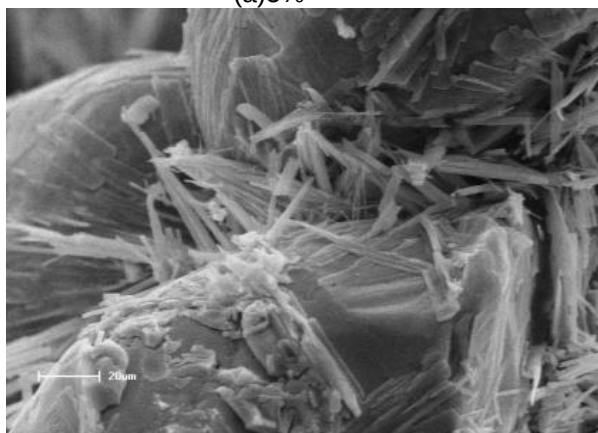
prova da areia base de sílica com adições de 5%, 10 % e 15% da solução de silicato de sódio/ CO_2 , a sílica gel formada. De um modo geral, verificam-se nas figuras (a), (b) e (c) que a sílica gel formada uniu os grãos desta areia e ocorreu o aparecimento de fissuras, provavelmente, devido à contração que os corpos-de-prova sofreram ao serem submetidos à gasagem do CO_2 .

Nas figuras 4.10 (a) e (b) podem ser observados cristais na forma de agulhas formadas entre os grãos de areia. No entanto, na imagem (c), não foi possível observar os cristais sobre os grãos, somente a sílica gel que envolve os grãos da areia base de sílica. A ausência de cristais sobre a superfície da areia pode ter sido decorrente da adição excessiva da solução de silicato de sódio na areia base de sílica.

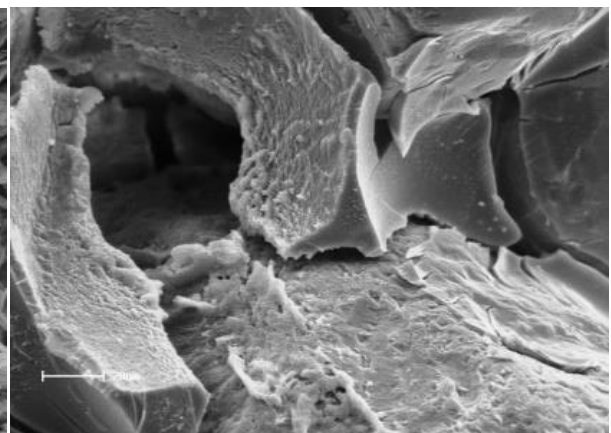
Figura 4.10- Imagens da areia base de sílica em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV. Em (a) com a adição de 5%; em (b) adição de 10%, e em (c) adição de 15% da solução



(a)5%



(b)10%



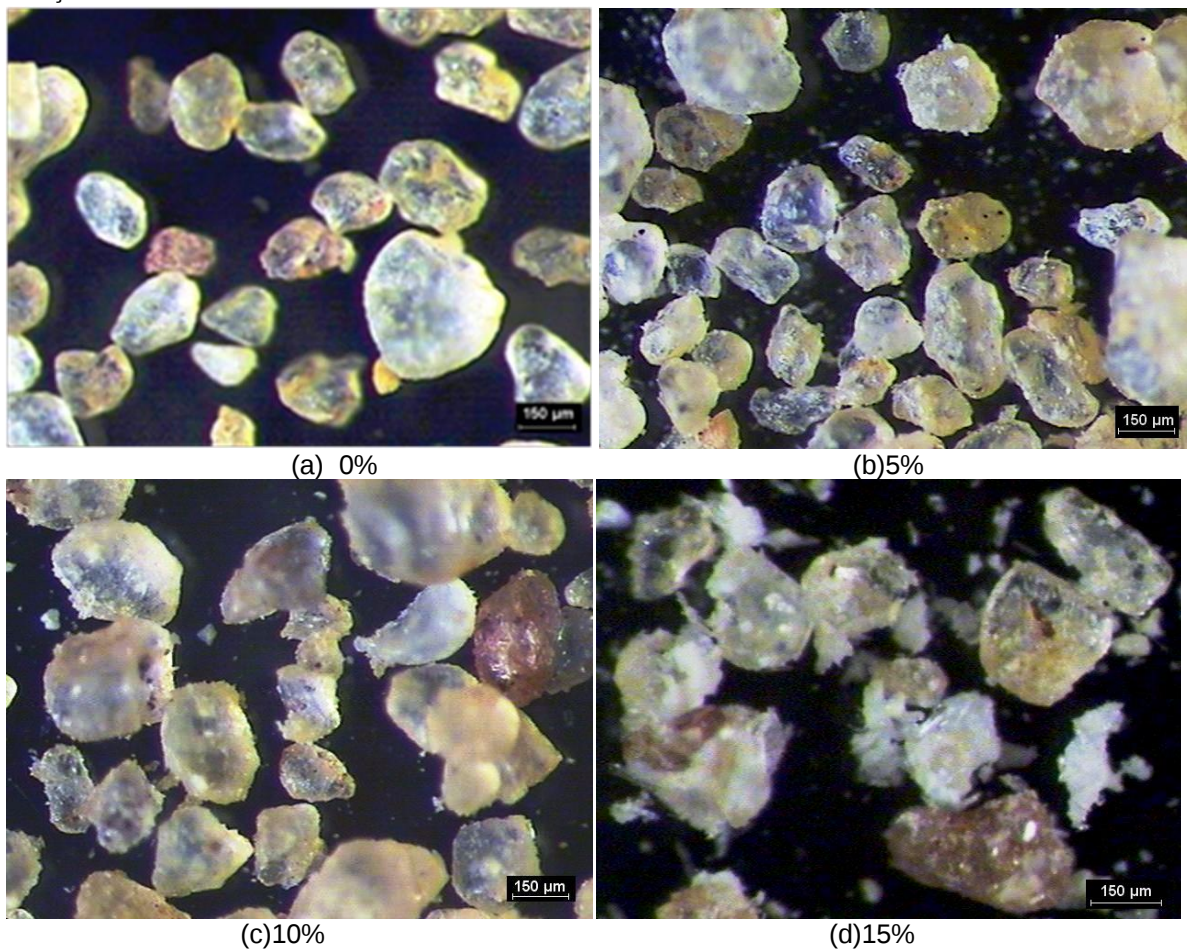
(c)15%

Fonte: A autora.

Na figura 4.11, para o caso da areia a verde preparada com adições de 5,10 e 15% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 , observa-se, em

contraste com a figura 4.11 (a), que as imagens (b), (c) e (d) apresentam a formação da sílica gel sobre os grãos desta areia. O aumento da adição da solução de silicato de sódio favoreceu o aumento da quantidade de sílica gel sobre os grãos de areia. Na imagem (c), a sílica gel ficou totalmente ao redor e entre os grãos de sílica. Já na figura 4.11 (d), verifica-se que há um excesso da sílica gel, que não está aderido aos grãos de areia.

Figura 4.11- Imagens da areia a verde preparada em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 em microscopia ótica. Em (a) sem adição de silicato de sódio/ CO_2 ; em (b) com 5% da solução; em (c) com adição de 10% da solução; e em (d) com adição de 15% da solução de silicato de sódio



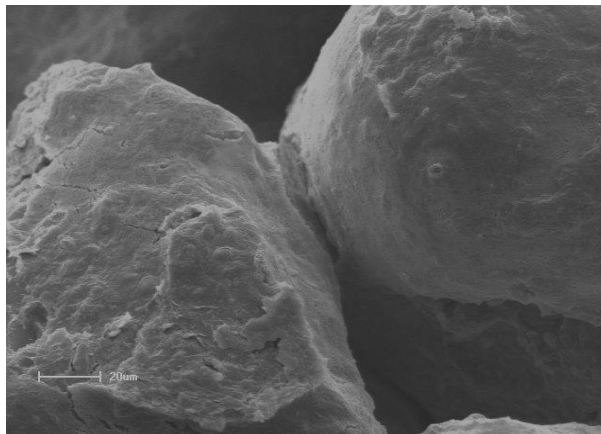
Fonte: A autora.

As imagens obtidas por MEV dessa areia a verde preparada com adições de 5, 10 e 15% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 são apresentados também na figura 4.12. Com a adição de 5% desta solução, figura 4.12 (a), observa-se um aumento na rugosidade do grão de areia devido ao recobrimento com sílica gel, observa-se também a união dos grãos de areia a verde preparada.

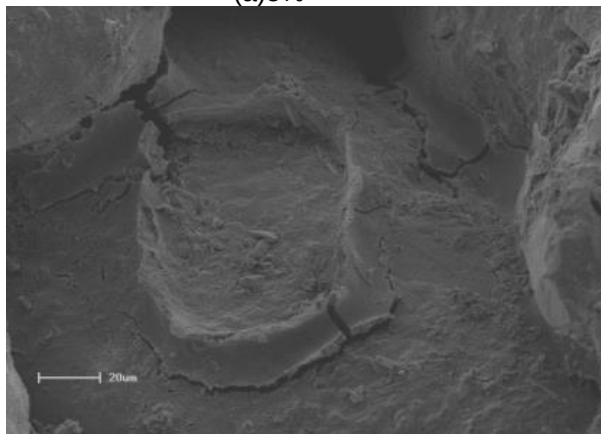
A figura 4.12 (b) apresenta a areia a verde preparada com adição de 10% da solução de silicato de sódio, na qual se observa uma região em que houve a remoção de um grão de areia e a presença da camada de sílica gel que ligava os grãos.

O corpo-de-prova com adição de 15% desta solução, na figura 4.12 (c), apresenta aglomerados de sílica gel e alguns cristais similares aos observados na areia base de sílica.

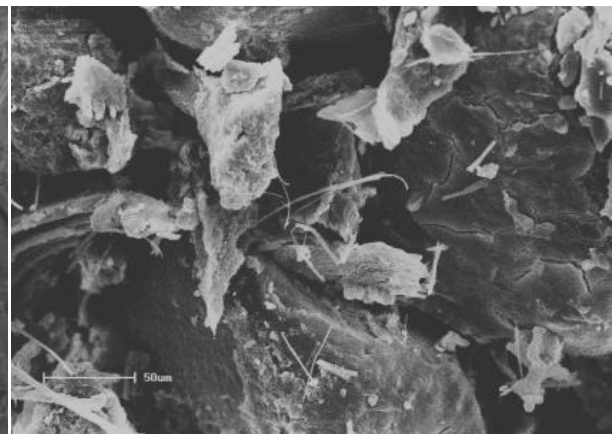
Figura 4.12- Imagens da areia a verde preparada em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 , obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV. Em (a) adições de 5% da solução; em (b) adição de 10% da solução e em (c) adição de 15% da solução de silicato de sódio.



(a)5%



(b)10%



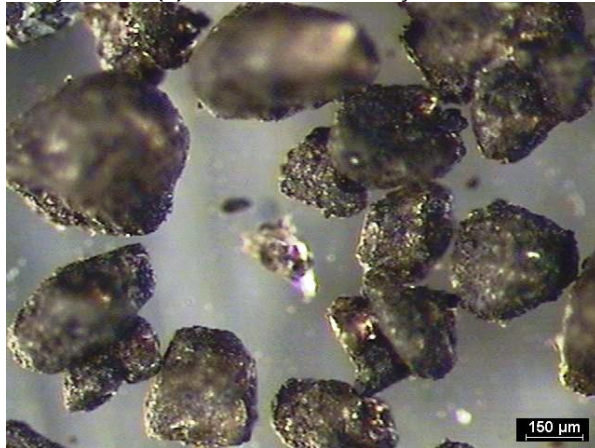
(c)15%

Fonte: A autora.

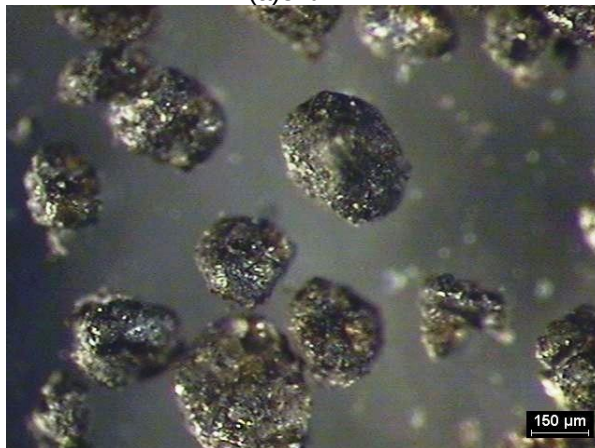
O estudo da morfologia da ADF mostrou que há uma menor interação desta com o agente ligante, como apresentam as imagens na figura 4.13. As adições de 5 e 10% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 , apresentadas nas imagens (a) e (b) respectivamente, não apresentaram diferenças morfológicas, porque a interação do silicato de sódio/ CO_2 com a ADF foi prejudicada devido a esta

areia já estar recoberta com bentonita e aditivo. A figura 4.13 (c) mostra a formação da sílica gel em excesso sobre os grãos desta areia.

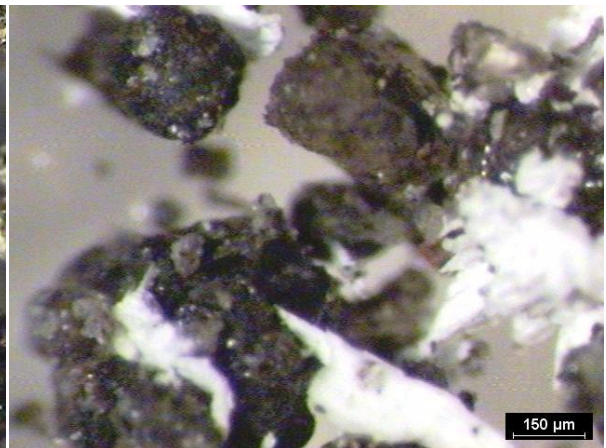
Figura 4.13- Imagens da ADF em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 em microscopia ótica. Em (a) com adição de 5% da solução; em (b) com adição de 10% da solução; em (c) com 15% da solução de silicato de sódio



(a)5%



(b)10%



(c)15%

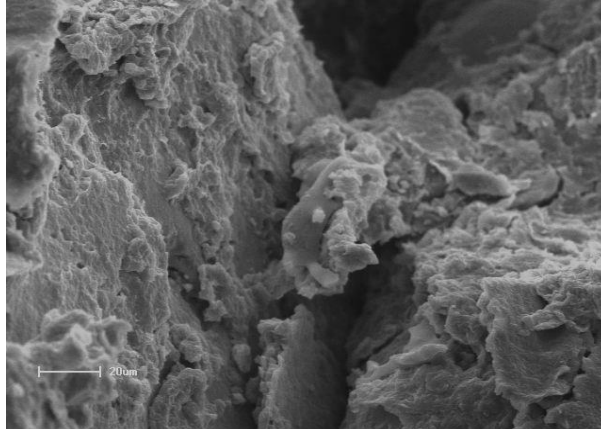
Fonte: A autora.

As micrografias por MEV dessa areia descartada de fundição com adições de 5,10 e 15% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 são apresentadas na figura 4.14.

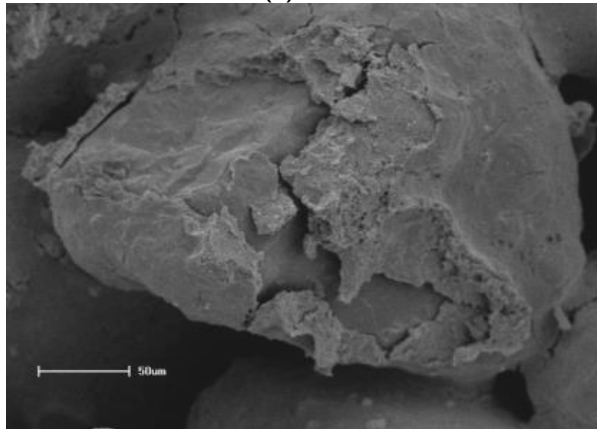
A adição de 5% desta solução na figura 4.14 (a) mostra a camada de sílica gel recobrindo o grão de ADF e unindo os grãos. A adição de 10% desta solução, figura 4.14 (b), mostra uma região em que houve a remoção de um grão de areia e a ruptura da camada de sílica gel que unia os grãos.

Na figura 4.14 (c) observa-se a camada de sílica gel que recobre e une os grãos de ADF, e sobre um grão, a deposição do excesso de sílica gel, onde também se verifica a presença de pequenos cristais.

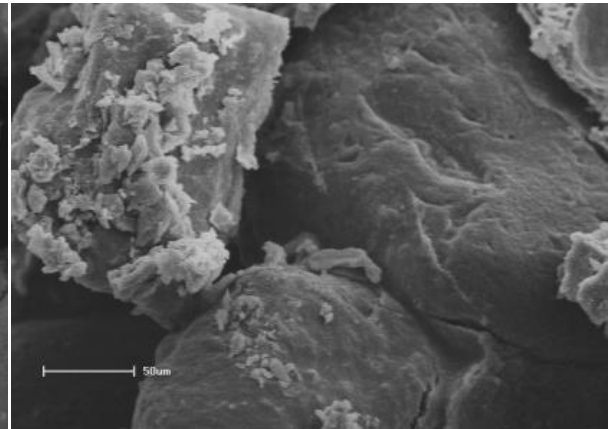
Figura 4.14- Imagens da ADF em diferentes adições da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 , obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV. Adições de 5% da solução em (a); em (b) adição de 10% da solução e em (c) adição 15% da solução de silicato de sódio



(a)5%



(b)10%



(c)15%

Fonte: A autora.

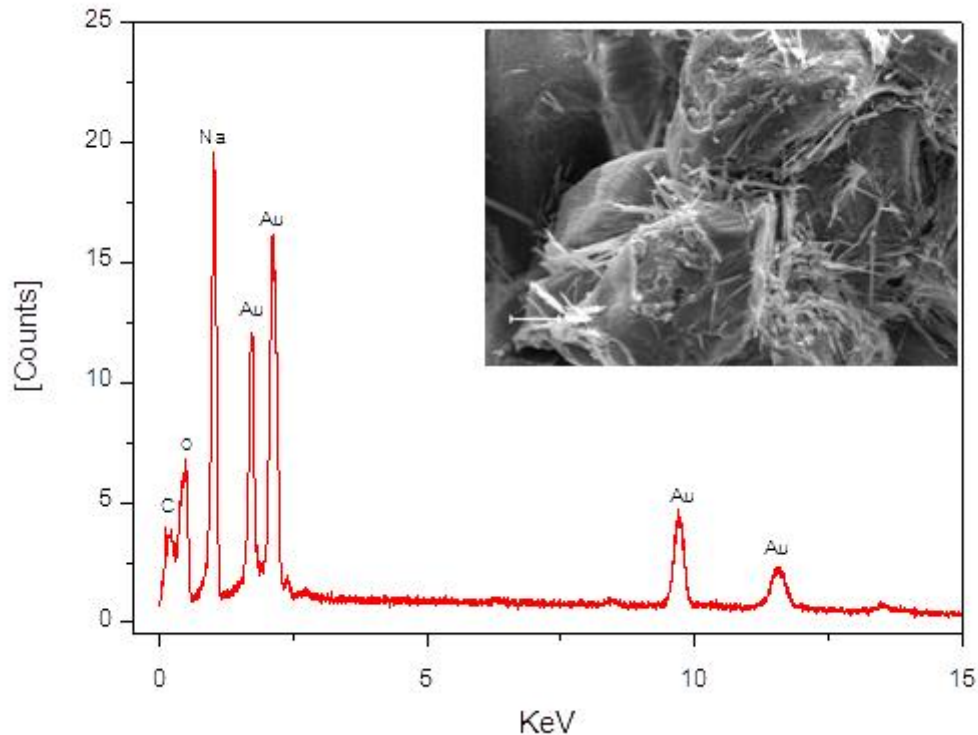
As micrografias da areia a verde preparada e da ADF apresentaram trincas na camada de sílica gel, as quais podem ser atribuídas à gasagem de CO_2 que agiu removendo a água da solução de silicato de sódio, acarretando a retração dos corpos-de-prova.

Pode-se observar pela quantidade maior de trincas apresentadas nas micrografias da ADF, que nesta areia, a adesão dos grãos de areia não foi tão efetiva quanto nas outras areias estudadas.

Para determinar a composição química dos cristais formados no processo de ligação dos grãos de areia com o silicato de sódio/ CO_2 foi feita uma microanálise desses cristais presentes na areia base de sílica, areia a verde preparada e ADF.

Na figura 4.15 são apresentados os cristais sobre os grãos de areia base de sílica ligada com 10% da solução de silicato de sódio e a microanálise realizada nessa região.

Figura 4.15- Imagem da areia base de sílica com 10% da adição solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 , obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV e a microanálise realizada por Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) nessa região

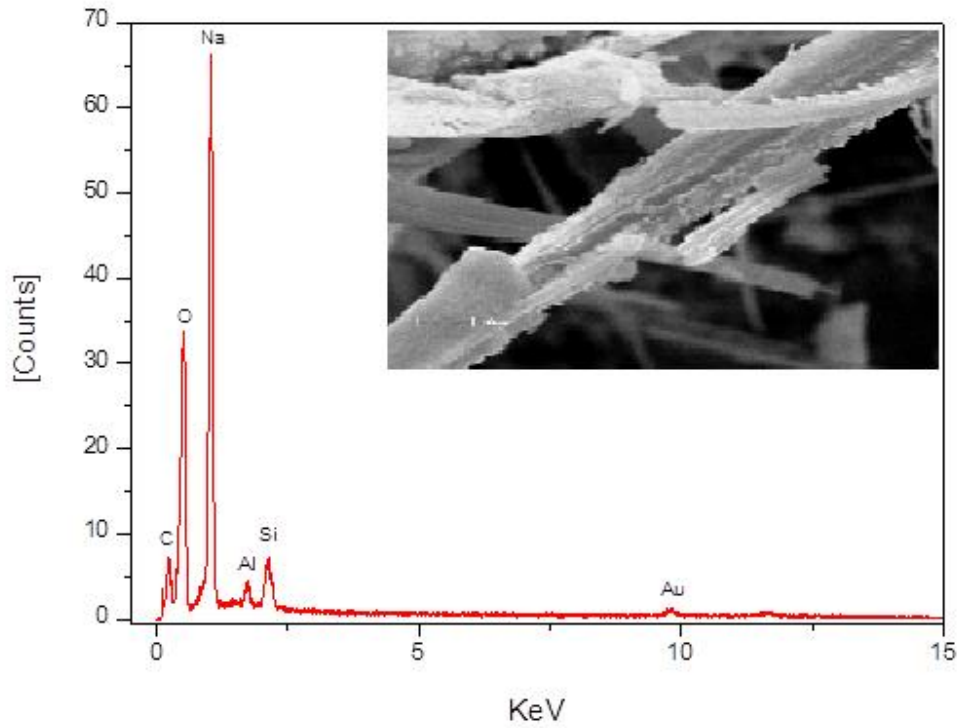


Fonte: A autora.

A microanálise, apresentada na figura 4.15 mostrou a presença de sódio, carbono e oxigênio nos cristais. De acordo com a reação (2), apresentada no item 2.5, o produto formado da reação entre silicato de sódio e o CO_2 é, além da sílica gel, o carbonato de sódio. Assim, pode-se concluir pela microanálise que os cristais formados sobre os grãos de areia podem ser de carbonato de sódio.

Na figura 4.16 são apresentados os cristais formados na areia a verde preparada ligada com 15% de silicato de sódio/ CO_2 e a microanálise feita nessa região. A microanálise na areia a verde preparada mostra a presença de sódio, carbono e oxigênio, como na areia base de sílica, além de alumínio e silício. A presença do alumínio e silício pode ser atribuída a bentonita presente nessa areia.

Figura 4.16- Imagem da areia a verde preparada com 15% da adição da solução de silicato de sódio após gasagem de CO_2 obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV e a microanálise realizada por Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) nessa região

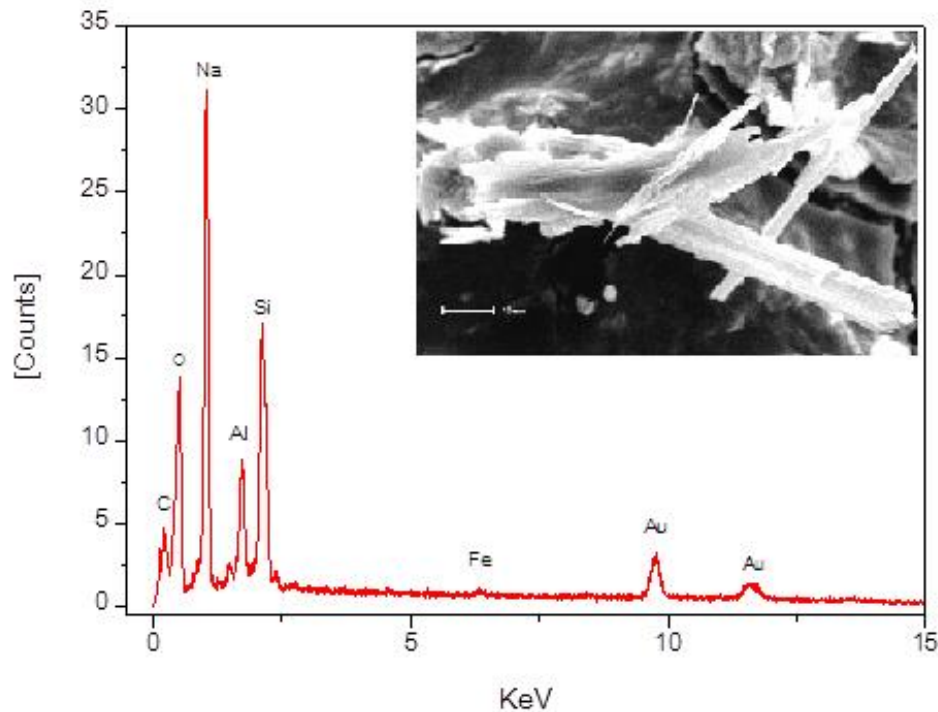


Fonte: A autora.

A micrografia e microanálise da ADF com 15% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 são apresentadas na figura 4.17. Pela microanálise observa-se a presença dos mesmos elementos químicos que nos cristais de areia a verde preparada, além do ferro.

A presença de ferro na ADF é decorrente do processo de vazamento de ferro fundido cinzento realizado nos moldes preparados com esta areia. O alumínio e o silício são originários da bentonita e da areia de sílica, enquanto que o ferro pode ser considerado impureza nestas areias.

Figura 4.17- Imagem da ADF com 15% da adição da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 , obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV e a microanálise realizada por Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) nessa região

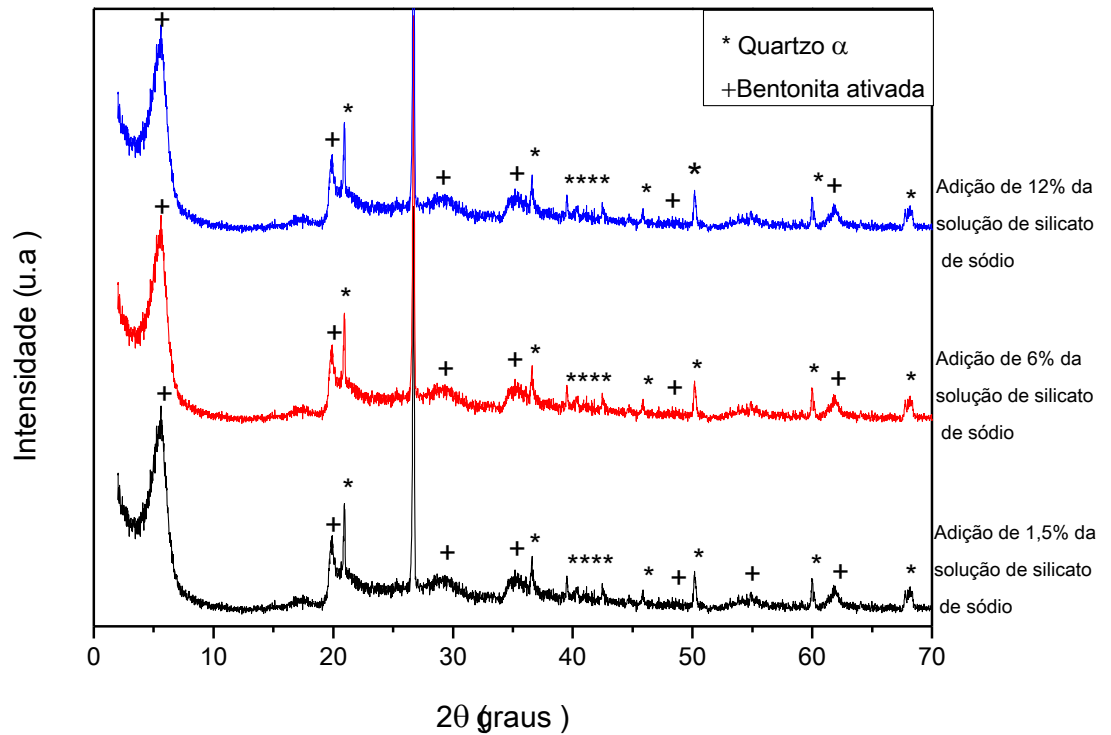


Fonte: A autora.

Para auxiliar o entendimento da interação do silicato de sódio/ CO_2 na ADF e na areia a verde preparada, é apresentada na figura 4.18, os difratogramas de raios X da bentonita ativada com adições de 1,5%, 6% e 12% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 .

Essas quantidades foram escolhidas, pois a adição mínima da solução de silicato de sódio, que permitiu a solidificação da argila foi 1,5% e a máxima de 12%, nas mesmas condições experimentais em que se aplicou a gasagem de CO_2 realizada em todos os corpos-de-prova das areias de fundição estudadas. Os difratogramas mostram a presença da bentonita e do quartzo α .

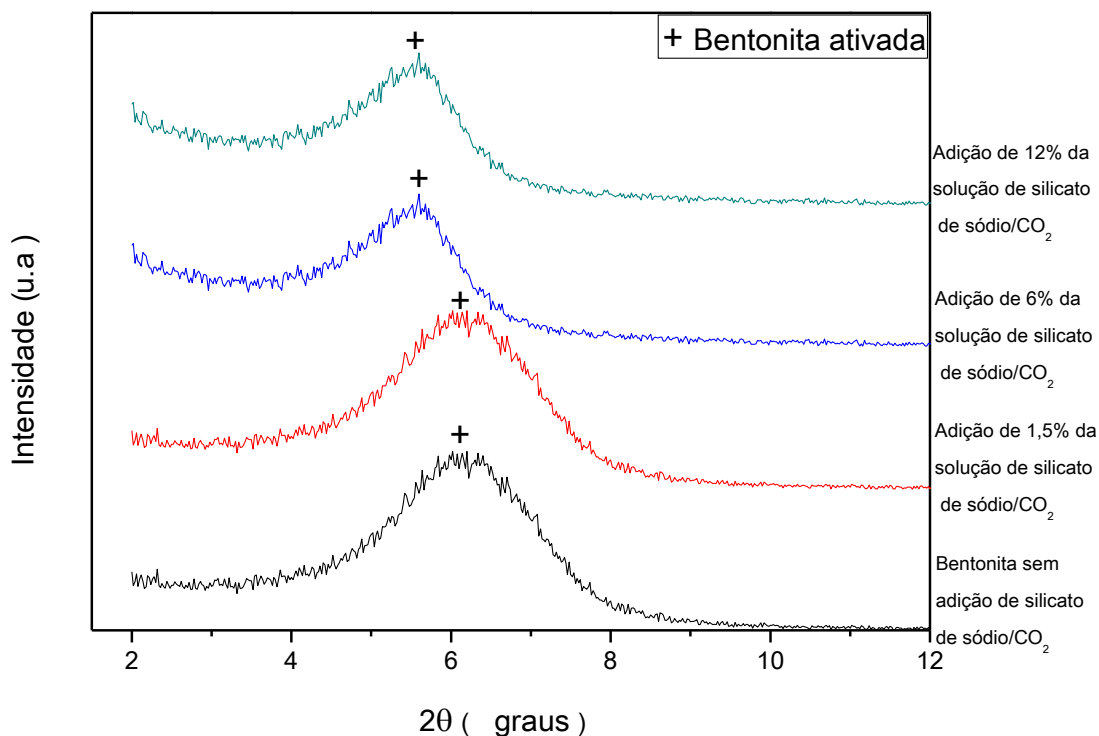
Figura 4.18- Difrátogramas de raios X da bentonita ativada com adições de 1,5%, 6% e 12% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2



Fonte: A autora.

Comparando-se, na figura 4.19, a região de 2θ de 2 a 9° observa-se que há um deslocamento do pico característico da bentonita ativada conforme é adicionado silicato de sódio. Este deslocamento pode ser atribuído à adsorção da solução de silicato de sódio nas lamelas desta bentonita.

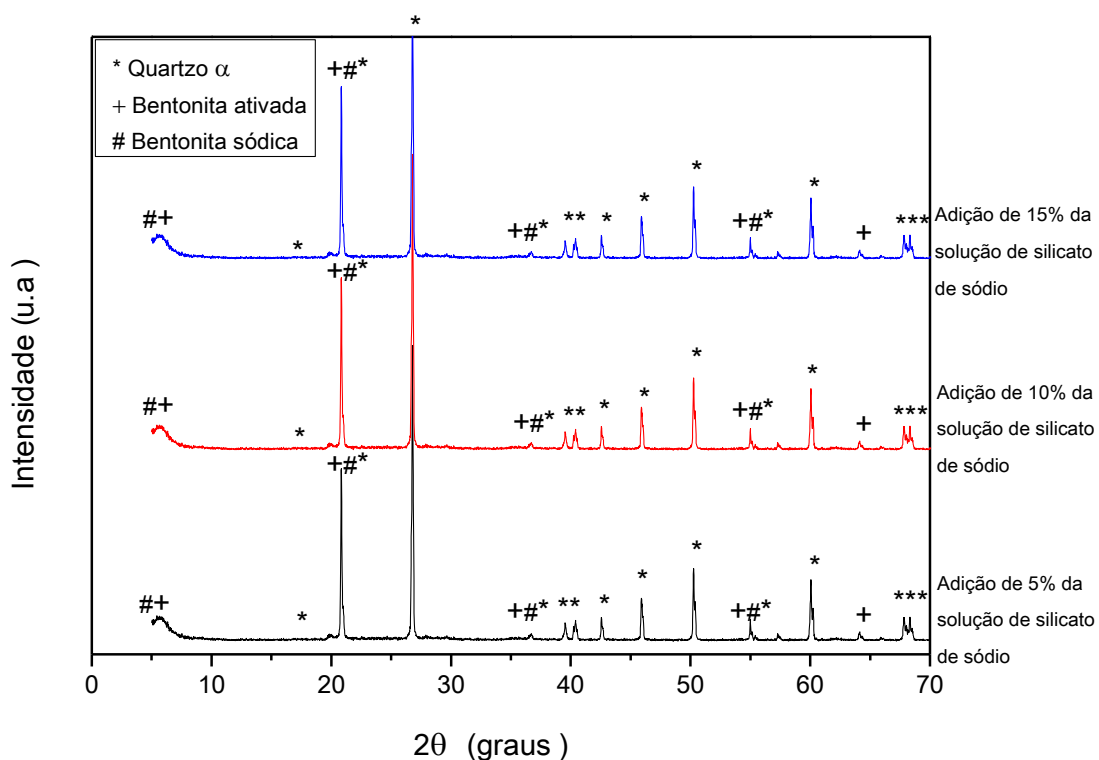
Figura 4.19- Difrátogramas da bentonita ativada com e sem a solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 , apresentado a região característica desta argila



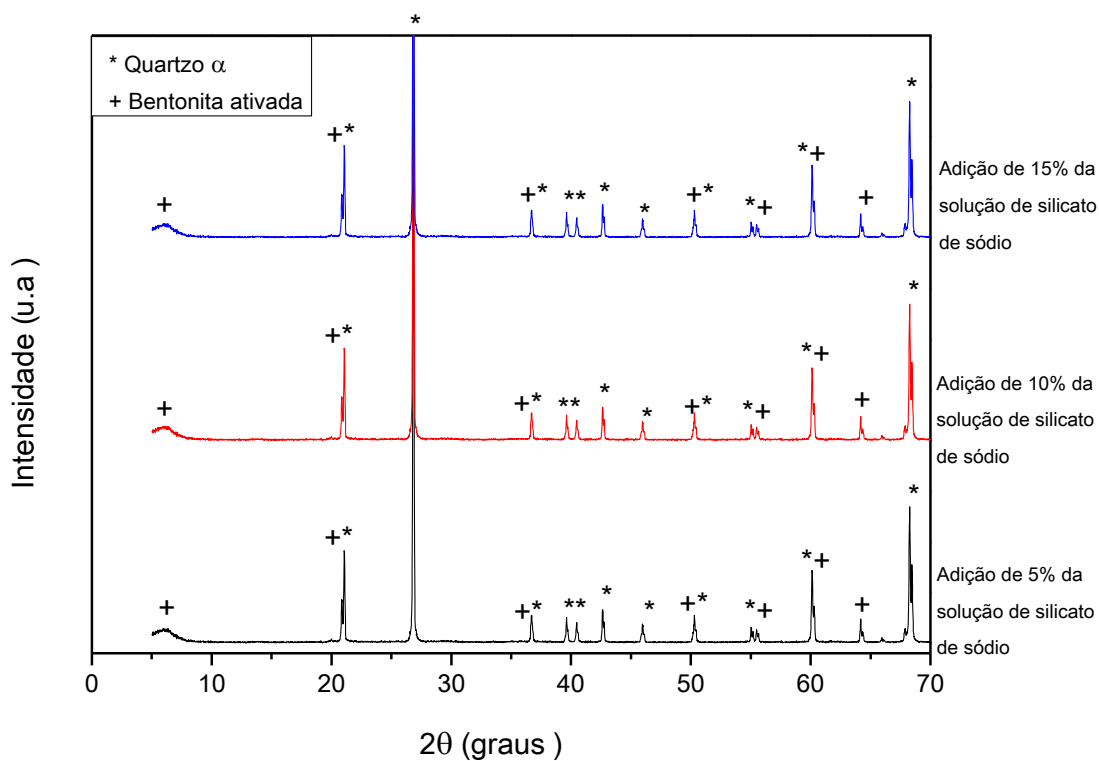
Fonte: A autora.

A figura 4.20 apresenta as adições de 5%, 10% e 15% da solução de silicato de sódio após a gasagem de CO_2 na ADF, na areia base de sílica e na areia a verde preparada.

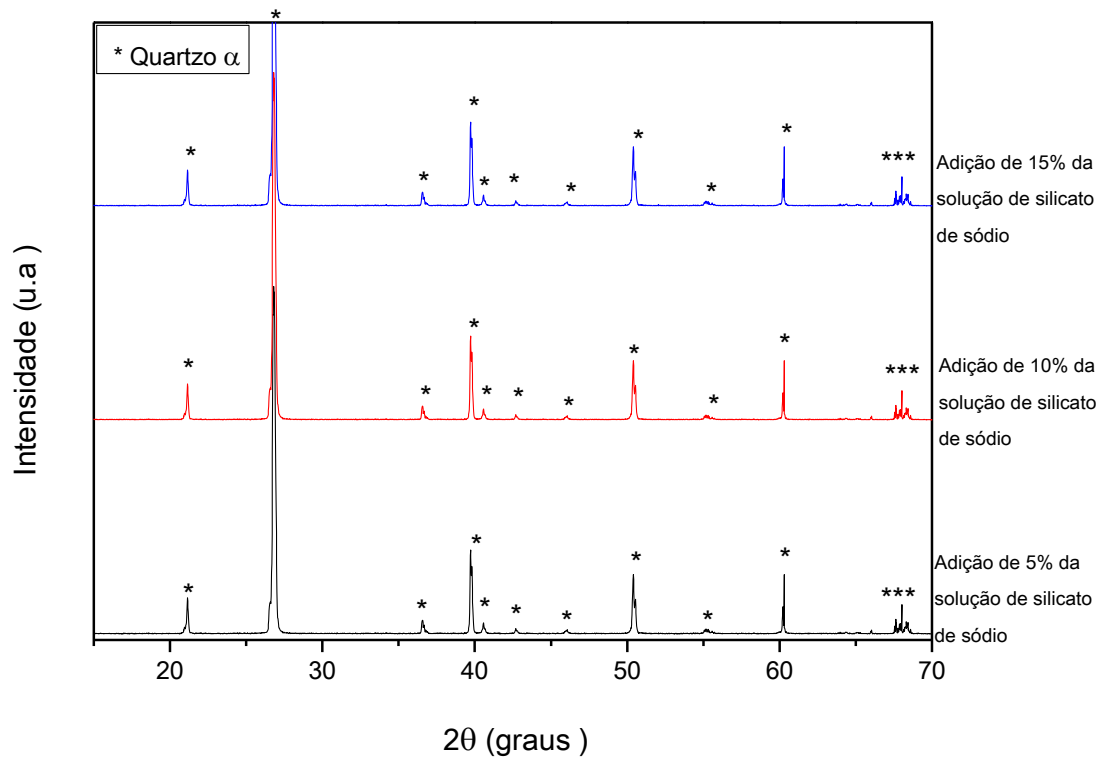
Figura 4.20- Difratogramas de raios X das areias de fundição ligadas 5, 10 e 15% de silicato de sódio/CO₂. Em (a) da ADF; em (b) areia a verde preparada, e em (c) areia base de sílica



(a)



(b)



(c)

Fonte: A autora.

Todos os difratogramas apresentam, como esperado, a fase quartzo α como fase majoritária e a ADF e areia a verde preparada apresentam também os picos referentes as argilas. A sílica gel não pode ser detectada, pois possui uma estrutura amorfa.[59]

4.3- MOLDE DE AREIA DESCARTADA LIGADA COM SILICATO DE SÓDIO/CO₂

Conforme o item 3.3, um molde de ADF foi preparado a partir de uma adição de 15% da solução de silicato de sódio/CO₂ para verificar seu comportamento durante o processo de vazamento em temperaturas de ferro líquido. O processo de vazamento de ferro fundido foi realizado em uma indústria de fundição na cidade de Ponta Grossa, possibilitando um ensaio realista do processo de fundição.

4.3.1- Preparação e desmoldagem do molde de ADF ligada com silicato de sódio/CO₂

A caracterização da ADF com o agente ligante silicato de sódio/CO₂ mostrou que é possível seu emprego na preparação de moldes. Os resultados de resistência mecânica, após a gasagem de CO₂ nos corpos-de-prova de ADF, foram os requisitos empregados para a escolha da melhor combinação areia: agente ligante.

A adição de 15% da solução de silicato de sódio foi propositadamente em excesso, para verificar o comportamento dessa mistura em altas temperaturas, com o vazamento de ferro fundido cinzento.

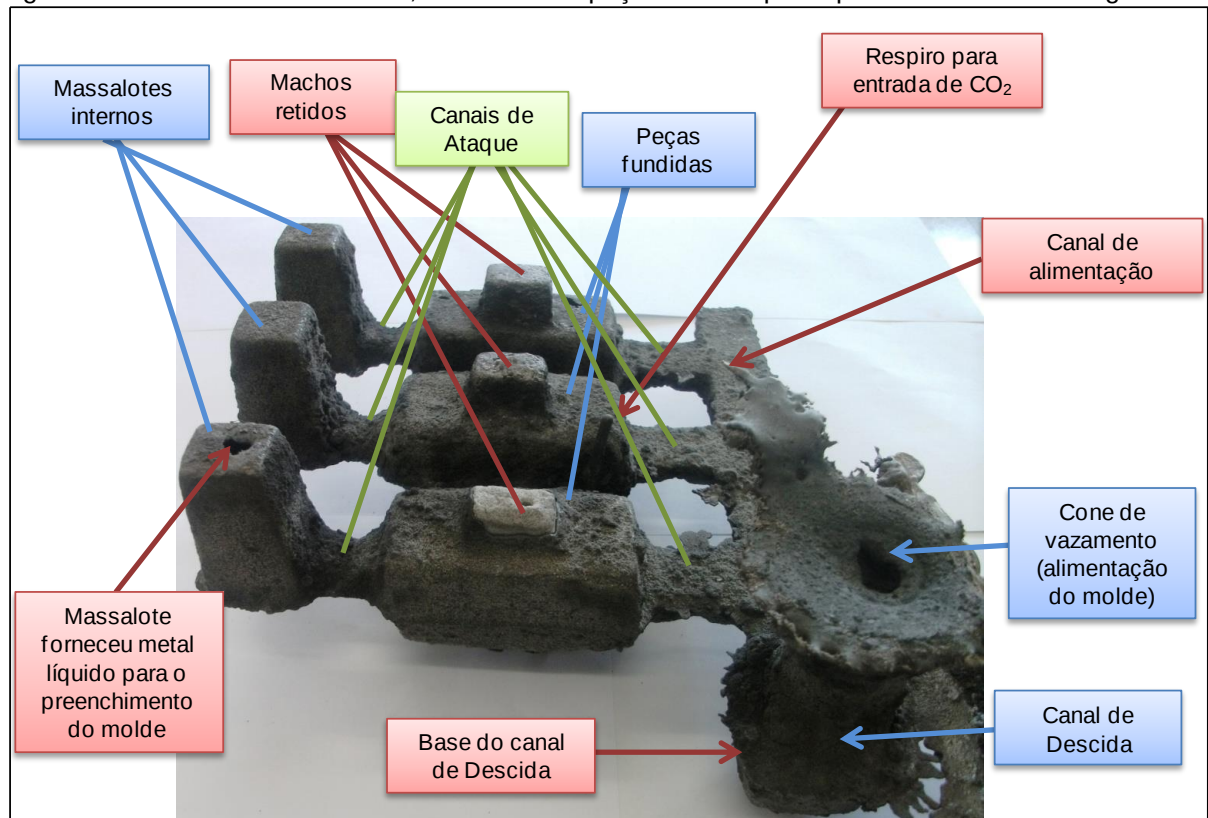
Na preparação do molde verificou-se a moldabilidade da ADF pelo ensaio de compactabilidade que resultou em 50%, sendo coerente com a literatura.[20] Este ensaio refletiu em boas propriedades de consistência, escoabilidade e plasticidade, adequadas para a preparação do molde desta areia.

No processo de vazamento foram medidas as temperaturas no interior da panela e no interior do molde fabricado utilizando um termopar tipo K. A temperatura do metal fundido no interior da panela de vazamento foi de 1395°C. Logo após o vazamento do metal, a temperatura medida no interior do molde foi de 1314°C. A bacia de vazamento foi colocada sobre o canal de descida do molde e esta permaneceu totalmente preenchida pelo metal fundido durante todo o processo.

Após a solidificação e resfriamento do metal fundido, o molde foi cuidadosamente desfeito para a observação do comportamento da mistura ADF com a solução de silicato de sódio. Ao remover os blocos de areia, verificou-se que houve um rompimento longitudinal entre a areia que preencheu o molde e a areia em contato com a peça, formando uma camada de areia sobre toda a superfície da mesma.

A remoção de um fragmento do molde na região dos massalotes apresentou uma camada de 2 mm de ADF que ficou aderida a este. Esta camada também foi verificada nos canais de descida e ataques e na peça obtida, porém sua espessura nestas regiões variou de 5 a 10 mm. O conjunto solidificado no molde de ADF com 15% da solução de silicato de sódio/CO₂ é mostrado na figura 4.21.

Figura 4.21- Canais de vazamento, massalotes e peça fundida após o processo de desmoldagem



Fonte: A autora.

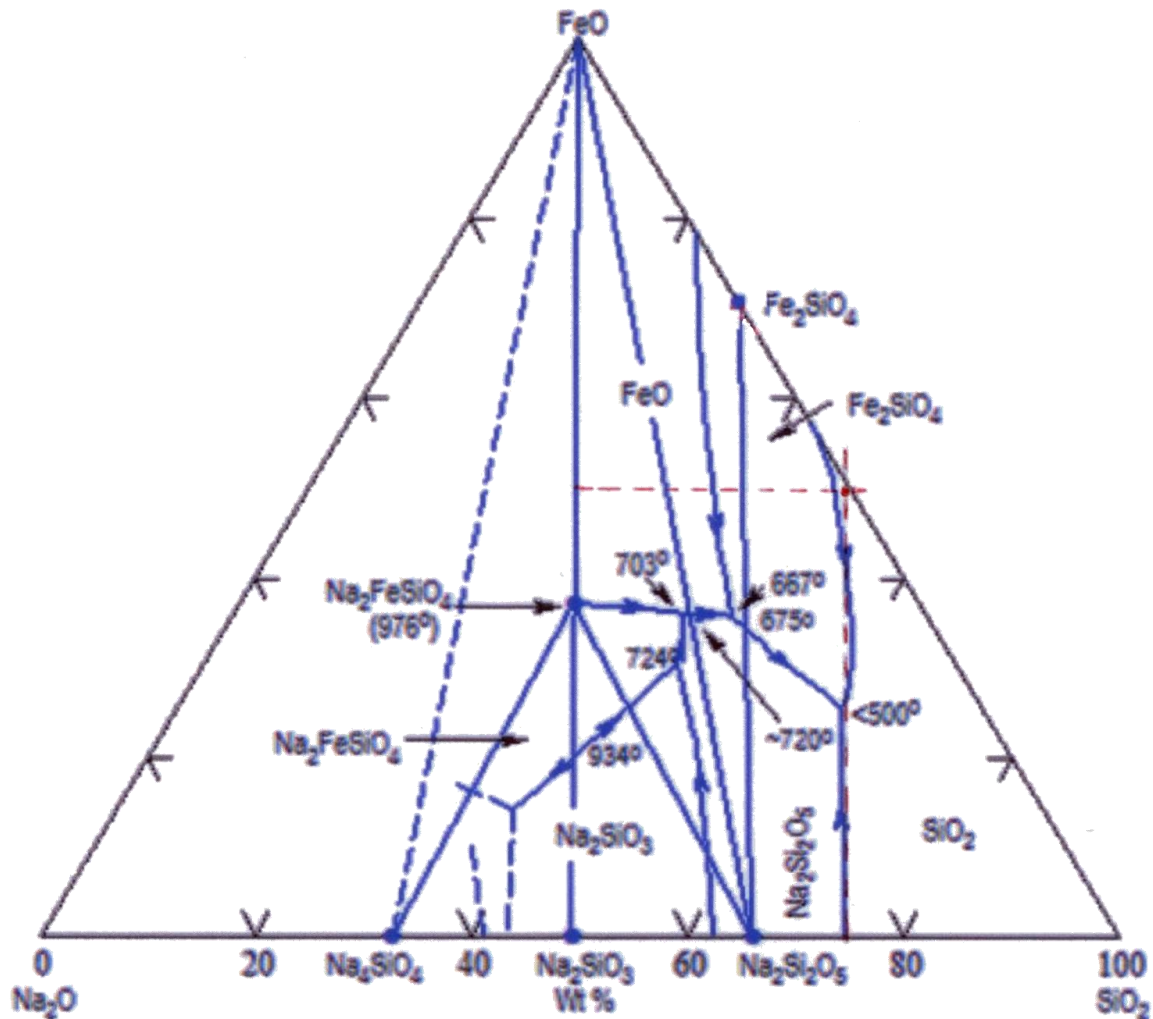
A literatura [60] aponta que o silicato de sódio tem um comportamento fundente com a sílica, o que poderia favorecer a vitrificação da sílica e sua adesão à superfície da peça, promovendo assim, o chamado defeito de sinterização.

Outro fator preponderante para este defeito é a presença de óxido de ferro na superfície da peça, que leva a necessidade de avaliar o equilíbrio ternário entre SiO_2 - Na_2O - FeO , como mostra a figura 4.22.

Na intenção de estimar as fases presentes no processo de sinterização do molde sobre a peça, e restringindo ao triângulo FeO - Na_2SiO_3 - SiO_2 , pode-se verificar que a composição está localizada no triângulo de compatibilidade Fe_2SiO_4 - $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ - SiO_2 que no equilíbrio leva a formação de um eutético ternário em torno de 500°C . A temperatura de vazamento do ferro fundido foi em 1314°C , bem acima da formação de líquido, o que explica a sinterização ocorrida. Este é um fator importante para possíveis projetos de canais e a adequação do material de moldagem utilizando silicato de sódio/ CO_2 .

Sua aplicação como substituinte dos sistemas de canais de vazamento e alimentadores pode ser realizada, porém, sua quantidade deve ser otimizada para minimizar o problema de sinterização.

Figura 4.22- Diagrama ternário $\text{SiO}_2\text{-NaO-FeO}$ apresentando a fase formada na sinterização da ADF



Fonte: CARTER,P.T.;IBRAHIM,M.*Journal Soc. Glass.Tecnol*, v.36, n.170, p.142-163, 1952. Disponível em: **Phase Equilibria Diagram Database**. versão 3.1.0, nov. 2011. 1,91Kb.Plataforma Windows.[60]

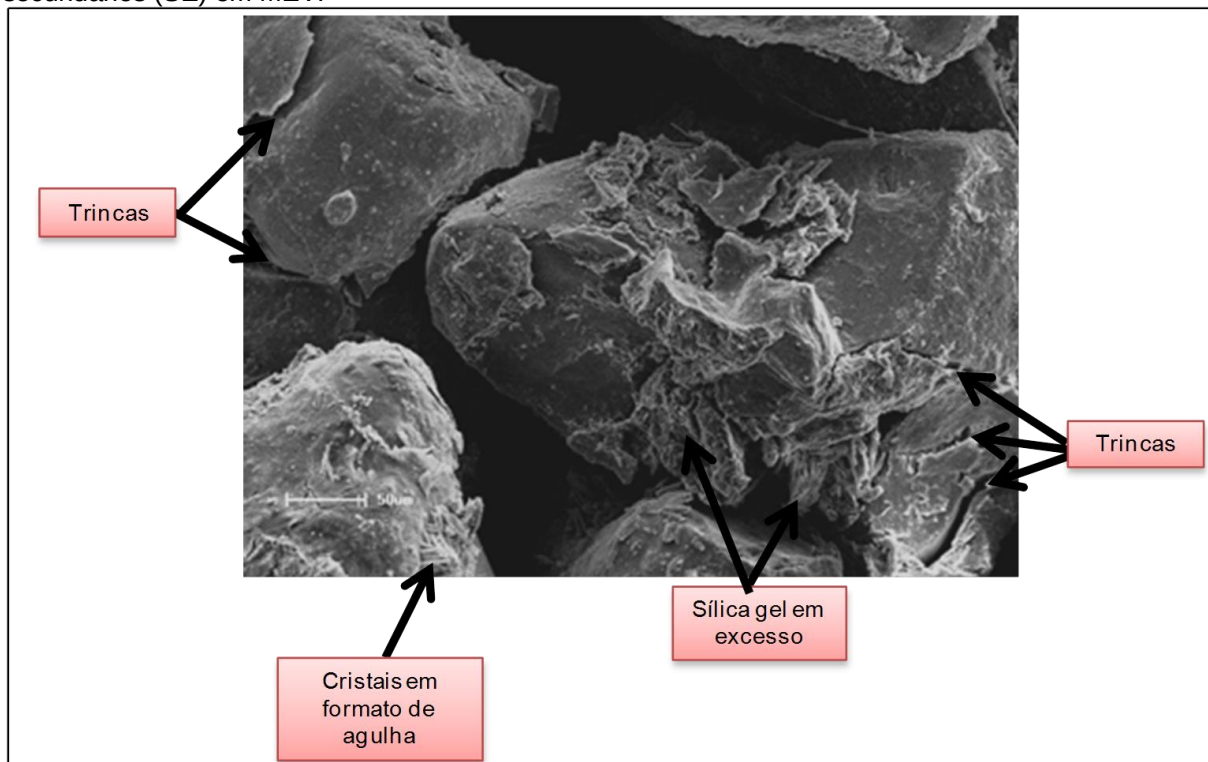
A opção de verificar duas amostras para representar a areia próxima ao metal solidificado e a interface entre a areia e o metal solidificado possibilitou estudar a interação da ADF com o agente ligante silicato de sódio/ CO_2 .

As análises microestruturais da areia de faceamento permitiu a observação da camada de sílica gel que recobria os grãos desta areia usada. A região da interface metal solidificado e areia foram realizadas para verificar a formação de camada vítrea decorrente da adição em excesso da solução de silicato de sódio.

Na figura 4.23 é apresentada a micrografia da amostra da areia que esteve próxima ao metal líquido no interior do molde. Observa-se que a sílica gel foi formada sobre os grãos de ADF recobrindo-os, e em algumas regiões, apresentou trincas. Este recobrimento é observado em excesso sobre a interface entre dois

grãos de ADF. Os cristais em formato de agulhas foram verificados sobre a superfície do grão de areia. Estes cristais podem indicar que a temperatura de vazamento nas regiões próximas ao metal fundido não foi suficiente para degradar os materiais presentes da ADF, uma vez que estes cristais foram verificados na figura 4.17 que onde foi apresentado a microanálise e micrografia destes cristais antes do processo de vazamento.

Figura 4.23- Imagem da ADF na região próxima ao metal fundido, obtidas com detector de elétrons secundários (SE) em MEV.

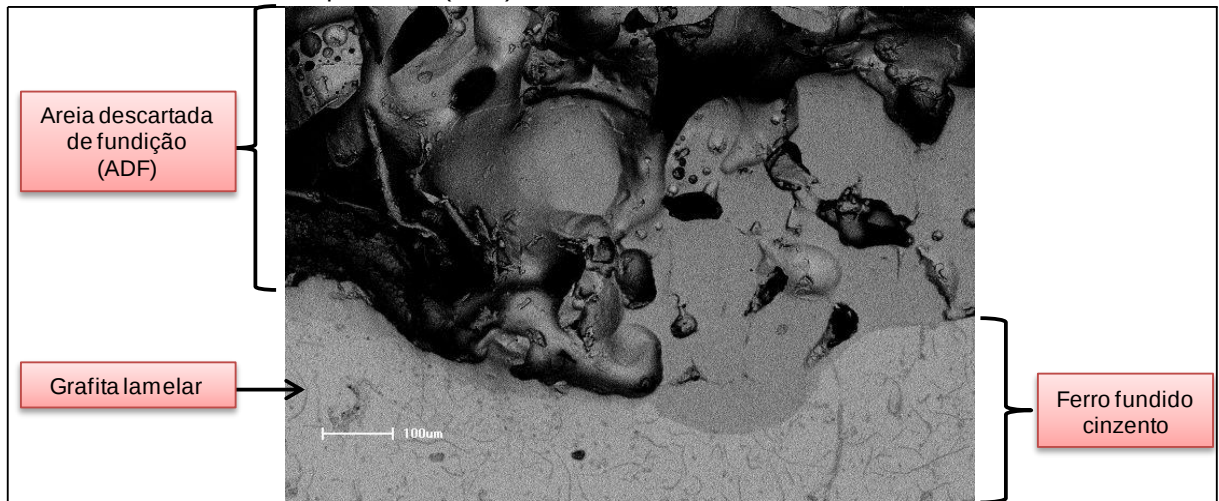


Fonte: A autora.

Ao comparar a micrografia da figura 4.23 com a micrografia obtida da ADF com a mesma adição do agente ligante silicato de sódio/ CO_2 , na figura 4.14 (c), observa-se que o calor imposto destaca as camadas superficiais de sílica gel do grão de areia. As trincas observadas na camada de sílica gel possibilita a queda da resistência mecânica, facilitando a extração da peça fundida.

Nas regiões de maiores temperaturas, na interface da solidificação do ferro fundido cinzento com a ADF, pode-se observar a presença de material vítreo homogeneamente aderido ao metal, como apresentado na figura 4.24.

Figura 4.24- Imagem da interface entre as regiões da ADF e do metal solidificado, obtidas com detector de elétrons retroespalhados (BSE) em MEV.



Fonte: A autora.

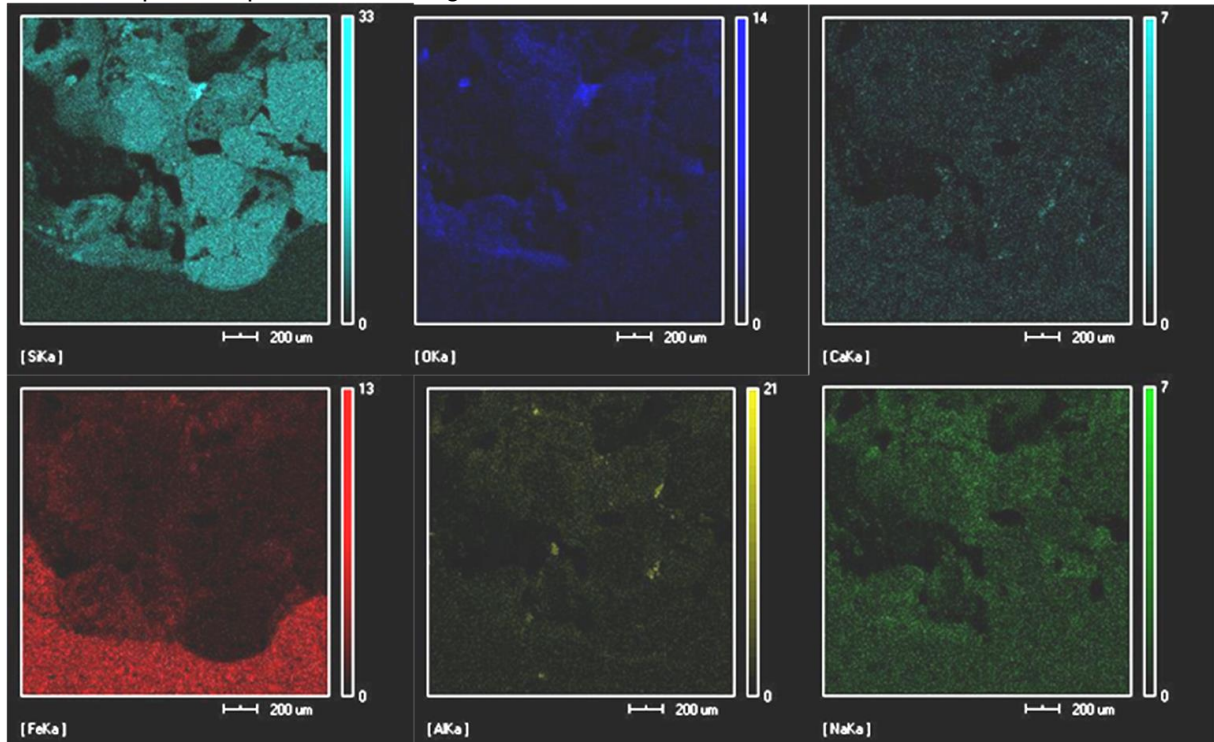
A região de interface entre o metal solidificado e a areia aderida sobre a peça foi observada detalhadamente utilizando a microscopia eletrônica de varredura (MEV). A micrografia, na figura 4.24, apresenta a região na interface entre a areia e o metal solidificado. Observa-se na interface uma região bem definida que diferencia as regiões formadas pela areia descartada de fundição (ADF) e o metal solidificado.

Na região da ADF verifica-se a sinterização ocorrida pelo calor transferido durante a solidificação do ferro fundido, pois, houve a coesão dos grãos desta areia. Já na região do ferro fundido cinzento, pode-se verificar a presença de grafitas lamelares, características deste metal.

Cabe ressaltar que o ferro fundido cinzento é uma liga metálica de Fe-C-Si, a formação de grafitas ocorre porque durante a solidificação deste metal, parte do carbono não se combina com o ferro e forma as grafitas com coloração cinza,[13] como mostrado na figura 4.24.

A confirmação dos elementos químicos presentes nesta região foi determinada pela técnica de EDS (Espectroscopia de raios X por dispersão em energia). A figura 4.25 apresenta o mapeamento dos elementos silício, oxigênio, ferro, alumínio, sódio e cálcio. Verifica-se a interface entre as regiões da ADF e do metal solidificado apresentadas no mapeamento dos elementos silício e ferro, confirmando a micrografia na figura 4.24.

Figura 4.25- Mapeamento por Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) dos elementos químicos presentes nas regiões da ADF e do metal solidificado



Fonte: A autora.

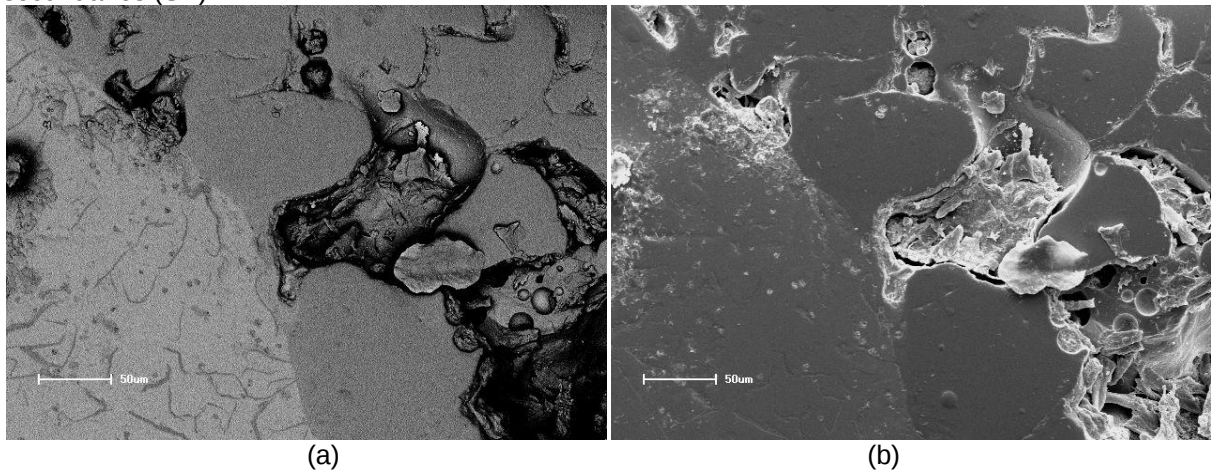
Os mapeamentos mostrados na figura 4.25, informam que não há uma grande penetração do metal líquido no molde de ADF, pois não se verifica a presença de ferro na sílica.

E ainda, são observados os fenômenos que decorrem da interação metal-molde, mais especificamente, das interações entre metal líquido no momento do vazamento de ferro fundido cinzento, e as interações que ocorrem na parede interna do molde. A presença do agente ligante em excesso na ADF pode favorecer tais fenômenos, estes podem estar associados aos processos de sinterização, penetração nos estados vapor e líquido, e também, nos processos de erosão, e formação de carbono lustroso ou carbono vítreo. Mais detalhes sobre estes fenômenos decorrentes na interface metal/molde podem ser verificados nas seguintes literaturas: Sands e Shivkumar[61]; Han e Hansen[62]; Naro[63] Chakherlou, et al.[64].

Na figura 4.26 observa-se a interface das regiões da ADF e do ferro fundido cinzento. A imagem da figura 4.26 (a), obtida por elétrons retroespalhados, mostra a diferença entre estas regiões, verifica-se a presença de grafitas na região do metal solidificado à esquerda e a sinterização da ADF. A imagem da figura 4.26 (b) obtida

por elétrons secundários evidencia a região do metal solidificado e mostram a remoção da camada de sílica gel e do material vítreo que recobriram o conjunto canais/peça fundida.

Figura 4.26- Imagens da interface ADF e metal solidificado em MEV. Em (a) Imagem realizada com detector de elétrons retroespalhados (BSE); e em (b) imagem realizada com detector de elétrons secundários (SE)



Fonte: A autora.

As características observadas na ADF após o processo de moldagem evidenciam que a camada de sílica gel formada com 15% da solução de silicato de sódio/ CO_2 sobre a ADF e o metal solidificado foi sinterizada, como mostra a figura 4.26 (b). Este fenômeno foi devido à temperatura de vazamento no interior do molde, pois, o silicato de sódio favoreceu a formação de fases líquidas, como mostrou o diagrama, na figura 4.22, facilitando a sinterização da ADF sobre o ferro fundido cinzento.

Ao observar os difratogramas das bentonitas presentes na ADF, na figura 4.4, verifica-se a presença de quartzo α finamente dividido nestas argilas, o que pode ter contribuído para formação vítrea, uma vez que, na ADF foram adicionadas 12% destas argilas e para esta areia tornar-se a areia de retorno, a indústria de fundição adicionava mais 1% destas argilas.

As areias em contato com o metal solidificado ficaram aderidas sobre o metal solidificado, devido ao excesso da solução de silicato de sódio que proporcionou a formação de material vítreo que aderiu a ADF e o metal solidificado. Isso sugere que os moldes de ADF sejam pintados para as aplicações de moldagem.

Já as areias próximas ao metal solidificado apresentaram trincas na camada

de sílica gel, o que é um fator importante na preparação do molde de ADF com o agente ligante silicato de sódio/ CO_2 , pois apresenta a facilidade de remover o molde da peça fundida, devido a baixa resistência à compressão, aumentando a colapsibilidade do molde.

5- CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- A areia de descarte de fundição (ADF), considerada residual, apresentou propriedades adequadas para uso direto em fundição, compatíveis com as areias a verde de sistema. Isto indica serem boas matérias-primas para seu reuso;
- A composição mais adequada obtida pelos resultados de resistência à compressão na ADF foi com 15% da solução de silicato de sódio/ CO_2 , entretanto, esta apresentou uma maior sinterização na peça fundida. Um comparativo entre a ADF e a areia a verde preparada, empregando as mesmas adições da solução de silicato de sódio, mostrou que a ADF possui resistência à compressão inferior. De certo modo, esta propriedade é importante, pois permite maior colapsibilidade ao molde;
- Adições da solução de silicato de sódio na ADF em teores menores e que atendam a um mínimo de resistência para os processos de moldagem podem ser estimados em torno de 9% para a ADF; 6% para a areia a verde preparada e 3% na areia base de sílica. Com estes teores foram atingidas resistências à compressão da ordem de 10N/cm^2
- A interação da areia base de sílica com o agente ligante proporcionou o aumento da sua resistência à compressão quando comparado com as areias a verde de fundição, devido à ausência de bentonita aglomerada aos seus grãos. No entanto, a presença bentonita na ADF exige maior quantidade da solução de silicato sódio para atingir a mesma resistência à compressão em relação a areia base de sílica. Este fenômeno deve ser mais compreendido, uma vez que pela difração de raios X, a solução de silicato de sódio foi adsorvida nas lamelas de bentonita, reduzindo esta interação nas areias a verde, permitindo que o molde de ADF, mesmo sendo menos resistente, pudesse garantir sua integridade;
- A camada de adesão do molde, após o vazamento de metal líquido, foi decorrente da presença de material vítreo aderido ao metal,

possibilitado pela sinterização ocorrida no excesso da adição da solução de silicato de sódio. Este favoreceu a formação de fases líquidas quando da transferência de calor da solidificação do metal para o molde. O quartzo α finamente dividido nas argilas pode ter contribuído para formação vítrea, Isso sugere que os moldes de ADF sejam pintados para as aplicações na moldagem.

- É possível produzir moldes a partir da ADF e sua aplicação pode contribuir para a redução do descarte desta areia, bem como de sua reciclagem. Ao considerar que a indústria de fundição, geradora da ADF, reutilize-a como protetora dos sistemas de canais, evita-se a necessidade de realizar as análises ambientais na ADF, explicitados nas normas NBR 10004,[1] NBR 10005 [46] e NBR 10006,[65] as quais são aplicadas se a ADF for transportada para outro local e até mesmo reciclada.

6- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros:

- Minimizar as adições da solução de silicato de sódio na preparação do molde;
- Controlar a temperatura de resfriamento do fluxo de metal líquido para analisar termicamente a ADF;
- Compreender os componentes refratários presentes na areia e os aditivos, verificando os processos e as reações ocorridas; e
- Ao considerar que no Brasil as principais jazidas exploradas são de bentonita cálcica, o estudo da ADF que utiliza esse tipo de bentonita para fundição associadas ao silicato de sódio é um trabalho interessante a se realizar, porque evitaria a realização do processo de ativação de bentonita cálcica.

REFERÊNCIAS

- 1 ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Classificação dos Resíduos Sólidos. ABNT, 2004

- 2 FAGUNDES,A.B.; VAZ,C.R.; de OLIVEIRA,I.L. A logística reversa aplicada às areias de fundição. **ABIFA-Fundição &Matérias-Primas**, São Paulo, ano 14, ed. 131, abr. 2011.

- 3 ABIFA- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **ADF- Soluções para areias descartadas com o trabalho da ABIFA.** Disponível em:<http://solucoesadf.com.br/img_paginas/ARTIGO_SITUACAO_ADF_REVISTA_JUNHO_2008.pdf>Acesso em: 02 de abril de 2012.

- 4 ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.984/2011:** Areia descartada de fundição – Central de processamento, armazenamento e destinação (CPAD). ABNT, 2011

- 5 FERREIRA, J.M.G de Carvalho. **Tecnologia da Fundição.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, ed. 3, 2010.

- 6 OKIDA, J. R. **Estudo para minimização e reaproveitamento de resíduos sólidos de fundição**, 2006. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2006.

- 7 ABIFA- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Índices de Mercado.** Disponível em:<<http://www.abifa.com.br>>. Acesso em: 19 de junho de 2012.

- 8 SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de fundição aglomeradas com argila.** Belo Horizonte: DFP/DAT, v.1, 1987.

- 9 SIDDIQUE, R.; KAUR, G.; RAJOR,A. Waste foundry sand and its leachate characteristics. **Resources, Conservation and Recycling**, Patiala, v.54, p.1027-1036, jan. 2010.

- 10 JI, S.; WAN, L.; FAN, Z. The toxic compounds and leaching characteristics of spent foundry sands. **Water, Air, and Soil Pollution**, Wuhan, n.132, 2000.

- 11 TAVAKOLI,R.; DAVAMI,P. Optimal riser design in sand casting process by topology optimization with SIMP method I: Poisson approximation of nonlinear heat transfer equation. **Struct Multidisc Optim**, v.36, p. 193-202, jan. 2008.

- 12 SUREKHA,B.; KAUSHIK,L.K.; PANDUY,A.K.; VUNDAVILLI,P.R.; PARAPPAGOUDAR,M.B. Multi-objective optimization of green sand mould system

using evolutionary algorithms. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**. Disponível em: <<http://www.springerlink.com.ez82.periodicos.capes.gov.br/content/1187122713g8125/fulltext.pdf>>. Acesso em junho de 2011.

13 TORRE, J. **Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão**. São Paulo: Hemus, 2004.

14 SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Iniciação à Fundição - Fundição**. Belo Horizonte: DFP/DAT, 1990.

15 REZENDE, M.M. **Bentonita**. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/Bentonita.pdf>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2012.

16 ALEXANDER, J. Bentonite. **Industrial and Engineering Chemistry**, v.16, n.11, p.1140-1142, nov.1924.

17 GREFFHORST, C.; PODOBED, O.; BÖHNKE, S. A reciclagem do material de moldagem aglomerado com bentonita. **Revista Fundição e Serviços**, São Paulo, n.160, abr. 2006.

18 ZIOLKOWSKI, E.; WRONA, R.; SMYKSY, K. Analysis and assessment of foundry moulding sand preparing process using the dynamic power measurement method. **Archives of Metallurgy and Materials**, v.55, ed.3, p. 953-961, 2010.

19 MARIOTTO, C.L. **Noções básicas e nomenclatura**. Disponível em <<http://xa.yimg.com/kq/groups/27930521/21133323/name/02+No%C3%A7%C3%B5es+b%C3%A1sicas+e+nomenclatura.pdf>>. Acesso em 17 de fevereiro de 2012.

20 ROMANUS, A. **Elaboração de Análises de Areia de Moldagem a Verde**. Disponível em <<http://www.foundrynews.com.br/anexos/482cb2fcc73a424f63e58e5519ba31ea..pdf>>. Acesso em 01 de julho de 2012.

21 LEE, W.E; RAINFORTH, W.M. **Ceramic Microstructures: Property control by processing**. London: Kluwer Academic Publishers. ed.5, 1994.

22 CHIANG, Y.; BIRNIE III, D.; KINGERY, W.D. **Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering**. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

23 PAUL, D. R.; ROBESON, L. M. Polymer nanotechnology: Nanocomposites. **Polymer**, Austin, v. 49, p. 3187-3204, 2008.

24 TEXEIRA-NETO, E.; TEXEIRA-NETO, A.A. Modificação química de argilas:

desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado. **Química Nova**, Santo André, v.32,p. 809-817, 2009.

25 SUN,Y.; MA,J.;LI,D. **Treatment of dye wastewater by bentonite adsorption and catalysis.** Disponível em:<<http://ieeexplore.ieee.org.ez82.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&ar number=5515594>> Acesso em 17 de dezembro de 2010.

26 LEITE, I. F.; RAPOSO, C.M.O.; SILVA, S.M. Caracterização estrutural de argilas bentoníticas nacional e importada: antes e após o processo de organofilização para utilização como nanocargas. **Cerâmica**, Campina Grande, n.54, p.303-308, 2008.

27 SILVA, A. R. V.; FERREIRA, H. C. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v.32, p. 26-35, 2008.

28 ARAÚJO, J.S.B.; FARIAS, P.S.C.; SÁ, A.J. Mineração e industrialização da bentonita e as transformações/permanências no espaço agrário de Boa Vista-PB: um estudo de caso dos sítios bravo e urubu. **Revista de Geografia**, Recife: UFPE – DCG/NAPA, v.25, n.3, set./dez. 2008.

29 CEMP- COMISSÕES DE ESTUDOS DE MATÉRIAS-PRIMAS. **CEMP- 63:** Bentonita para fundição-Determinação da adsorção de azul de metileno pelo método de pirofosfato de sódio. ABIFA, 2003.

30 GIELISSEN,Harrie. Recuperação da areia verde reduz custos das fundições. **Revista Fundições e Serviços**, São Paulo, n.124, abr. 2003.

31 SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de fundição aglomeradas com argila.** Belo Horizonte: DFP/DAT, v.3, 1987.

32 MARIOTTO, C.L. **Aditivos.** Disponível em <<http://xa.yimg.com/kq/groups/27930521/51296176/name/07+Aditivos.pdf>>. Acesso em 30 de abril de 2012.

33 WANG,Y.; HUANG,H.; CANNON,F.S.; VOIGT,R.C.; KOMARNENI,S.; FURNESS, J.C. Evaluation of Volatile Hydrocarbon Emission Characteristics of Carbonaceous Additives in Green Sand Foundries. **Environmental Science & Technology**, v.41, p.2957-2963, mar. 2007.

34 SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Areias de fundição aglomeradas com argila.** Belo Horizonte: DFP/DAT, v.2, 1987.

35 ROSSITTI,S.M. **Processos e variáveis de fundição.** Disponível em: <<http://www.grupometal.com.br/imagens/downloads/grupometal03.pdf>>. Acesso em

30 de junho de 2011.

36 SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Determinação dos sistemas de massalotes e canais**. Belo Horizonte: DFP/DAT, v.3, 1987.

37 SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Fundição: Acabamento e rebarbagem de peças fundidas**. Belo Horizonte: DFP/DAT, 2 ed.,v.3, 1987.

38 OWUSU, Y.A. Physical-chemical study of sodium silicate as a foundry sand binder. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 18, p. 57-91, 1982.

39 MCDONALD, M.; THOMPSON, J. L. **Sodium silicate a binder for the 21st Century**. Disponível em: <<http://www.pqcorp.com/LinkClick.aspx?fileticket=4eHQ-IPkZeo%3D&tabid=179&mid=907>>. Acesso em: 27 de janeiro de 2012.

40 PINO RIVERO,L.; HERNÁNDEZ-RUIZ,J.; VALENCIA-MORALES, E.; VILLAR-COCIÑA; E. Y LÓPEZ VELÁSQUEZ; A. Desarrollo de una nueva mezcla autofraguante para machos de fundición. **Boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio**, v.48, n.2, p. 81-90, mar. 2009.

41 SIDDIQUE, R.; AGGARWAL, Y.; AGGARWAL, P.; KADRI, E.; BENNACER, R. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS). **Construction and Building Materials**, Patiala, v.25, p.1916-1025, 2011.

42 ŞAHMARAN, M; LACHEMI,M.; ERDEM,T.K.; YU,H.E. Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete. **Materials and Structures**, v.44, p.1193-1204, 2011.

43 ABIFA- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Areias descartadas de fundição (ADF)**. Disponível em:<<http://www.solucoesadf.com.br>>. Acesso em: 28 de maio de 2012.

44 SANTURDE, R. A.; ANDRÉS, A.; VIGURI, J. R.; RAIMONDO, M.; GUARINI, G.; ZANELLI, C.; DONDI, M. Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. **Journal of Environmental Management**, Santander, v. 92, p. 994-1002, 2011.

45 FURLANI, E.; TONELLO, G.; MASCHIO, A. S. Preparation and characterization of sintered ceramics made. **Ceramics International**, Udin, v. 38, p. 2619-2625, 2012.

46 ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. ABNT, 2004.

47 TOLEDO, E. B. S. **Método de utilização de areia de fundição e resíduos de poeira de jateamento (micro esferas de vidro) para produzir cerâmica vermelha.** Dissertação de Mestrado.UFPR, 2006. Disponível em < <http://www.pipe.ufpr.br/porta/defesas/dissertacao/115.pdf>> Data de acesso 01 de fevereiro de 2012.

48 TOLEDO, E.B.S.; MYMRINE, V.; PONTE, H.A. **Método de utilização de areia de fundição e resíduos de poeira de jateamento (micro esferas de vidro) para produzir cerâmica vermelha.** PI0500508-6, 17 FEV. 2005 (31 mai. 2005, 26 set. 2006; 29 set. 2009, 15 dez. 2009, 25 mai. 2010). INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial: Disponível em < <http://www.inpi.gov.br/>>. Data de acesso 01 de fevereiro de 2012.

49 DUNGAN, R.S.; KUKIERB, U.; LEEC, B. Blending foundry sands with soil: Effect on dehydrogenase activity. **Science of the Total Environment**, Beltsville, v. 357, p.221-230, 2006.

50 DUNGAN, R. S.; DEES, N. H. The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands. **Journal of Environmental Management**, Beltsville, v. 90, p. 539-548, 2009.

51 CEMP- COMISSÕES DE ESTUDOS DE MATÉRIAS-PRIMAS. **CEMP- 151:** Materiais de fundição-Dispositivos para amostragem. ABIFA, 2003.

52 WANG, Y.; CANNON, F. KOMARNENI, S.; VOIGT, R. Mechanisms of advanced oxidation processing on bentonite consumption reduction in foundry. **Environ. Sci. Technol**, Pennsylvania, v 39, p.7712-7718, 2005.

53 CEMP- COMISSÕES DE ESTUDOS DE MATÉRIAS-PRIMAS. **CEMP- 105:** Materiais para fundição-Determinação do teor de umidade. ABIFA, 2003.

54 CEMP- COMISSÕES DE ESTUDOS DE MATÉRIAS-PRIMAS. **CEMP- 65:** Bentonita para fundição-Determinação da compactabilidade da mistura padrão. ABIFA, 2003.

55 CEMP- COMISSÕES DE ESTUDOS DE MATÉRIAS-PRIMAS. **CEMP- 60:** Bentonita para fundição-Determinação da resistência à compressão a verde da mistura padrão. ABIFA, 2003.

56 CEMP- COMISSÕES DE ESTUDOS DE MATÉRIAS-PRIMAS. **CEMP- 81:** Materiais granulares usados em fundição-Determinação da distribuição granulométrica e módulo de finura. ABIFA, 2003.

57 CEMP- COMISSÕES DE ESTUDOS DE MATÉRIAS-PRIMAS. **CEMP- 197:** Areias para fundição- Determinação do teor de argila ativa pelo método da curva de

regressão e da adsorção. ABIFA, 2003.

58 CAMPOS, R. **Análise comparativa das propriedades entre os carvões Cardiff e PCA em areias a verde de fundição.** 2011, 51p. Trabalho de Conclusão de Curso-Graduação em Tecnologia em Processos de Fabricação Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Coordenação do curso de Tecnologia em Processos de Fabricação Mecânica, Ponta Grossa.

59 PRADO, A. G. S.; FARIA, E. A.; PADILHA, P.M. Aplicação e modificação química da sílica gel obtida de areia. **Química Nova**, v. 28, n. 3, p-544-547, 2005.

60 CARTER,P.T.;IBRAHIM,M.**Journal Soc. Glass.Tecnol**, v.36, n.170, p.142-163, 1952. Disponível em: **Phase Equilibria Diagram Database**. versão 3.1.0, nov. 2011. 1,91Kb.Plataforma Windows.

61 SANDS, M; SHIVKUMAR,S. Influence of coating thickness and sand fineness on mold filling in the lost foam casting process. **Journal of Materials Science**,38, p.667– 673, 2003.

62 HAN, J.; HANSEN,S.F.Study on the solidification condition of exudation penetration occurrence in grey cast iron castings based on solidification simulation. **Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.**, 8, p.775–780, 2000.

63 NARO,R.L. Porosity defects in iron castings from mold-metal interface e reactions. **AFS Transactions**, 206, p. 839-851, 1999.

64 CHAKHERLOU, T.N; MAHDINIA,Y.V.; AKBARI, A. Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process. **Materials and Design**, 32, p. 162–169, 2011.

65 ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. ABNT, 2004.