



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia da UFMG



**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,
MATERIAIS E DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE PÓ FLUXANTE E SUA
CORRELAÇÃO COM OS PARÂMETROS DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO
DE PLACAS**

Autor: Rodrigo Seara Martins
Orientador: Roberto Parreiras Tavares

Agosto/2019

AVALIAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE PÓ FLUXANTE E SUA
CORRELAÇÃO COM OS PARÂMETROS DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE
PLACAS

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2019

M386a Martins, Rodrigo Seara.
Avaliação do consumo específico de pó fluxante e sua correlação com os parâmetros do lingotamento contínuo de placas [recurso eletrônico] / Rodrigo Seara Martins. – 2019.
1 recurso online (xii, 124 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Roberto Parreiras Tavares.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 111-115.

Bibliografia: f. 116-124.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia extrativa - Teses.
3. Fundação continua - Teses. I. Tavares, Roberto Parreiras. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 669(043)

Dedico primeiramente a Deus por me conceder saúde para realizar mais uma etapa, aos meus Pais, à esposa Aderlane e aos meus filhos Ana Júlia e João Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde para que realizasse mais uma etapa da minha vida;

Aos meus Pais, por serem grandes incentivadores nas horas mais difíceis no decorrer desta caminhada;

À minha esposa Aderlane, aos meus filhos Ana Júlia e João Gabriel por entenderem os momentos em que estive ausente, por estar dedicando aos estudos noturnos diariamente e nos finais de semanas;

Ao professor Roberto Parreiras Tavares pelas orientações e sugestões prestadas ao longo desse trabalho;

Ao Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento Leonardo José Silva de Oliveira pelo apoio ao supervisionar este trabalho, sem medir esforços;

Ao Engenheiro Marcelo Moreira Furst Gonçalves pela construção do sistema de medição desenvolvido, aos Engenheiros Rodrigo Madrona Dias e Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça, pelas discussões técnicas e trocas de ideias durante o fechamento da dissertação;

Aos gestores Fabrício Michel Fogaça, Gerência Geral de Aciaria, e ao Flávio Viana Diniz Soares, Gerência Técnica de Aciaria, por favorecerem o desenvolvimento técnico-científico de sua equipe;

À USIMINAS, por me dar a oportunidade técnica e financeira de realizar este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 ESPECÍFICOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 PÓS FLUXANTES.....	6
3.2 PROPRIEDADES DOS PÓS FLUXANTES.....	11
3.2.1 <i>Comportamento de fusão dos pós fluxantes</i>	11
3.2.1.1 Faixa de fusão.....	11
3.2.1.2 Taxa de fusão.....	15
3.2.3 <i>Viscosidade</i>	20
3.2.4 <i>Solidificação/Cristalização</i>	29
3.2.5 <i>Absorção de inclusões</i>	35
3.3 PARÂMETROS DE PROCESSO QUE AFETAM O DESEMPENHO DOS PÓS FLUXANTES.....	36
3.3.1 <i>Renovação do menisco</i>	37
3.3.2 <i>Interação química do aço com o pó fluxante</i>	41
3.4 CONSUMO DE PÓ FLUXANTE.....	44
3.4.1 <i>Definições gerais e efeitos de parâmetros de processo</i>	46
3.4.2 <i>Regras empíricas para calcular o consumo de pó</i>	52
3.4.3 <i>Métodos para medição do consumo específico</i>	52
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICA DOS PÓS FLUXANTES.....	58
4.1.1 <i>Análise química</i>	59
4.1.2 <i>Análise térmica diferencial (ATD)</i>	59
4.1.3 <i>Difração de Raios X</i>	60
4.1.4 <i>Determinação da Viscosidade</i>	60
4.2 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO CONSUMO.....	62
4.3 EXPERIMENTOS INDUSTRIAIS.....	63
4.4 ANÁLISE DE DADOS.....	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
5.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS PÓS FLUXANTES.....	65
5.1.1 <i>Análise Química</i>	65
5.1.2 <i>Análise Térmica Diferencial (ATD)</i>	67
5.1.3 <i>Análise Granulométrica</i>	71
5.1.4 <i>Estimativa da Viscosidade</i>	72
5.2 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO CONSUMO.....	74
5.2.1 <i>Desenvolvimento do sistema de medição de consumo</i>	75
5.2.2 <i>Avaliação do sistema de medição em bancada</i>	80
5.3 TIPOS DE ADIÇÕES DE PÓ FLUXANTE.....	82
5.4 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO NA ÁREA.....	84
5.5 TESTES FEITOS PARA HOMOLOGAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO.....	85

5.6 EXPERIMENTOS INDUSTRIAIS	88
5.6.1 <i>Propriedades dos pós fluxantes que influenciaram no consumo específico</i>	102
5.7 RESULTADO DE QUALIDADE	108
6 CONCLUSÕES	109
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
8 ANEXOS	111
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo de placas com dois veios (Barbosa, 2002).....	4
Figura 3.2 – Ilustração do molde de lingotamento (Sridhar <i>et al.</i> , 2002).	7
Figura 3.3 – Desenho esquemático de inclusão no molde (Swartz <i>et al.</i> , 2014).	10
Figura 3.4 – Fases formadas no aquecimento e resfriamento de um pó fluxante entre as temperaturas de 500 e 1300°C (Kromhout, 2011).....	12
Figura 3.5 – Desenhos esquemáticos sendo: a) aparato para a realização de teste de análise térmica diferencial (ATD) e b) curva de ATD mostrando reações características (Oliveira <i>et al.</i> , 2007).....	13
Figura 3.6 – Desenho esquemático de um microscópio de aquecimento (Brinck, Valadares, Paco, 1980).	14
Figura 3.7 – Exemplo de resultados de uma análise de fusão em microscópio de aquecimento (Oliveira <i>et al.</i> , 2007).	15
Figura 3.8 – Desenho esquemático da fusão do pó fluxante em função da queima do carbono (Supradist, Cramb e Schwerdtfeger, 2004).	17
Figura 3.9 – Taxa de fusão em função do teor de carbono (a) e do tamanho da partícula (b) (Kawamoto <i>et al.</i> , 1994).	18
Figura 3.10 – Efeito da densidade na taxa de fusão de (Kawamoto <i>et al.</i> , 1994).....	19
Figura 3.11 – Representação da matriz tridimensional dos silicatos (Mills, 2000).	21
Figura 3.12 – Representação da matriz tridimensional dos silicatos mais flexíveis (Mills, 2000).	21
Figura 3.13 – Curva de viscosidade típica para pós fluxantes (Sturgill, 1999).	22
Figura 3.14 – Efeito da Al_2O_3 na viscosidade do pó fluxante (Oliveira <i>et al.</i> 2010).	25
Figura 3.15 – Efeito do TiO_2 na viscosidade de pós fluxantes (Wang <i>et al.</i> , 2016).	26
Figura 3.16 – Ensaio de navícula com o efeito do teor de TiO_2 na viscosidade (Attar <i>et al.</i> 2011).	27
Figura 3.17 – Influência de compostos na viscosidade do pó fluxante (Fox <i>et al.</i> , 2003).	27
Figura 3.18 – Desenho esquemático do efeito do nitrogênio na formação de escória de fluxante não newtoniano (Mills, 2016).	28
Figura 3.19 – Representação esquemática da interface placa/molde (Oliveira <i>et al.</i> , 2010).....	29
Figura 3.20 – Dados reais para viscosidade de pós fluxantes que apresentam transição vítrea (Sridhar, 2003).	30
Figura 3.21 – (a) Curvas CCT experimentais para escórias de pós fluxantes e (b) Curvas TTT experimentais para escórias de pós fluxantes (Zhou <i>et al.</i> , 2015).	31
Figura 3.22 – Desenho esquemático do aparato para determinação da cristalização de pós fluxantes e imagens da variação fração de cristais de pó fluxante ao longo de um experimento, onde X representa a fração de cristal (Zhou, 2015).	32
Figura 3.23 – Relação da basicidade com a temperatura de cristalização de pós fluxantes (Nakato, <i>et al.</i> , 1987 e Mills, 2003).	34
Figura 3.24 – a) Variação do fluxo de calor com a cristalinidade do filme de pó fluxante solidificado, b) Cristalinidade do filme com a temperatura de cristalização e c) Cristalinidade do filme com a basicidade binária (Oliveira <i>et al.</i> , 2011).....	35
Figura 3.25 – Desenho esquemático do perfil de “duplo rolo” ou “asa de borboleta” (Hibbeler e Thomas, 2013).	38
Figura 3.26 – Fotos dos defeitos em placa: a) Inclusão de pó (IP) e b) bolhas (BH), (Usiminas, 2018). ..	39
Figura 3.27 – Efeito do ângulo de saída da válvula submersa sobre as flutuações do nível de aço no molde (Zhang <i>et al.</i> , 2007).	40
Figura 3.28 – Foto do defeito trinca de borda (TQ) correlacionado com a marca de oscilação profunda (Reis <i>et al.</i> , 2017).	42
Figura 3.29 – Influência do teor de alumínio com o índice de alarmes do tipo agarramento (Oliveira <i>et al.</i> , 2011).	43
Figura 3.30 – Balanço de massa da infiltração do pó fluxante no molde (Elaborada pelo autor).....	45
Figura 3.31 – Influência da <i>Break temperature</i> (T_{br}) no consumo de pó fluxante (Wolf, 1994).	48
Figura 3.32 – Consumo de pó fluxante em função da velocidade de lingotamento (Normanton <i>et al.</i> , 2004).	48
Figura 3.33 – Influência do comprimento do curso de oscilação e tempo de estripamento positivo sobre o consumo de pó fluxante (Shin <i>et al.</i> (2006)).	50

Figura 3.34 – Influência da oscilação não-sinoidal do molde sobre o consumo de pó fluxante (Suzuki <i>et al.</i> (1991)).	51
Figura 3.35 – Relação entre características do pó fluxante (insumo), parâmetros do processo e comportamento esperado no molde.	56
Figura 4.1 – Síntese das etapas para as atividades desenvolvidas.	58
Figura 4.2 – Ensaio de navícula inclinada. a) Navículas com o ângulo de inclinação de 15°, b) Navículas com ¼ de seu volume preenchidas com pó fluxante e c) Navículas após o aquecimento a 1300 °C e teste de escoamento inclinado.	61
Figura 4.3 – Protótipo do sistema para o monitoramento do consumo de pó fluxante.	62
Figura 5.1 – Resultados da análise térmica diferencial do pó A-1.	67
Figura 5.2 – Resultados da análise térmica diferencial do pó B-1.	68
Figura 5.3 – Resultados da análise térmica diferencial do pó C-1.	68
Figura 5.4 – Resultados da análise térmica diferencial do pó D-1.	69
Figura 5.5 – Distribuição granulométrica das amostras de pó fluxante estudadas.	71
Figura 5.6 – Massa específica dos pós fluxantes <i>in natura</i> .	72
Figura 5.7 – Resultados dos ensaios de navículas inclinadas para os pós fluxantes.	73
Figura 5.8 – Comparação dos resultados de escoamento de navícula e viscosidades especificada do IRSID.	74
Figura 5.9 – Extensômetro biaxial.	75
Figura 5.10 – Extensômetro biaxial instalado no pé da estrutura de apoio do pó fluxante.	76
Figura 5.11 – (a) Módulo condicionador de sinal NI 9236 e (b) esquema elétrico.	76
Figura 5.12 – Módulo cDAQ-9191 de transmissão de dados via rede Ethernet ou wireless.	77
Figura 5.13 – Sistema de medição instalado na face inferior da estrutura de apoio do <i>bigbag</i> com a localização dos extensômetros e do módulo de aquisição dos dados.	78
Figura 5.14 – Tela do <i>software</i> desenvolvido para aquisição dos dados.	78
Figura 5.15 – Rotina principal do <i>software</i> desenvolvido para apresentação, processamento e armazenamento dos dados.	80
Figura 5.16 – <i>Bigbag</i> de pó fluxante posicionado sobre a estrutura para acondicionar o pó fluxante.	81
Figura 5.17 – a) Balança com os pacotes de 10 kg de pó fluxante do tipo a granel e (b) peso registrado para os 10 pacotes de pó fluxante.	82
Figura 5.18 – a) Máquina de adição automática de pó fluxante e b) garfos de adição do pó fluxante.	83
Figura 5.19 – a) Balde contendo o pó fluxante e b) rodo de adição de pó fluxante.	83
Figura 5.20 – Balança com o pó fluxante e os garfos de adição do pó fluxante.	84
Figura 5.21 – Curva de calibração do sistema, correlacionando o sinal dos extensômetros (mV) com massa de pó fluxante (kg).	85
Figura 5.22 – Medição do consumo de pó fluxante durante processo de lingotamento contínuo na Aciaria n°2.	86
Figura 5.23 – Gráfico de consumo de pó fluxante durante lingotamento contínuo do aço UBC.	86
Figura 5.24 – Gráfico de consumo de pó fluxante durante o lingotamento contínuo do aço BC com o sistema desenvolvido.	87
Figura 5.25 – Curvas de consumo específico instantâneo dos pós fluxantes (UBC e BC) com o aço lingotado em vários sequenciais.	90
Figura 5.26 – Curvas de ajuste linear passando pela origem do eixo.	91
Figura 5.27 – Consumo específico médio em relação à velocidade média de lingotamento.	93
Figura 5.28 – Variação de velocidade de lingotamento nos testes realizados.	94
Figura 5.29 – Consumo de pó fluxante em função da velocidade de lingotamento (Normanton <i>et al.</i> , 2004).	95
Figura 5.30 – Consumo específico médio em relação à largura média do molde para os testes realizados.	96
Figura 5.31 – Número de alarmes de agarramento em relação à largura de placa.	97
Figura 5.32 – Tipo de fluxo de aço em relação à largura de placa e velocidade de lingotamento (Pierre, 2012).	98
Figura 5.33 – Fluxo de escoamento de aço do tipo <i>Double Roll</i> e <i>Single Roll</i> em relação à velocidade do menisco (Thomas, 2003).	98
Figura 5.34 – Consumo específico de pó fluxante em relação ao superaquecimento do aço (Normanton <i>et al.</i> , 2004).	99
Figura 5.35 – Consumo específico em relação à temperatura de solidificação média do aço.	100
Figura 5.36 – Variações de temperaturas dos testes realizados.	101

Figura 5.37 – Quantidade de alarmes em relação à temperatura do aço.	102
Figura 5.38 – Consumo específico de pó fluxante em relação à viscosidade do pó fluxante.	103
Figura 5.39 – Consumo específico do pó fluxante em relação à temperatura de cristalização do pó fluxante.	104
Figura 5.40 – Consumo específico do pó fluxante em relação ao carbono livre do pó.	106
Figura 5.41 – Espessura da camada de escória líquida em relação ao teor de carbono livre do pó.	106
Figura 5.42 – Espessura da camada de escória líquida em relação ao consumo específico.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Composição química típica dos pós fluxantes para lingotamento contínuo (Moore <i>et al.</i> , 1991).....	6
Tabela III.2 – Modelos empíricos para o cálculo da viscosidade de pós fluxantes em função da composição química e da temperatura (Oliveira, 2007).	23
Tabela III.3 – Influência da basicidade na temperatura de cristalização (Nakato, <i>et al.</i> , 1987).....	34
Tabela III.4 – Propriedades típicas de pós fluxantes para alguns tipos de aços (Valadares e Bezerra, 2006).	44
Tabela V.1 – Identificação das amostras de pós fluxantes analisadas.	65
Tabela V.2 – Resultados de composição química para os pós fluxantes amostrados em % de massa.....	65
Tabela V.3 – Fases minerais identificadas nas amostras de pó fluxante <i>in natura</i> por difração de raios X (S = fase presente).....	66
Tabela V.4 – Resultado do cálculo de viscosidade e especificações.	73
Tabela V.5 – Resumo dos 14 testes realizados com variáveis de processo.....	89
Tabela V.6 – Consumo específico para os testes realizados.	92
Tabela V.7 – Temperatura de cristalização analisada dos pós fluxantes testados.	104
Tabela V.8 – Carbono analisado dos pós fluxantes testados.....	105
Tabela V.9 – Resumo dos testes realizados.	107

RESUMO

Os pós fluxantes estão continuamente em desenvolvimento para permitir que o processo de lingotamento contínuo possa gerar produtos de melhor qualidade superficial. Entretanto, a seleção e a avaliação do desempenho industrial desse insumo não são simples por envolver o conhecimento simultâneo de várias propriedades do insumo. Nesse sentido, desde que medido de forma adequada, o consumo do pó fluxante no molde pode ser uma ferramenta útil para avaliar a estabilidade operacional e o desempenho industrial deste insumo. Existem várias técnicas e modos de se avaliar o consumo de pó fluxante no processo de lingotamento contínuo descritos na literatura. Entretanto, a correlação do consumo com parâmetros do processo depende da particularidade de cada insumo e das características do processo. Assim, a principal motivação para o presente projeto foi estabelecer e desenvolver um método acurado para avaliar o desempenho dos pós fluxantes no molde de lingotamento contínuo, através de medições feitas com o pó fluxante utilizado em área e de análises das amostras de pó *in natura*. As análises levaram em consideração o consumo específico e parâmetros do processo, buscando relações de causa e efeito com eventos que possam levar a desvios de qualidade superficial do produto lingotado. Através dos testes de medições de consumo realizados com o sistema desenvolvido e homologado foi possível verificar que na Usiminas a variável de processo que teve correlação no consumo específico de pó fluxante foi a largura de placa.

ABSTRACT

Mold powders are in continuous development to allow the continuous casting process to manufacture products with high surface quality. However, the selection and evaluation of the industrial performance of this raw material is not easy because it involves the simultaneous knowledge of its several properties. In this sense, since properly measured, the mold powder consumption in the mold can be a useful tool to evaluate the operational stability and the industrial performance of this raw material. There are several techniques and ways of evaluating the consumption of mold powder in the continuous casting process described in the literature. However, the correlation of consumption with process parameters depends on the particularity of each raw material and the characteristics of the process. Thus, the main motivation for the present project was to establish an accurate method to evaluate the performance of the mold powders in the mold of continuous casting, through measurements made with the mold flux used in the area and analyzes of the samples of powder *in natura*, liquid powder slag and powder slag film at the end of casting that will be collected during the accompanying series. The analyzes took into account the specific consumption and process parameters, seeking cause and effect relationships with events that may lead to deviations of the surface quality of the slab. The measurements of mold flux consumption performed with the new system designed in the present work indicated that at Usiminas the process variable that had correlation with the mold powder consumption was the slab width.

1 INTRODUÇÃO

Os pós fluxantes são insumos, fabricados a partir de uma mistura de óxidos com a adição de carbono, usados no processo de lingotamento contínuo do aço para promover a lubrificação da interface formada entre o molde e a placa em solidificação. Além disso, os pós fluxantes devem controlar a transferência de calor, proteger a superfície livre do aço líquido no molde contra a reoxidação e a perda de temperatura, promovendo o isolamento térmico da superfície livre do aço líquido, e absorver as inclusões remanescentes que flutuam no molde.

A escolha do tipo de pó depende da qualidade de aço a ser lingotado, das disponibilidades e condições operacionais de cada usina, de modo que a composição química varie de acordo com as propriedades almeçadas. Carbono também é adicionado ao pó fluxante, essencialmente, para o controle de sua taxa de fusão e, adicionalmente, devido a sua reação com o oxigênio, tende a prevenir a reoxidação do aço na região do menisco.

O pó fluxante é um insumo de muita importância para a qualidade final do produto e suas características físico-químicas devem ser conhecidas e ajustadas para um melhor desempenho no processo de lingotamento contínuo. Uma dessas propriedades é a taxa de fusão do pó fluxante. Essa taxa está diretamente ligada à formação da piscina de escória que, em quantidade suficiente, deve suprir o consumo entre placa de aço e o molde. Se a velocidade de fusão for muito alta, a espessura de escória torna-se muito elevada diminuindo excessivamente a camada isolante do pó que a recobre, podendo promover um resfriamento da superfície do aço. Ocorrendo o contrário, baixa velocidade de fusão, diminui-se a quantidade de escória líquida disponível no menisco fazendo com que a lubrificação placa/molde fique comprometida.

Outra propriedade muito importante é a viscosidade. Ao lado das características de fusibilidade, a viscosidade assegura a adequada lubrificação da interface placa/molde contribuindo para uma boa qualidade superficial das placas produzidas. Esse parâmetro

tem sido usualmente eleito para a otimização da lubrificação e infiltração de escória, bem como para evitar altas taxas de erosão na válvula submersa.

Tanto a taxa de fusão quanto a viscosidade são propriedades medidas em laboratório por diferentes métodos. Entretanto, a correlação dessas propriedades com o desempenho industrial do pó fluxante no molde não é trivial, pois, além das características do insumo, parâmetros do processo devem ser considerados, tais como: características da oscilação do molde e velocidade de lingotamento.

Neste contexto, o presente trabalho visa desenvolver um método para quantificar o consumo de pó fluxante no molde, através de medições realizadas em área com o pó fluxante utilizado em relação ao aço produzido no veio durante o acompanhamento. Além disso, foram recolhidas amostras de pó *in natura* e foram feitas análise química, análise térmica diferencial (ATD), difração de raios X e análise de viscosidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método para quantificar o consumo específico de pós fluxantes visando estabelecer correlações para seleção e avaliação do desempenho desse insumo no processo de lingotamento contínuo de placas e nos desvios devido à qualidade superficial das placas produzidas na Usiminas.

2.2 Específicos

- ✓ Identificar na literatura técnicas diferentes para avaliação do consumo específico de pós fluxantes, visando escolher a que melhor atenda às necessidades do processo industrial da Usiminas;
- ✓ Desenvolver, de forma piloto, condições para que o consumo específico possa ser medido de forma automática na Usiminas;
- ✓ Verificar a sensibilidade do consumo de pós fluxantes à variação de parâmetros de processo, buscando relações de causa e efeito com eventos que possam levar a desvios de qualidade superficial.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na aciaria ocorrem as etapas de transformação do ferro-gusa em aço líquido e posteriormente em aço sólido. As etapas são: refino primário e secundário, onde são realizados os ajustes do aço líquido, conforme especificação química requerida pelo cliente, e a solidificação do aço no lingotamento contínuo, cuja prática requer enorme controle operacional com intuito de garantir qualidade superficial dos produtos semiacabados. No caso da aciaria da Usiminas, os produtos semiacabados são placas com seção de 252 mm de espessura e entre 1200 a 2000 mm de largura.

O lingotamento contínuo de aços é realizado utilizando três reatores metalúrgicos: a panela, o distribuidor e o molde. Na figura 3.1 é apresentado um desenho esquemático do conjunto de reatores e equipamentos utilizados no lingotamento contínuo.

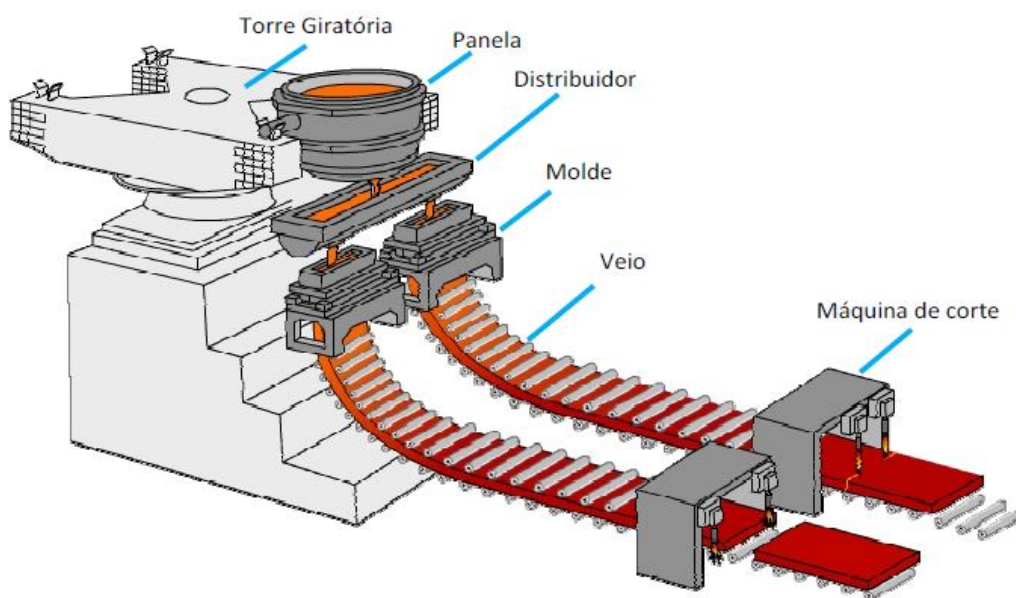


Figura 3.1 – Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo de placas com dois veios (Barbosa, 2002).

O processo de lingotamento contínuo é considerado como um dos principais desenvolvimentos tecnológicos para a obtenção de produtos siderúrgicos, substituindo os métodos convencionais de lingotamento, em virtude da alta produtividade, excepcional rendimento, excelentes qualidades superficial e interna do produto e da

enorme capacidade e versatilidade para produzir uma gama imensa de categorias de aço (Barbosa, 2002).

Parte do sucesso do processo de lingotamento contínuo se deve ao uso de pós fluxantes. Os pós fluxantes foram introduzidos no processo de lingotamento no início da década de 1960, para substituir os óleos vegetais desidratados, como os de colza, palma, amendoim, soja e algodão, usados na lubrificação do molde, diminuindo o atrito entre a pele de aço solidificada e o molde de cobre (Mills, 2000).

Os primeiros pós fluxantes eram baseados em cinzas (“*fly ash*”), um subproduto proveniente da queima da hulha nas usinas termelétricas. Esse tipo de pó se mostrou bastante eficiente, pois diminuiu a perda de calor e, conseqüentemente, pôde-se operar com menores níveis de superaquecimento. Embora as características dessas cinzas fossem satisfatórias para justificar seu emprego como isolantes térmicos do menisco, observou-se que não havia repetitividade nos benefícios conseguidos em diferentes placas. Enquanto algumas remessas de pós mantinham a sua refratariedade, outras se fundiam com maior facilidade. Pesquisas posteriores mostraram que esta variação de comportamento estava relacionada com a composição química. As tentativas iniciais para se ajustar o ponto de fusão das cinzas foram bem-sucedidas por meio da adição de fundentes, tais como: NaF, Na_3AlF_6 e NaCO_3 (Valadares e Bezerra, 2006).

Com o passar dos anos, ocorreu uma grande evolução na tecnologia de lingotamento (novas práticas e novos aços), o que acarretou o aumento da necessidade de inovações nos insumos usados no processo. Assim, o uso de pós fluxantes, cada vez mais complexos, tem-se tornado imprescindível na tecnologia do lingotamento contínuo do aço líquido, influenciando na produção de placas isentas de defeitos superficiais e viabilizando o aumento da produtividade do processo (Oliveira *et al.*, 2007).

Assim, nesta revisão bibliográfica serão discutidos os aspectos gerais relacionados aos pós fluxantes, as propriedades principais requeridas para este insumo e as características de processo que permitem o seu perfeito desempenho. Além disso, serão discutidos os efeitos das propriedades do pó fluxante e dos parâmetros de processo no consumo de pós fluxantes e as diferentes técnicas para a medição deste consumo.

3.1 Pós Fluxantes

O pó fluxante consiste de uma mistura de minerais e óxidos (naturais ou sintéticos) com adição de carbono. Cada constituinte desse insumo está associado a uma propriedade específica para uma dada condição de processo. A faixa de composição química típica dos pós fluxantes usados em lingotamento contínuo é mostrada na tabela III.1 (Moore *et al.*, 1991).

Tabela III.1 – Composição química típica dos pós fluxantes para lingotamento contínuo (Moore *et al.*, 1991).

Elemento	Faixa de composição química (%)
CaO	25 – 45
SiO ₂	20 – 50
Al ₂ O ₃	0 – 10
TiO ₂	0 – 5
C	1 – 25
Na ₂ O	1 – 20
K ₂ O	0 – 5
FeO	0 – 6
MgO	0 – 10
MnO	0 – 10
BaO	0 – 10
Li ₂ O	0 – 4
B ₂ O ₃	0 – 10
K ₂ O	4 - 10

O pó fluxante é adicionado na superfície do aço no interior do molde e, em contato com o aço líquido, deve fundir e infiltrar na interface placa/molde durante todo o processo de lingotamento. Na figura 3.2 é apresentado um desenho esquemático do molde de lingotamento de placas, detalhando as diferentes camadas do pó fluxante durante o seu uso no processo.

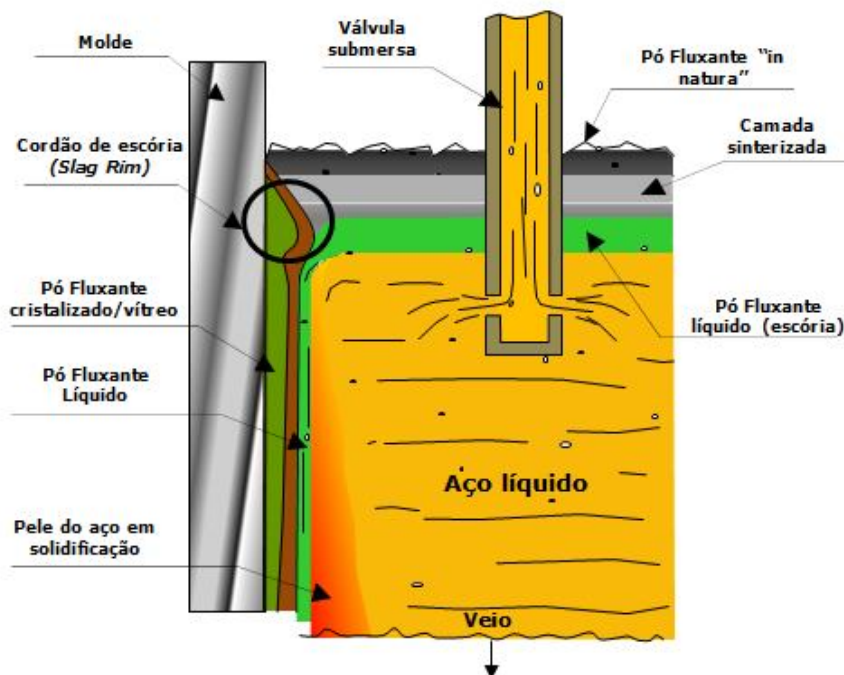


Figura 3.2 – Ilustração do molde de lingotamento (Sridhar *et al.*, 2002).

Conforme visto na figura 3.2, o pó fluxante se estratifica em quatro camadas na região da superfície livre do molde, sendo: i) camada de pó fluxante “*in natura*”; ii) camada sinterizada; iii) camada líquida de pó fluxante e iv) borda de pó fluxante sinterizado (“*slag rim*” ou cordão de escória).

Ainda conforme a figura 3.2, após a formação da escória líquida de pó fluxante, devido ao movimento de extração da placa e à oscilação do molde, ela tende a infiltrar na interface placa/molde, formando uma região de pó fluxante líquido, em contato direto com a pele em solidificação, e um filme sólido, que pode ser vítreo ou cristalino, próximo à superfície do molde de cobre.

A complexa estratificação em camadas do pó fluxante está diretamente ligada ao comportamento desse insumo no molde e às principais funções esperadas ao longo do processo de lingotamento contínuo, sendo elas: a) isolamento térmico da superfície do aço líquido na região do menisco; b) proteção química da superfície do aço líquido (prevenindo sua reoxidação), c) lubrificação na interface entre placa de aço em

solidificação e o molde, d) controle da taxa de transferência de calor entre a placa de aço em solidificação e o molde e e) absorção de inclusões não metálicas do aço.

A camada de pó “*in natura*” na superfície do molde está em contato direto com o ar atmosférico e, por sua vez, é responsável pelo isolamento térmico da região do menisco. A camada sinterizada irá se formar na medida em que o carbono, contido no pó fluxante “*in natura*” reage com o oxigênio da atmosfera. Com o aquecimento progressivo da camada de pó fluxante e a queima do carbono, são formadas as camadas pastosa e líquida, que efetivamente está em contato direto com o aço líquido no molde.

O isolamento da parte superior do molde tem como intuito evitar a solidificação parcial do aço que fica exposto na região do menisco. Tal característica leva a um menisco com temperatura adequada (mais aquecido e mais homogêneo), permitindo um lingotamento com temperaturas mais próximas da linha *liquidus* (Emi, 1991). Além disso, o isolamento perfeito irá contribuir também para uma marca de oscilação menos profunda (mais suave) e, em consequência, irá reduzir a geração de defeitos superficiais em placas conhecidos como bolhas de ar (“*Pinholes*”).

A borda de pó fluxante sinterizado (“*slag rim*”) fica entre a região em contato com a parede do molde. Ela mantém contato com todas as camadas, desde o pó fluxante “*in natura*” até o pó fluxante líquido. A formação do “*slag rim*” não é desejável, quanto maior esta camada maior o risco de interrupção do fluxo de pó fluxante líquido para a interface placa/molde, prejudicando a lubrificação e podendo levar, inclusive, à ocorrência de acidentes operacionais denominados rompimento de pele (“*Breakout*”) (Mills, 2016).

A dinâmica de infiltração do pó fluxante na interface placa/molde, bem como as tendências de cristalização do insumo, ditam o seu comportamento quanto ao controle da transferência de calor e à lubrificação.

Conforme Diehl (1995), Branion (1986), Emi (1991), Riboud (1981) e Branion (1994), o pó fluxante fundido (líquido) fica na interface entre o filme de pó fluxante solidificado e a placa de aço em solidificação, gerando uma lubrificação nessa interface. Durante a oscilação do molde, o pó fluxante líquido é arrastado para a interface placa/molde,

durante o tempo de estripamento negativo (descida do molde com velocidade superior à do veio e retorno do molde, ou seja, estripamento positivo (subida do molde) certa quantidade do pó fluxante é pressionada entre a parede do molde e a placa em solidificação, porém não ocorre retorno do fluxante líquido, porque o menisco faz uma proteção desse local.

Os defeitos superficiais de placas podem ser reduzidos por meio de uma lubrificação eficiente. Além disso, há uma menor probabilidade do aço agarrar na parede do molde e causar danos ao equipamento, como o rompimento de pele (“*Breakout*”). Para garantir uma boa lubrificação, o pó fluxante fundido deve estar com a viscosidade e a temperatura de solidificação ajustadas. Há também os parâmetros operacionais que têm grande peso quanto à eficiência da lubrificação, como o tipo de aço, temperatura do aço, velocidade de lingotamento, parâmetros da oscilação do molde (amplitude e frequência), geometria da válvula submersa, vazão de argônio no molde, controle da variação do nível de aço no molde e profundidade da válvula submersa.

O pó fluxante na interface da placa/molde tem papel relevante no controle do fluxo de calor do aço em solidificação para a placa de cobre do molde. Um controle adequado favorece uma solidificação uniforme, evitando a geração de defeitos em placas. Em geral, caso ocorra um excesso de extração de calor, podem ocorrer defeitos superficiais na placa, por exemplo trincas longitudinais. Caso contrário (taxa insuficiente), a pele solidificada será bastante fina, o que pode favorecer o rompimento de pele ou o desvio da qualidade de placas por problemas dimensionais como: excesso de largura, falta de largura e abaulamento (concavidade ou convexidade).

Durante o lingotamento, o pó fluxante sofre alterações nas suas propriedades em consequência das reações químicas ocorridas com o aço líquido e com as inclusões não metálicas, que ficam flutuando na região do menisco (superfície do aço). Um tipo de inclusão comum no lingotamento é a alumina (Al_2O_3), gerada a partir dos aços desoxidados ao alumínio (AA) e ao silício (AS) (Lin e Chung, 1992).

As inclusões são críticas para o lingotamento, pois elas estrangulam o canal interno e o orifício de saída de aço da válvula submersa, gerando menor vazão do aço entre o distribuidor e o molde, sendo necessário reduzir a velocidade de lingotamento e, em

casos mais críticos, interrompe o sequencial (parada da máquina). Na figura 3.3 são mostradas as inclusões sendo arrastadas para o molde.

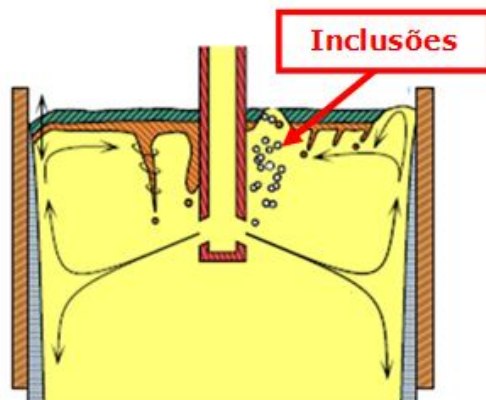


Figura 3.3 – Desenho esquemático de inclusão no molde (Swartz *et al.*, 2014).

As inclusões também aumentam a chance de ocorrer uma lubrificação deficiente e em consequência um rompimento de pele. Além desses problemas operacionais, podem ocorrer defeitos superficiais em placas ou posteriormente em produto acabado, como o defeito tipo esfoliamento (“Sliver”). Na figura 3.4 é mostrado o defeito tipo “esfoliamento” (ES) em bobina laminada.

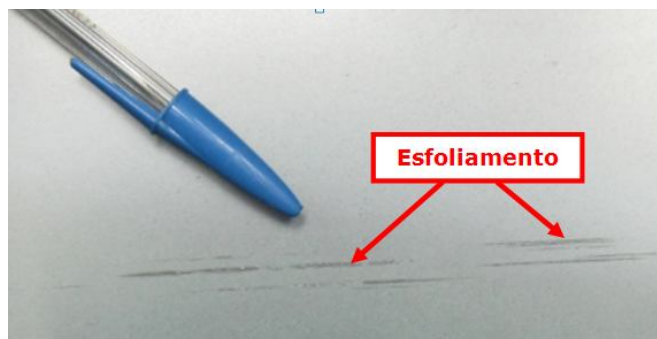


Figura 3.4 – Foto do defeito “esfoliamento” em material acabado.

Para a formação adequada das camadas no molde e para que as funções principais atuem de maneira consistente ao longo do processo de lingotamento contínuo, as propriedades dos pós fluxantes devem ser conhecidas, controladas e ajustadas para cada tipo de aço e característica específica do processo.

As principais propriedades estão relacionadas às características de fusão, à viscosidade da escória líquida formada e ao comportamento de solidificação/cristalização na interface placa/molde. Essas serão detalhadas a seguir.

3.2 Propriedades dos Pós Fluxantes

Neste tópico serão abordadas as propriedades dos pós fluxantes importantes para o seu desempenho, sendo elas: comportamento de fusão, viscosidade, temperatura de cristalização/solidificação e taxa de absorção de inclusões.

3.2.1 Comportamento de fusão dos pós fluxantes

Em se tratando da formação adequada das camadas de escória líquida e pó “*in natura*” na superfície livre do molde, o comportamento de fusão é um dos aspectos a serem considerados. Dois fatores são importantes e devem ser avaliados: i) a faixa de fusão do pó fluxante, que está relacionada diretamente com as temperaturas de fusão dos elementos ou compostos presentes em sua formulação e ii) a taxa de fusão, que é a velocidade com que a camada de escória líquida é formada, que por sua vez depende basicamente da composição química do pó fluxante e das condições térmicas e parâmetros operacionais (Mills e Däcker, 2017).

É claro que os parâmetros de processo, principalmente aqueles que afetam o fluxo de calor vertical, influenciarão no comportamento de fusão do pó fluxante no molde. Entretanto, nesse tópico apenas os aspectos relativos às características do pó fluxante serão abordados.

3.2.1.1 Faixa de fusão

A definição da faixa de fusão dos pós fluxantes está diretamente relacionada ao tipo de aço e às temperaturas de lingotamento do processo. A escolha da composição química e

da constituição mineralógica dos pós fluxantes definem as temperaturas em que a fusão irá iniciar e finalizar (Oliveira *et al.*, 2007).

A escolha dos minerais é importante. Durante o aquecimento eles irão reagir entre si para formar fases de menor ponto de fusão, ou seja, a faixa de fusão de um pó fluxante não depende exclusivamente da temperatura de fusão dos seus constituintes iniciais, mas da capacidade de interação entre eles para formar compostos de menor ponto de fusão (Sridhar *et al.*, 2002).

Métodos de difração de raios X a alta temperatura têm sido utilizados para a determinação do efeito de fases mineralógicas na faixa de fusão dos pós fluxantes e na capacidade de reação entre elas. Nessa técnica, é possível identificar as fases presentes em diferentes temperaturas a partir de uma mistura inicial. Na figura 3.4 são apresentadas as fases formadas no aquecimento e resfriamento de um pó fluxante na faixa de temperatura de 500 a 1300°C.

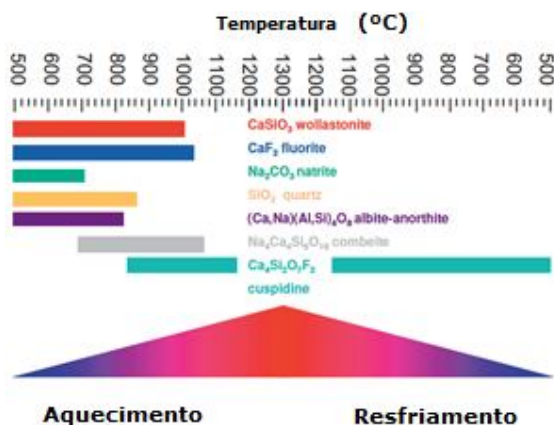


Figura 3.4 – Fases formadas no aquecimento e resfriamento de um pó fluxante entre as temperaturas de 500 e 1300°C (Kromhout, 2011).

Os resultados apresentados por Kromhout (2011) mostram que durante o aquecimento, primeiramente os carbonatos (*natrite*), desaparecem, depois os silicatos e, em seguida, as fluoritas e a wollastonita. No meio tempo, as fases intermediárias combeíta e cuspidina são formadas e, posteriormente, o pó fluxante funde-se. Pode-se concluir que durante o aquecimento, um pó fluxante apresenta uma sequência específica de decomposição dos materiais primários, formando fases secundárias.

Outra técnica comumente utilizada para avaliar a faixa de fusão é a análise térmica diferencial (ATD). A técnica tem sido utilizada para identificação da ocorrência de transformações de fase em pós fluxantes por meio da determinação de temperaturas características. Nesse método, uma amostra de interesse e um material de referência são introduzidos no equipamento e avaliados em função do incremento de temperatura. As amostras são colocadas dentro de um forno lado a lado, e para as duas são fornecidas as mesmas quantidades de calor. Na medida em que se aumenta a temperatura são mostrados os picos exotérmicos ou endotérmicos associados com as reações ocorridas na amostra estudada, de acordo com o aumento ou a diminuição da temperatura, em relação à amostra padrão. Por exemplo, se ocorrer uma reação endotérmica, a fusão é um desses casos, a temperatura da amostra diminuirá em relação à amostra padrão caracterizando um vale, conforme Dodd e Tonge (1987) e Oliveira *et al.* (2007).

A figura 3.5 ilustra, na forma de um desenho esquemático, um aparato para a realização da análise térmica diferencial (ATD) e uma curva tipicamente obtida em um ensaio.

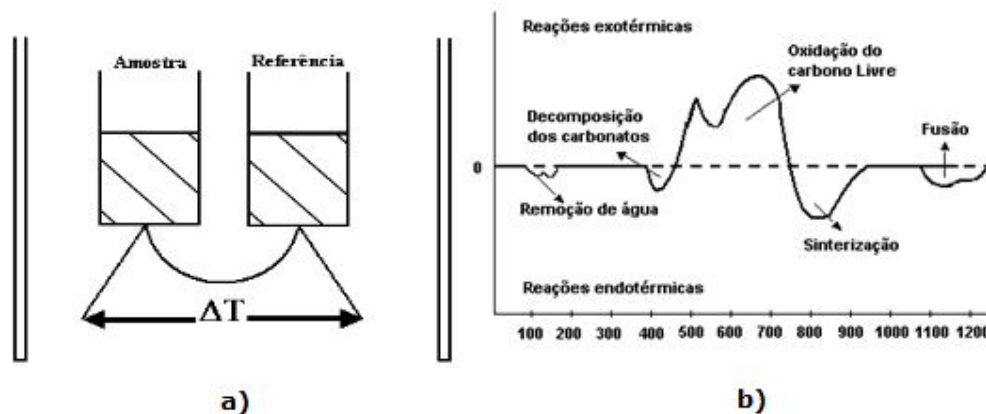


Figura 3.5 – Desenhos esquemáticos sendo: a) aparato para a realização de teste de análise térmica diferencial (ATD) e b) curva de ATD mostrando reações características (Oliveira *et al.*, 2007).

No caso da caracterização de pós fluxantes, a análise térmica diferencial (ATD) pode ser usada para determinar a faixa de fusão. Outras reações que envolvem alterações de temperatura, como a perda da umidade, a decomposição, a oxidação do carbono, a sinterização, podem ser também avaliadas no teste, conforme ilustrado na figura 3.5.

A avaliação do comportamento de fusão de um pó fluxante pode ser feita, também, utilizando um microscópio de aquecimento. Esse ensaio permite determinar várias temperaturas importantes para o comportamento de fusão dos pós fluxantes: a temperatura em que ocorre a sinterização, a temperatura de início de amolecimento, a temperatura de fusão completa e a temperatura de fluidez total. Tal método de determinação de fusão para pós fluxantes é bastante utilizado, e a metodologia de análise é regida pela norma DIN 51730 *Testing of solid fuels - Determination of fusibility of fuel ash* (2007).

Na figura 3.6 é mostrado um desenho esquemático de um microscópio de aquecimento.

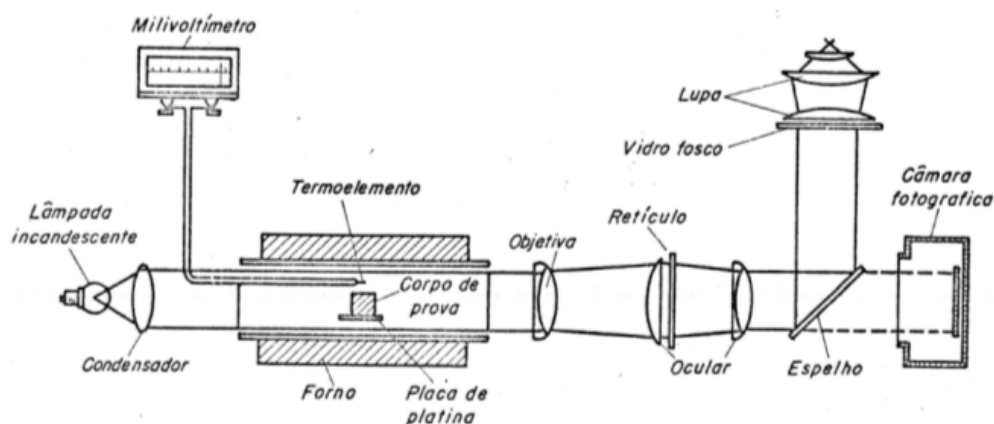


Figura 3.6 – Desenho esquemático de um microscópio de aquecimento (Brinck, Valadares, Paco, 1980).

Para realização do ensaio, uma amostra deve ser preparada e colocada sobre um porta-amostra no interior do forno. A amostra é centrada no visor e, em seguida, inicia-se o seu aquecimento. Faz-se o registro do tempo, da temperatura e das formas assumidas pela amostra durante o ensaio, por meio de um sistema de aquisição de imagens.

Um exemplo de evolução da forma de uma amostra durante o ensaio de microscopia de aquecimento é mostrado na figura 3.7.

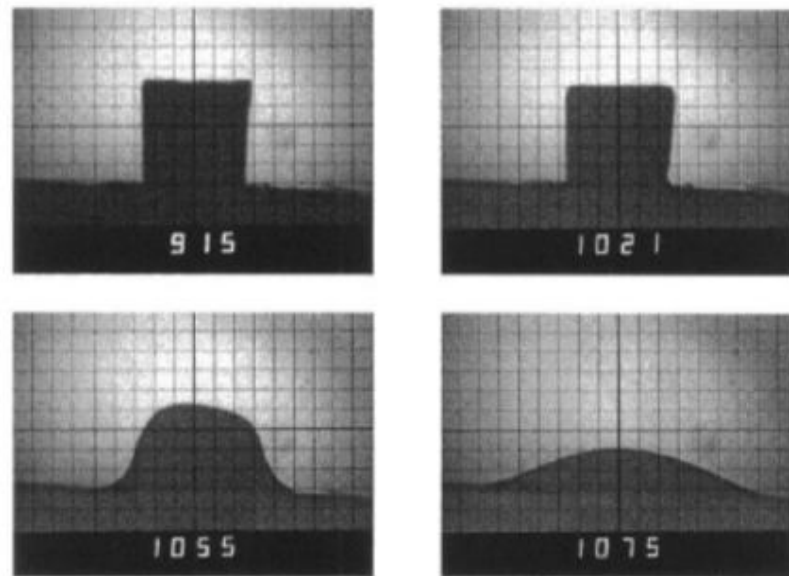


Figura 3.7 – Exemplo de resultados de uma análise de fusão em microscópio de aquecimento (Oliveira *et al.*, 2007).

Na temperatura de sinterização, a amostra em aquecimento começa a mostrar suas primeiras alterações de forma. Na temperatura de amolecimento, após a completa sinterização do material, a amostra começa a tomar uma forma mais arredondada, havendo um início de espalhamento da parte inferior, reduzindo sua altura. Na temperatura de fusão, a amostra deforma-se progressivamente e atinge uma altura igual à metade da sua altura inicial. Para identificar o ponto de fluidez, basta identificar o ponto em que a amostra começa a se espalhar progressivamente e atinge uma altura igual a $\frac{1}{4}$ de sua altura inicial (DIN 51730, 2007).

3.2.1.2 Taxa de fusão

A taxa de fusão dos pós fluxantes é uma propriedade importante, por estar relacionada com a formação da piscina de escória líquida em quantidade suficiente para suprir o consumo na interface placa/molde (Kromhout *et al.*, 2002).

Durante o lingotamento, a taxa de fusão está diretamente ligada com a velocidade de lingotamento, oscilação do molde (frequência) e camadas do pó fluxante existentes no molde (pó fluxante “*in natura*”, camada sinterizada e camada de pó fluxante líquido).

Ao longo do lingotamento, se a velocidade de fusão do pó fluxante for muito elevada, a espessura da camada líquida aumenta, então diminui-se o isolamento térmico, o que pode causar um resfriamento da superfície líquida do aço. Por outro lado, se a velocidade de fusão for muito baixa, diminui-se a espessura de escória líquida disponível no menisco e, por consequência, a lubrificação da interface placa/molde poderá se tornar ineficiente ou deixar de suportar as flutuações de operação.

Conforme Bezerra *et. al.* (2007), a camada de escória líquida tem que possuir uma espessura ideal para proteger e manter a cobertura do aço líquido no molde. Em condições normais, a espessura dessa camada varia na faixa de 10 a 20 mm. A espessura da camada líquida deve ter pelo menos 1,5 a 2,0 vezes o valor da amplitude de oscilação do molde.

A taxa de fusão depende do tipo e da quantidade do carbono presente na composição do pó fluxante, como também das características de fusibilidade de cada matéria-prima em sua formulação, além da viscosidade da escória gerada em sua fusão.

Do ponto de vista prático, a taxa de fusão dos pós fluxantes é diretamente controlada pelo percentual de carbono livre (%) contido no pó fluxante. Um pó fluxante com menor teor de carbono livre terá uma maior taxa de fusão (Kromhout, 2011). Isso ocorre porque as partículas de carbono agem separando as partículas de minerais, diminuindo a aglomeração das gotas de escória líquida formadas. Assim, quanto maior a presença do carbono na composição do pó fluxante maior será o tempo para que as partículas minerais se aglomerem, conseqüentemente, menor será a velocidade de fusão.

Além de controlar a taxa de fusão do pó fluxante, o carbono pode ajudar a prevenir a reoxidação do aço, reagindo com o oxigênio que penetra na estrutura da cobertura durante o início do lingotamento, quando a barreira de escória líquida ainda não estiver totalmente formada (Mills e Dacker, 2017). Entretanto, este benefício deve ser balanceado por causa da possível transferência de carbono para o aço, que é um

problema especialmente para os aços com baixo e ultrabaixo teor de carbono e nos aços com faixas de teor de carbono muito estreitas. Assim, outros materiais têm sido usados para retardar a fusão dos pós fluxantes em substituição ao carbono, onde o *pick-up* de carbono é indesejado. Um exemplo é o uso do Si_3N_4 .

Para determinar o comportamento do carbono durante o aquecimento do pó fluxante, Supradist, Cramb e Schwerdtfeger (2004) desenvolveram um aparelho simulando as condições térmicas da superfície do molde. Para isso um tubo de quartzo contendo o pó fluxante foi submetido a um gradiente de temperatura que foi estabelecido ao longo da coluna de pó. Após o tempo de reação, o perfil de carbono foi determinado. Na figura 3.8 é apresentado um esquema para a fusão do pó fluxante em função da queima do carbono. Na figura 3.8(a) tem-se uma representação esquemática da distribuição das camadas de pó fluxante no molde e as reações de combustão do carbono, e na figura 3.8(b) é apresentado o resultado da fração volumétrica de carbono, obtida via análise de imagem da tonalidade de cinza, de pó fluxante exposto à alta temperatura e ambiente oxidante no tubo de quartzo.

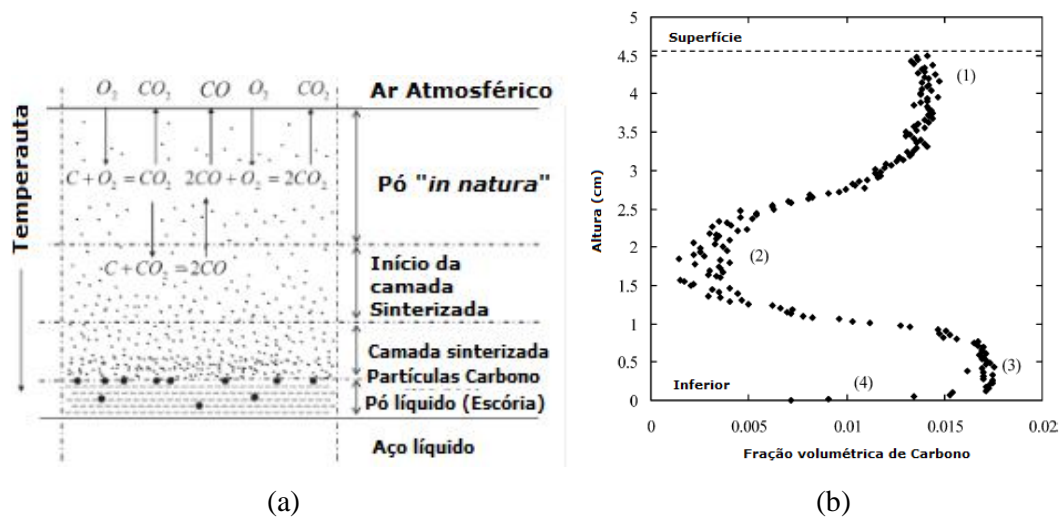


Figura 3.8 – Desenho esquemático da fusão do pó fluxante em função da queima do carbono (Supradist, Cramb e Schwerdtfeger, 2004).

Para a obtenção da figura 3.8(b) os pesquisadores mantiveram o tubo de quartzo preenchido com pó fluxante aquecido no fundo a temperaturas entre 850°C e 950°C . A combinação do desenho esquemático e do perfil de fração volumétrica mostra que

algum carbono residual ainda pode estar presente na camada de escória líquida, podendo levar ao pick-up de carbono ao aço. Mostra também, que a uma profundidade onde a temperatura é alta o suficiente, o carbono reage com o oxigênio para formar dióxido de carbono, fazendo a fração volumétrica reduzir. Em níveis mais profundos, todo o oxigênio será consumido formando dióxido de carbono. Parte do dióxido de carbono se difunde para as camadas inferiores, onde a temperatura é alta o suficiente para que a reação de Boudouard ocorra. Nesta região, observa-se a menor fração volumétrica de carbono. Por fim, o monóxido de carbono resultante se difunde para cima e queima parcialmente com oxigênio, fazendo com que uma mistura de dióxido de carbono e monóxido de carbono deixe o leito de pó fluxante.

A taxa de fusão diminui com o aumento do carbono contido no pó fluxante e se torna maior com o incremento no tamanho das partículas de carbono. Na figura 3.9 é mostrada a correlação do teor de carbono com a taxa de fusão do pó fluxante.

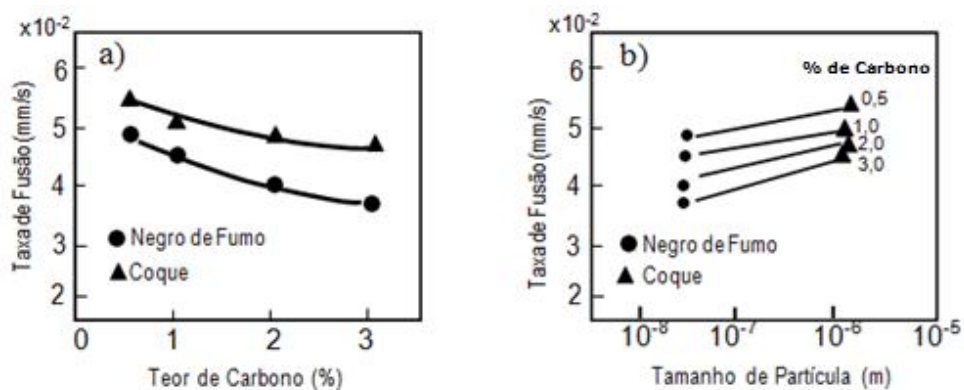


Figura 3.9 – Taxa de fusão em função do teor de carbono (a) e do tamanho da partícula (b) (Kawamoto *et al.*, 1994).

Outra questão importante é o teor de carbonatos: há um aumento na taxa de fusão com o aumento no teor de carbonatos. Nesse caso, uma medida indireta é o teor de CO_2 e o carbono total. Apesar da decomposição dos carbonatos ser uma reação tipicamente endotérmica, ocorre um aumento da condução de calor ao longo do leito de pó fluxante, causado pela agitação dos gases gerados na decomposição dos carbonatos, favorecendo a fusão. Conforme Kromhout (2011), o uso de MgCO_3 e Li_2CO_3 resulta em pós fluxantes com maiores taxas de fusão, seguidos pelos CaCO_3 , Na_2CO_3 e BaCO_3 .

A densidade aparente do pó fluxante “*in natura*” também afeta a taxa de fusão, conforme mostrado na figura 3.10. Para pós fluxantes com teores de carbono equivalentes e constituição mineralógica similar, quanto maior a densidade aparente do insumo menor será sua taxa de fusão.

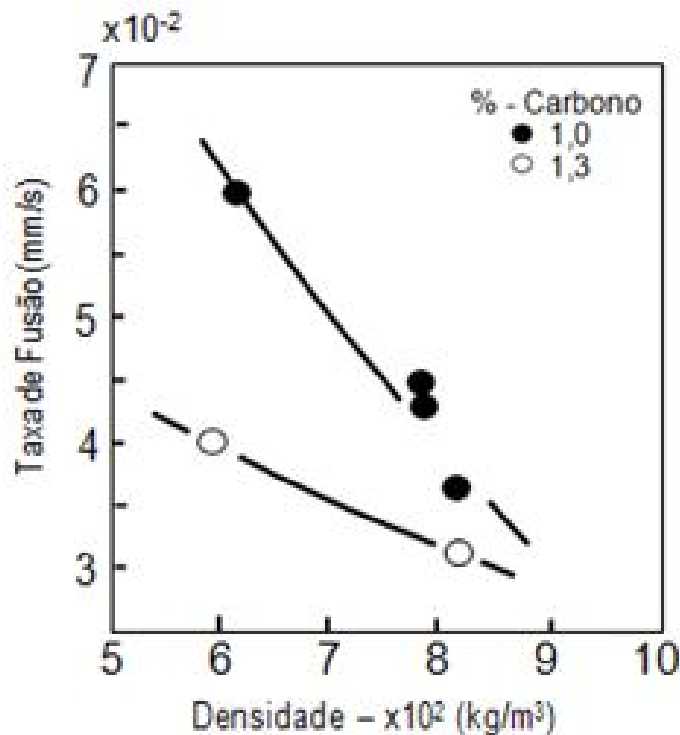


Figura 3.10 – Efeito da densidade na taxa de fusão de (Kawamoto *et al.*, 1994).

Com base nos principais parâmetros discutidos neste tópico, Kromhout (2011) propõe uma expressão para estimativa da taxa de fusão, conforme apresentado na equação (3.1).

$$M_r = 16,8 \sum k (\% \text{ carbonato}) - 0,00336C_v + 0,0477 \quad (3.1)$$

Na equação (3.1), M_r é a taxa de fusão em (mm/s), k é uma constante de reação, baseada no teor total de carbonatos, e C_v é a quantidade de carbono contido por unidade de volume (kg/m³). Conforme Kawamoto *et al.* (1994), o volume de carbono nas partículas está diretamente ligado com a sua fusão: ao reduzir o volume, ocorrerá uma taxa de fusão menor, enquanto partículas de carbono maiores resultam em maior taxa fusão.

3.2.3 Viscosidade

A viscosidade de um fluido está ligada à capacidade que ele tem em resistir às tensões de cisalhamento. Tais tensões causam uma movimentação nas camadas adjacentes ao fluido e este movimento é proporcional ao gradiente de velocidade perpendicular à aplicação da força. Esta teoria foi proposta inicialmente por Newton, e foi chamada de Lei de Newton da Viscosidade. As escórias, formadas a partir da fusão de pós fluxantes, são fluidos newtonianos, ou seja, a tensão de cisalhamento e sua relação com a viscosidade pode ser descrita por esta lei.

A viscosidade é uma propriedade intrínseca de uma determinada escória, sendo que, o conhecimento de sua estrutura ou do arranjo de suas moléculas ajuda no entendimento dos fatores que afetam esta propriedade.

A viscosidade de pós fluxantes é afetada principalmente pela temperatura, pela composição química e pela natureza mineralógica dos constituintes. Em geral, as escórias são formadas por cátions e ânions resultantes da ionização de óxidos básicos e ácidos em solução líquida. Pode-se considerar que óxidos ácidos são aqueles que, quando dissolvidos na escória, adquirem íons de oxigênio adicionais, formando complexos aniônicos, enquanto os óxidos básicos fornecem os íons oxigênio e o seu cátion passa a se mover livremente (Mills e Däcker, 2017).

Os óxidos ácidos mais comuns são SiO_2 e Al_2O_3 , que se comportam de maneira semelhante. Os óxidos básicos mais importantes são CaO e MgO .

Do ponto de vista estrutural, as escórias de pó fluxante podem ser consideradas silicatos fundidos com uma estrutura polimérica baseada no $[\text{SiO}_4^{-4}]$ tetraedro. Os óxidos, como os de cálcio, sódio e ferro, tendem a quebrar a cadeia polimérica e formar $[\text{O}^{-2}]$, balanceado pelo Na^+ e etc. Óxidos como o Al_2O_3 podem se ajustar à cadeia de silicatos pela formação de $[\text{AlO}_4^{-5}]$, contudo essa formação requer um cátion localizado próximo a ele para promover o balanço de cargas. Os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 são formadores de rede, CaO , Na_2O , FeO e MnO , favorecem a quebra da rede cristalina. TiO_2 e ZrO_2

provavelmente penetram na cadeia a baixas concentrações, mas comprometem a ação dos quebradores de redes em concentrações mais altas (Mills, 2000).

Nas figuras 3.11 e 3.12 são apresentados desenhos esquemáticos da estrutura polimérica de silicatos.

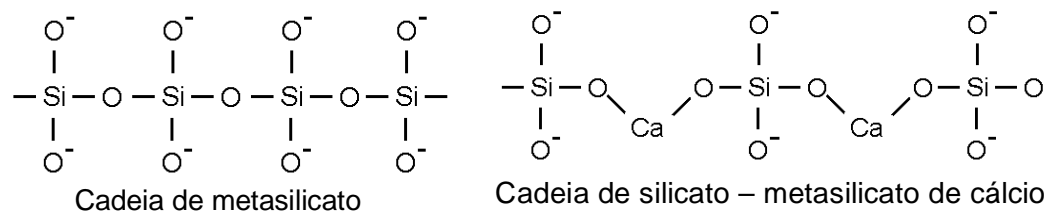


Figura 3.11 – Representação da matriz tridimensional dos silicatos (Mills, 2000).

Os óxidos como Na_2O , K_2O , Li_2O têm a característica de formar ligações mais fracas deixando a cadeia de silicatos mais flexível. A reação entre a rede de silicatos e os óxidos está representada na figura 3.12.

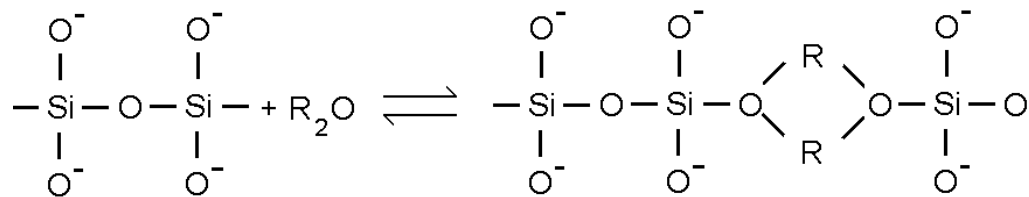


Figura 3.12 – Representação da matriz tridimensional dos silicatos mais flexíveis (Mills, 2000).

Na representação da reação apresentada na figura 3.12, o radical R_2O representa os óxidos Na_2O , K_2O , Li_2O .

A dependência da viscosidade com a temperatura pode ser descrita por meio da equação (3.2).

$$\mu = Ae^{\frac{E}{RT}} \quad (3.2)$$

Na equação (3.2) os símbolos A, E, R e T representam uma constante, a energia de ativação para o fluxo viscoso, a constante dos gases e a temperatura em Kelvin, respectivamente.

A maneira mais usual de se representar a viscosidade é por meio de gráficos que a relacionam com o logaritmo do inverso da temperatura. Na figura 3.13 é apresentada uma ilustração do formato típico de uma curva de viscosidade em função da temperatura. Essa curva pode ser dividida em três partes: i) parte linear com inclinação E/R a temperaturas mais altas; ii) pequena região não linear que está relacionada com a transição ou surgimento de cristais na escória e iii) parte vertical nas temperaturas mais baixas, representando a região cristalina ou de vidro superresfriado (Sturgill, 1999).

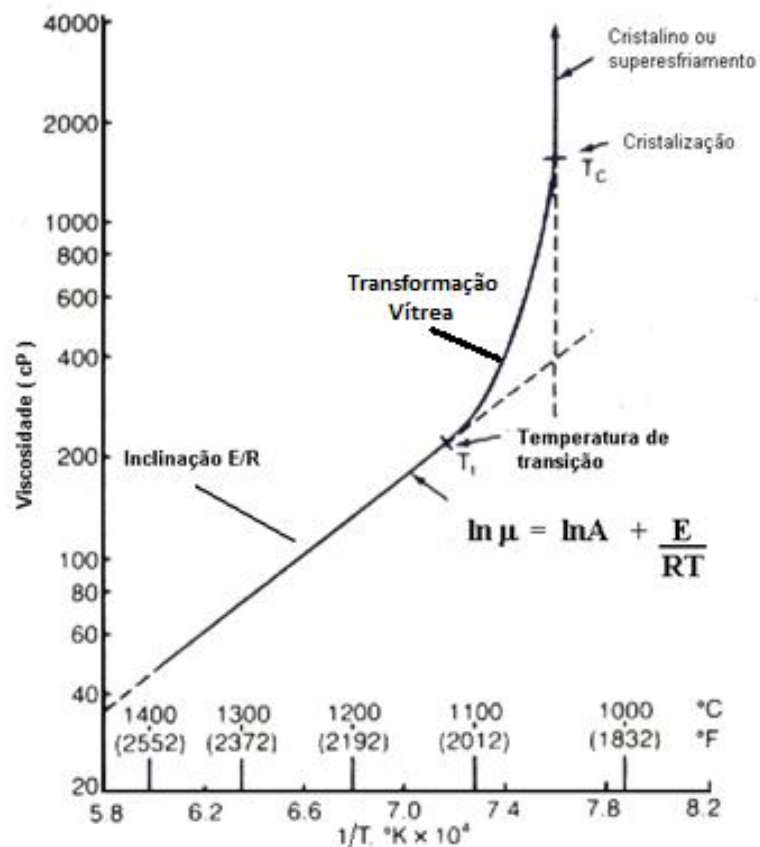


Figura 3.13 – Curva de viscosidade típica para pós fluxantes (Sturgill, 1999).

Existem vários tipos de viscosímetros utilizados para avaliar a viscosidade de pós fluxantes em função da temperatura. O equipamento mais utilizado atualmente é o viscosímetro de cilindro rotativo. Essa técnica consiste em introduzir uma haste cilíndrica em um cadinho contendo o pó fluxante fundido. A viscosidade é determinada pela medida do torque necessário para manter a haste em movimento constante. Esse torque é multiplicado por uma constante de calibração apropriada, para a obtenção da viscosidade. Os procedimentos para utilização de um viscosímetro rotativo são descritos conforme a norma ASTM – C1276-94 *Standard test method for measuring the viscosity of mold powders above their melting point using a rotational viscometer*, de 2009.

É possível determinar a viscosidade dos pós fluxantes utilizando-se de sua relação com a temperatura a partir de modelos empíricos. São encontrados diversos modelos empíricos disponíveis na literatura para cálculo da viscosidade de escórias a partir de sua composição química. Em geral, esses modelos são baseados em ajustes numéricos de dados experimentais sem levar em consideração a estrutura das escórias. Na equação (3.3) é apresentada uma equação típica para a determinação da viscosidade de escórias líquidas.

$$\mu = A.T.e^{(B/T)} \quad [\text{dPa.s}] \quad (3.3)$$

Na equação (3.3), μ é a viscosidade, A e B são parâmetros que variam com a composição do pó fluxante e T é a temperatura em Kelvin.

A tabela III.2 mostra alguns modelos propostos para o cálculo da viscosidade de pós fluxantes em função da composição química e da temperatura.

Tabela III.2 – Modelos empíricos para o cálculo da viscosidade de pós fluxantes em função da composição química e da temperatura (Oliveira, 2007).

Modelo	Equação	A	B
IRSID	$\mu = A.T e^{(B/T)}$	$A = \exp [-19,81 + 1,73$	$B = 31140 - 23896 (XCaO^*) -$ $46356 (XCF_2) - 39159 (XNa_2O)$ $+ 68833 (XAl_2O_3)$
	μ (dPa.s)	$(XCaO^*) + 5,82 (XCF_2) +$ $7,02 (XNa_2O^*) -$ $35,76(XAl_2O_3)]$	
	T = Temperatura K	X = fração molar	
Nippon Steel	$\ln\mu = \ln A - B/T$	$\ln A = -0,242Al_2O_3 - 0,061$	$B = -92,54SiO_2 + 283,186 Al_2O$ $- 165,635 CaO - 413,646 CaF_2 -$ $455,103Li_2O + 29012,564$
	μ (poise)	$CaO - 0,121 MgO + 0,063$ $CaF_2 - 0,19 Na_2O - 4,816$	
	T = temperatura K	Composição = % Molar	
RIST	$\text{Log}\mu = \text{Log}A + B/T$	$\text{Log} A = -2,037 - 0,46$	$B = 60807,2 + 70,68 (XSiO_2) +$ $32,58 (XCaO) + 312,65$ $(XAl_2O_3) - 34,77 (XNa_2O) -$ $176,1 (XCaF_2) - 167,4 (XLi_2O) +$ $59,7 (XB_2O_3)$
	μ (Pa.s)	$(XSiO_2) - 0,07 (XCaO) -$ $0,041 (XMgO) - 0,185$ $(XAl_2O_3) + 0,035 (XCaF_2) -$ $0,095 (XB_2O_3)$	
	T = Temperatura K	X = % Molar	



A basicidade ótica de escórias multicomponentes é outro fator utilizado para se avaliar a viscosidade. Esta grandeza representa a habilidade de um óxido doar carga negativa e a relação NBO/T (*number of non-bridging oxygen per tetrahedrally co-ordinated atom*) tem sido também utilizada como medida do grau de despolimerização de escórias silicatadas. Deve-se salientar que o grau de despolimerização de uma rede silicatada é o fator primário que influencia muitas propriedades físicas das escórias, para uma dada temperatura, e, em especial, a viscosidade (Mills, 2000).

Com base nas características de formação das redes cristalinas, algumas afirmações sobre o efeito de adições de compostos na viscosidade dos pós fluxantes podem ser feitas, como por exemplo: Al_2O_3 e B_2O_3 causam um aumento na viscosidade; já o Li_2O , Na_2O e CaF_2 causam uma diminuição da viscosidade (Turkdogan, 1983).

Na figura 3.14 é mostrado o resultado de testes industriais realizados em aço com alto teor de Alumínio (0,5%), onde foram coletadas e analisadas amostras de escórias líquidas de pó fluxante no molde. Conclui-se que na medida em que a Al_2O_3 aumenta, a viscosidade também aumenta.

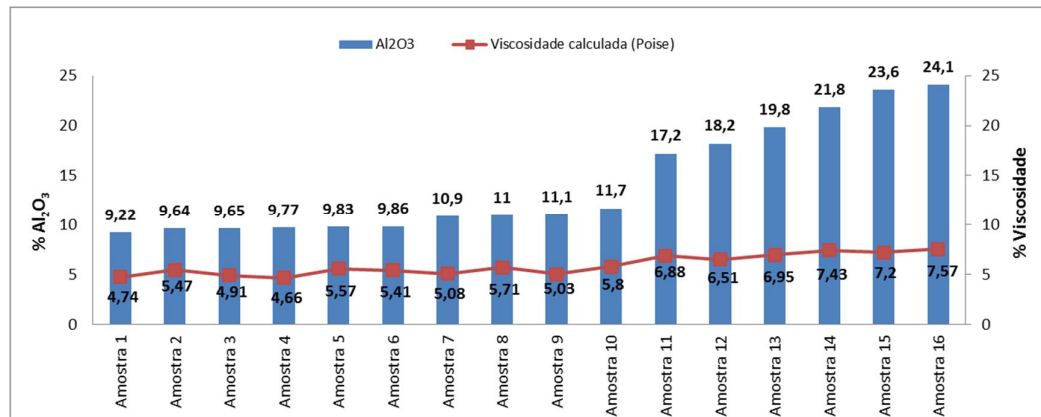


Figura 3.14 – Efeito da Al₂O₃ na viscosidade do pó fluxante (Oliveira *et al.* 2010).

Adições de 10% a 20% de TiO₂ resultam na redução da viscosidade, indicando que o TiO₂ atua como um despolimerizador, o que não ocorre para pequenas quantidades, pois o TiO₂ pode passar a substituir o Si na cadeia. Wang *et al.* (2016) relataram que com várias escórias de pós fluxantes diferentes é notada uma influência do teor de TiO₂ na viscosidade: à medida que o teor de TiO₂ aumenta, a viscosidade reduz. Na figura 3.15 é mostrada a influência do teor de TiO₂ na viscosidade.

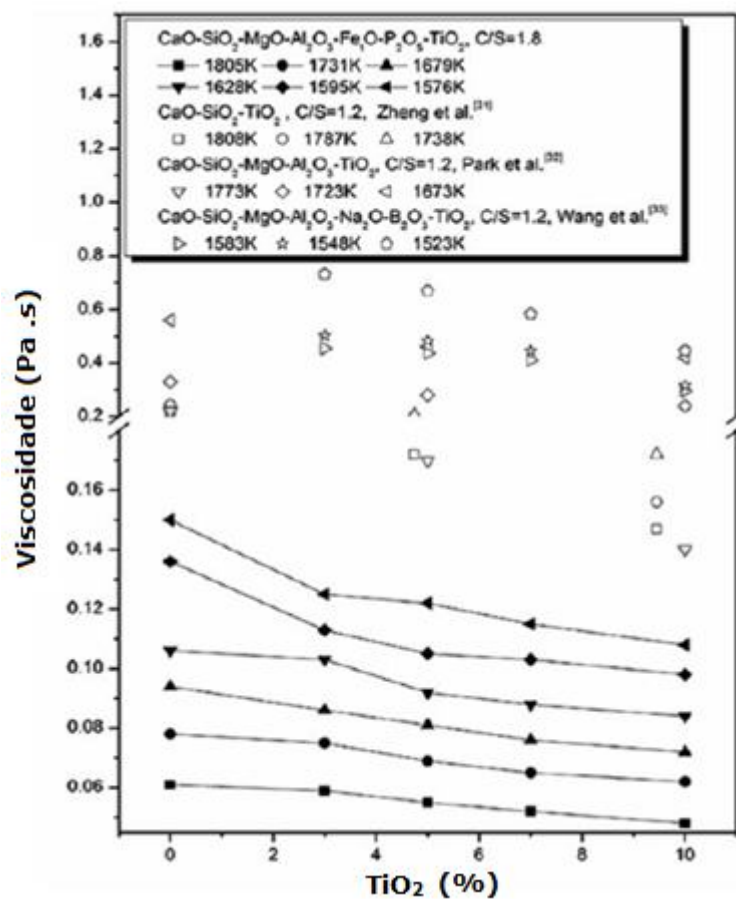


Figura 3.15 – Efeito do TiO₂ na viscosidade de pós fluxantes (Wang *et al.*, 2016).

Conforme Attar *et al.* (2011), os teores de TiO₂ e de Na₂CO₃ têm efeito na viscosidade e na cristalização de pós fluxantes. Na figura 3.16 são mostrados resultados comparativos de viscosidade e da composição química de três amostras de pós fluxantes distintos. É observado que a viscosidade tem uma correlação inversa com o teor de TiO₂, ou seja, quanto maior é o teor de TiO₂, menor a viscosidade.

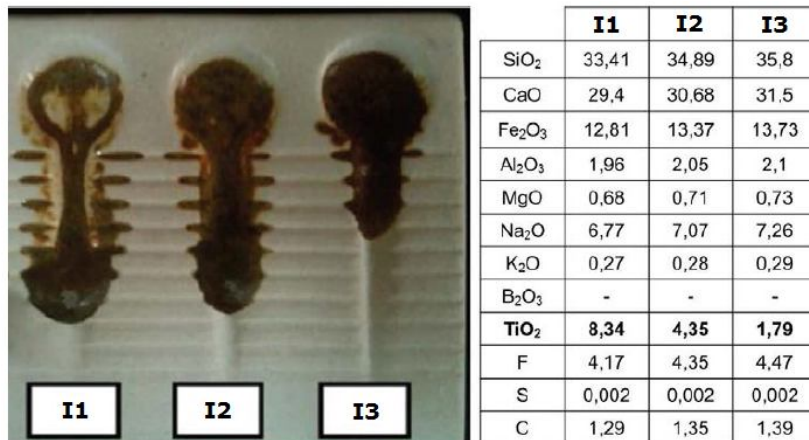


Figura 3.16 – Ensaio de navícula com o efeito do teor de TiO₂ na viscosidade (Attar *et al.* 2011).

Alguns estudos têm mostrado que o TiO₂ tem pouco efeito na viscosidade para teores abaixo de 6%; entretanto, acima de 10% de adição, o TiO₂ começa a se precipitar na forma de partículas sólidas, o que está de acordo com dados industriais (Reis *et al.*, 2017), que indicam a solubilidade de 10% para o TiO₂ em escórias de pó fluxante.

Na figura 3.17 são apresentados os efeitos de alguns compostos na viscosidade dos pós fluxantes.

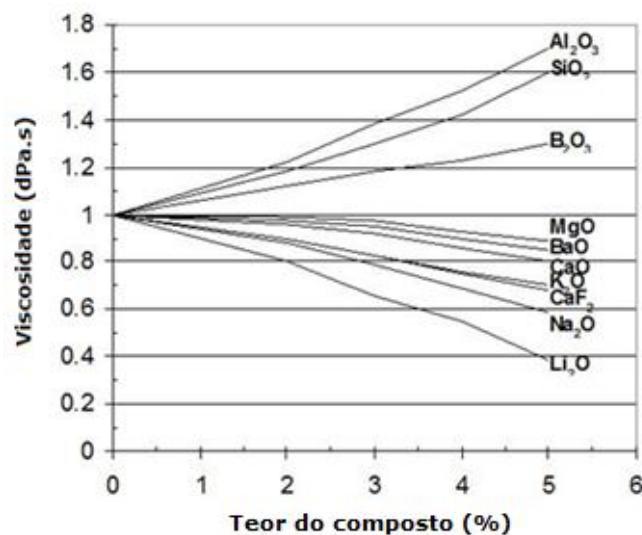


Figura 3.17 – Influência de compostos na viscosidade do pó fluxante (Fox *et al.*, 2003).

Pós fluxantes com comportamento não newtoniano também podem ser encontrados. Tais pós fluxantes são obtidos pela adição de nitrogênio às escórias para formação de ligações fracas que se quebram em altas taxas de cisalhamento. Isso ocorre porque os íons de nitrogênio ocupam os sítios no tetraedro $[\text{SiO}_4^{-4}]$ e uma ligação fraca é formada com um íon Ca^{2+} . Esta ligação fraca é desfeita quando a taxa de cisalhamento excede um valor crítico, resultando na diminuição da viscosidade (Mills, 2016).

No lingotamento contínuo, as forças de cisalhamento são pequenas na região do menisco, mas se tornam elevadas na interface placa molde, quando a escória líquida infiltra. Consequentemente, os pós fluxantes não newtonianos terão alta viscosidade na região do menisco, o que reduz a taxa de infiltração na interface, e baixa viscosidade na região de interface placa/molde, garantindo a boa lubrificação (Mills, 2016).

É mostrado na figura 3.18 um desenho esquemático do efeito do nitrogênio na formação de escória de fluxantes não newtonianos.

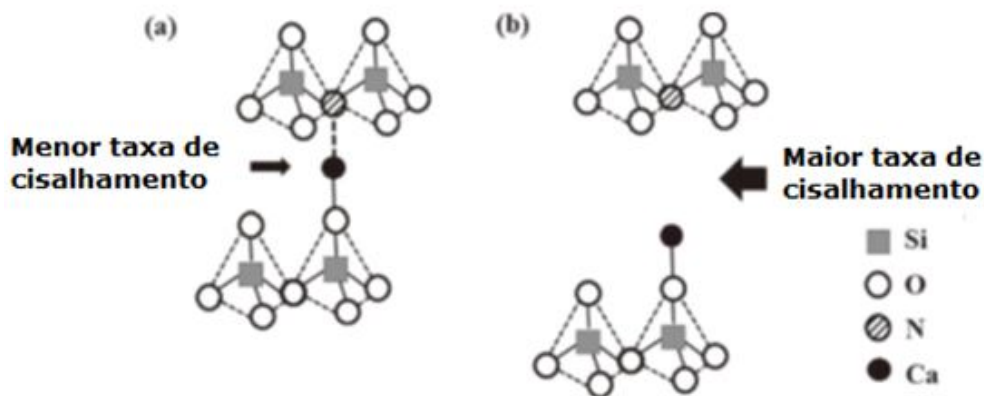


Figura 3.18 – Desenho esquemático do efeito do nitrogênio na formação de escória de fluxante não newtoniano (Mills, 2016).

As escórias de fluxantes não newtonianos contêm aproximadamente 0,2% de nitrogênio por meio da adição de Si_3N_4 em comparação a um pó fluxante convencional.

3.2.4 Solidificação/Cristalização

A cristalização dos pós fluxantes na interface placa/molde é um fenômeno muito importante para a compreensão dos mecanismos de transferência de calor no molde de lingotamento contínuo. Entretanto, devido às características da região de interface placa/molde não é fácil avaliar tal comportamento durante o processo de lingotamento (Oliveira *et al.* 2010).

Em linhas gerais, o pó fluxante, ao ser resfriado abruptamente, irá se comportar como um vidro super-resfriado e posteriormente sofrerá transformações ditadas pela sua composição química e pelas condições térmicas na região da interface placa/molde. Do ponto de vista prático, os filmes de pó fluxante devem ser avaliados quanto à sua cristalinidade, pois este é o efeito principal no controle da extração de calor no molde (Oliveira *et al.*, 2011).

A formação da camada cristalina controla a transferência de calor no molde. Devido à opacidade da fase cristalina, ela inibe a transferência de calor por radiação. Assim, um pó fluxante ao se cristalizar reduz sensivelmente o fluxo de calor da placa para o molde. A figura 3.19 apresenta um desenho esquemático da interface placa/molde e as resistências térmicas das diferentes camadas.

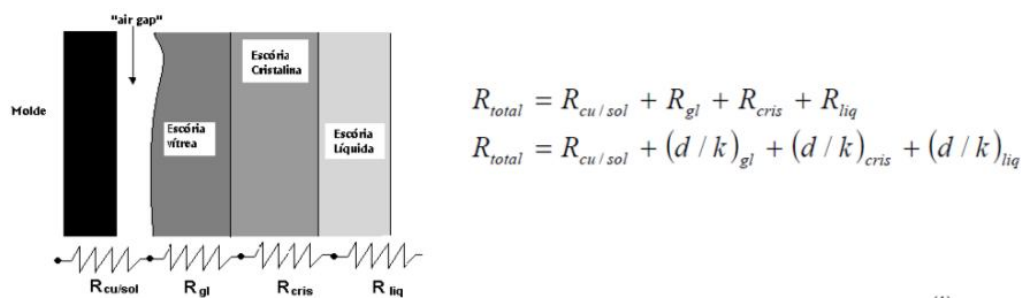


Figura 3.19 – Representação esquemática da interface placa/molde (Oliveira *et al.*, 2010).

Na figura 3.19 R_{total} , $R_{Cu/Sol}$, R_{gl} , R_{cris} , R_{liq} representam as resistências térmicas total, da interface cobre-pó fluxante sólido, das fases vítrea, cristalina e líquida do pó fluxante,

respectivamente. k e d representam as condutividades térmicas e espessuras das diversas camadas.

Entretanto, definir as condições de cristalização/solidificação depende também das taxas de resfriamento, ou seja, das técnicas utilizadas em laboratório para a medição dessa propriedade.

Existem várias técnicas para a determinação das características de cristalização/solidificação dos pós fluxantes. Entretanto, existe muita confusão na literatura sobre o emprego correto do termo. Esta temperatura é descrita por vários nomes, tais como: temperatura de cristalização, temperatura de solidificação e temperatura de transição vítrea (ou “*break temperature*”, T_{br}). Apesar de representarem o mesmo fenômeno, ou seja, o surgimento de sólidos e de mudança de comportamento da viscosidade, estas temperaturas são definidas separadamente, e a diferença no nome está relacionada ao método de obtenção da temperatura (ensaio) ou por simples convenção (Mills e Däcker, 2017).

A “*break temperature*” é tida como a temperatura relacionada com a “quebra” na curva experimental de viscosidade. Sendo assim, esta temperatura está vinculada à medida da viscosidade a altas temperaturas, utilizando viscosímetros (Sridhar, 2003), conforme mostrado na figura 3.20.

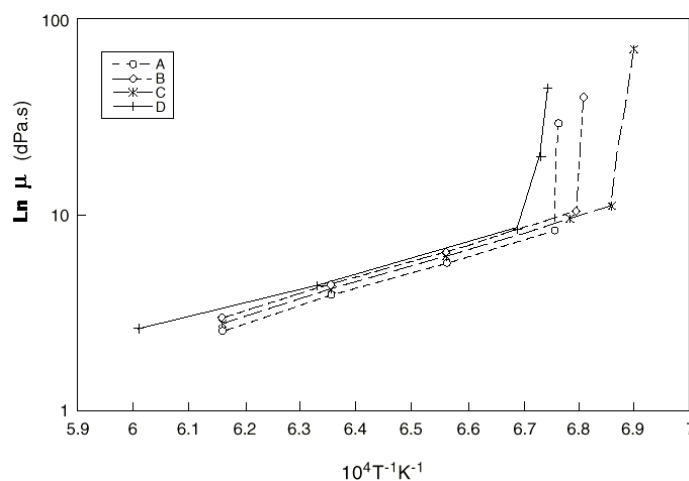
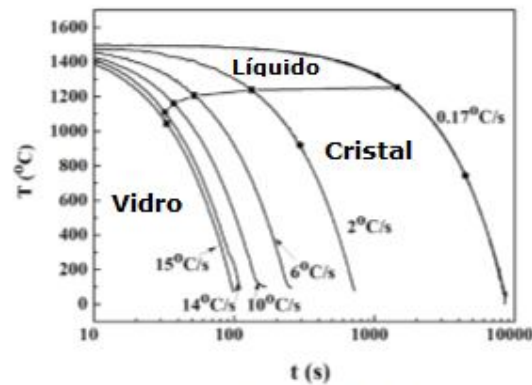
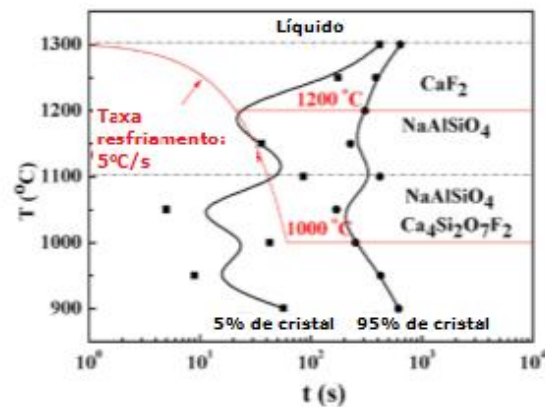


Figura 3.20 – Dados reais para viscosidade de pós fluxantes que apresentam transição vítrea (Sridhar, 2003).

A temperatura de cristalização representa o ponto onde os primeiros sólidos começam a se precipitar, e conseqüentemente, o ponto a partir do qual a lubrificação entre a interface placa/molde começa a diminuir, geralmente avaliada em diagramas TTT (temperatura, tempo, transformação) ou CCT (*continuous cooling transformation*), conforme mostrado na figura 3.21.



a) Curvas CCT



b) Curvas TTT

Figura 3.21 – (a) Curvas CCT experimentais para escórias de pós fluxantes e (b) Curvas TTT experimentais para escórias de pós fluxantes (Zhou *et al.*, 2015).

O comportamento de cristalização para a obtenção das curvas CCT e TTT é normalmente avaliado por meio de análises *in situ*, tal como o SHTT (*single hot thermocouple technology*), que combinam a análise de imagem em tempo real a partir

do resfriamento controlado de amostras de escória de pó fluxante líquido. Um exemplo de SHTT é apresentado na figura 3.22.

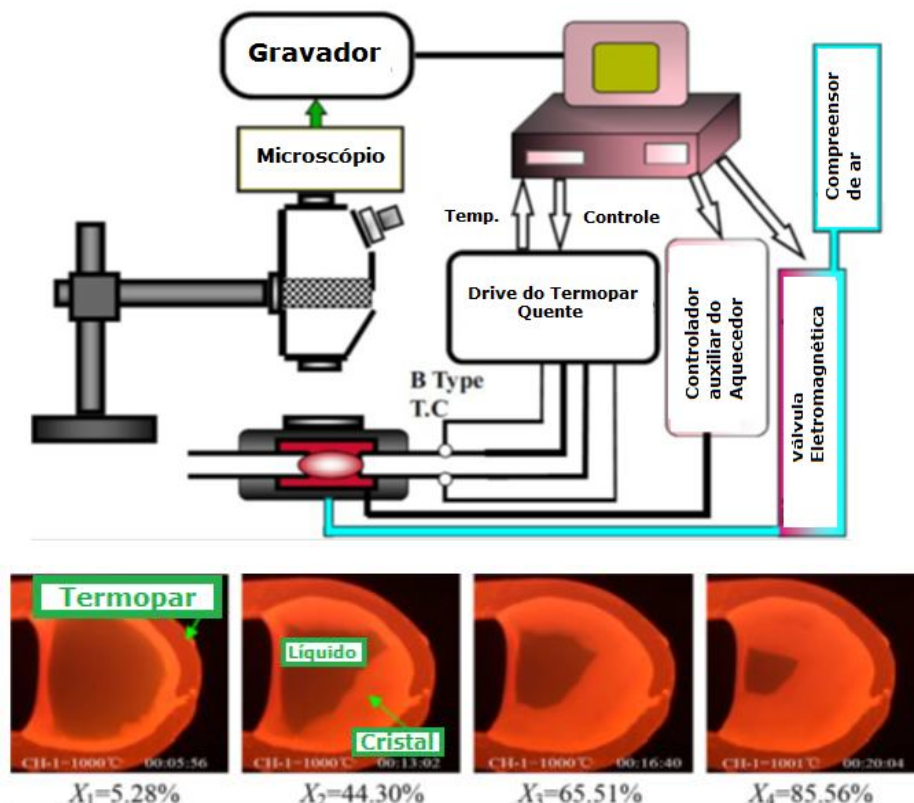


Figura 3.22 – Desenho esquemático do aparato para determinação da cristalização de pós fluxantes e imagens da variação fração de cristais de pó fluxante ao longo de um experimento, onde X representa a fração de cristal (Zhou, 2015).

Outros autores definem a temperatura de solidificação como aquela na qual a viscosidade alcança 100 Poise (T100). Kawamoto *et al.* (1992) definem a temperatura de transição como sendo a temperatura correspondente ao ponto onde o sólido e o líquido possuem proporções aproximadamente iguais.

Além de se utilizar a curva de viscosidade em função da temperatura para se determinar a “*break temperature*”, pode-se, por meio de um modelo baseado na composição do pó fluxante, obter-se esta temperatura. Este modelo, expresso através da equação (3.4), permite calcular a “*break temperature*” com precisão de $\pm 20^\circ\text{C}$ (Sridhar, *et al.*, 2002).

$$(T_{br} - 1120^{\circ}\text{C}) = - 8.43\% \text{ Al}_2\text{O}_3 - 3.3\% \text{ SiO}_2 + 8.65\% \text{ CaO} - 13.86\% \text{ MgO} - 18.4\% \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 3.2\% \text{ MnO} + 22.86\% \text{ K}_2\text{O} - 3.20\% \text{ Na}_2\text{O} - 6.47\% \text{ F} \quad (3.4)$$

Onde % indica o teor em massa do componente do pó fluxante.

Deve-se destacar que a equação (3.4) é baseada nos dados obtidos para uma taxa de resfriamento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$. Contudo, a taxa de resfriamento no molde está na ordem de 600°C/min (Sridhar, *et al.*, 2002) e a temperatura de transição diminui quando a taxa de resfriamento aumenta.

As temperaturas de solidificação e de cristalização são usualmente medidas pela Análise Térmica Diferencial (ATD) no resfriamento de pós fluxantes fundidos. Os valores da temperatura de solidificação obtidos pela curva ATD, em alguns casos, coincidem com o valor da “*break temperature*”, contudo em outras ocasiões podem ser 80°C inferiores.

Do ponto de vista da composição química, a maioria dos compostos reduzem a T_{br} , entretanto, o CaO causa um incremento nesta temperatura. O ZrO_2 tem sido usado para elevar esta temperatura sendo que, para 1% de ZrO_2 adicionado pode-se aumentar a T_{br} em até 10°C .

Alguns autores têm mostrado que a temperatura de cristalização tem relação com a basicidade binária (CaO/SiO₂). Pós fluxantes com alta relação CaO/SiO₂ têm altas temperaturas de cristalização, conseqüentemente formam fases cristalinas a temperaturas mais altas (Mills, 2003).

Resultados obtidos por Nakato *et al.* (1987) confirmam a influência da basicidade na temperatura de cristalização. Na Tabela III.3 e na figura 3.23 é mostrada a influência da basicidade (CaO/SiO₂) na temperatura de cristalização. Observa-se nessa figura que com um incremento da basicidade há um aumento na temperatura de cristalização.

Tabela III.3 – Influência da basicidade na temperatura de cristalização (Nakato, *et al.*, 1987).

Pó Fluxante	CaO/SiO ₂	Temperatura de Cristalização (°C)
L	0,97	1100
M	0,94	1100
N	0,89	850
P	0,82	Temperatura ambiente

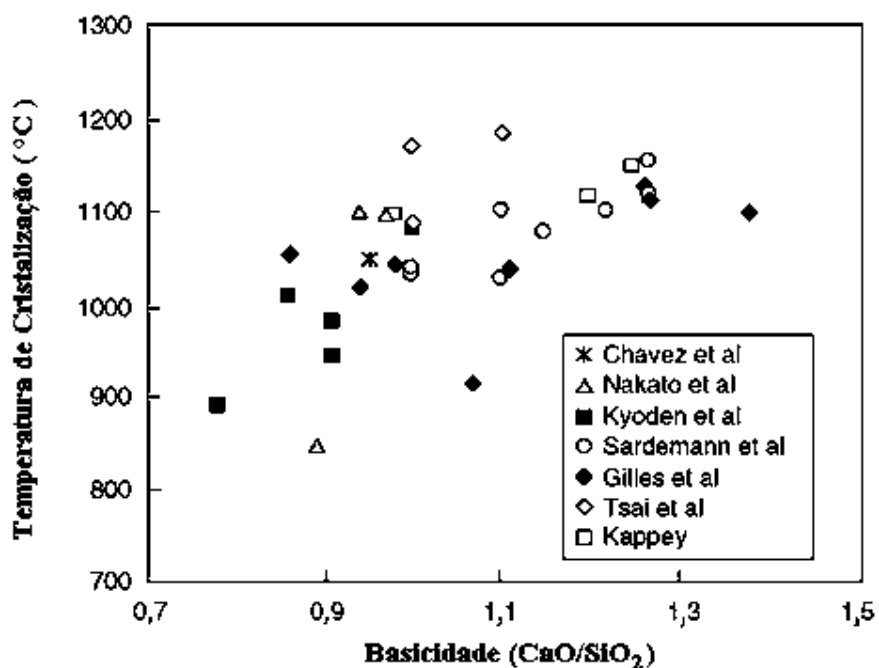


Figura 3.23 – Relação da basicidade com a temperatura de cristalização de pós fluxantes (Nakato, *et al.*, 1987 e Mills, 2003).

Oliveira *et al.* (2011) utilizaram aparatos laboratoriais para simular as condições de formação do filme de pó fluxante com condições de extração de calor similares às obtidas no molde de lingotamento contínuo. Os resultados mostraram que o grau de cristalinidade do filme de pó fluxante (fração cristalizada do filme) apresenta uma forte correlação com o fluxo de calor. Com o aumento do percentual de fases cristalinas no filme solidificado ocorre a redução no fluxo de calor global. Esses pesquisadores mostraram também que a temperatura de cristalização, medida em laboratório, não está diretamente vinculada ao grau de cristalização do filme de pó fluxante solidificado. Em

contrapartida, a relação CaO/SiO_2 apresenta correlação com o percentual de fases cristalinas formadas nos filmes de pó fluxante. Na figura 3.24 são apresentados os resultados obtidos por estes pesquisadores.

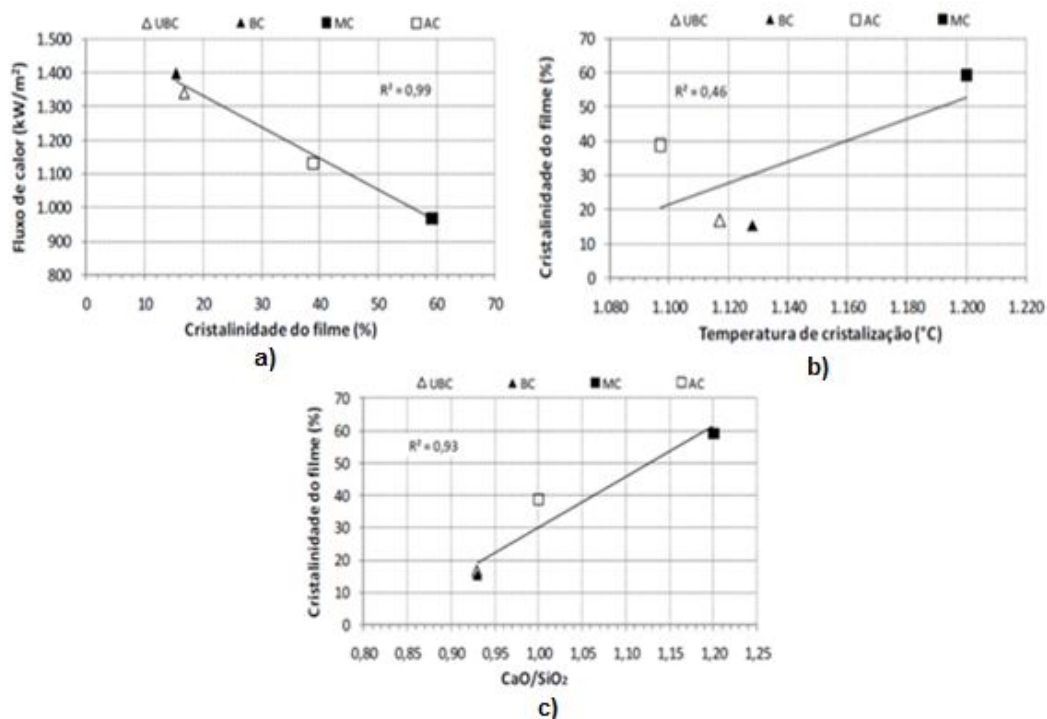


Figura 3.24 – a) Variação do fluxo de calor com a cristalinidade do filme de pó fluxante solidificado, b) Cristalinidade do filme com a temperatura de cristalização e c) Cristalinidade do filme com a basicidade binária (Oliveira *et al.*, 2011).

3.2.5 Absorção de inclusões

Um aspecto de grande importância do pó fluxante é a absorção de inclusões não metálicas durante o processo de lingotamento contínuo. É notório que as inclusões tendem a flotar ao longo do processo de lingotamento e o molde é a última oportunidade de se removê-las do aço líquido. Assim, não somente as condições de escoamento do molde devem favorecer a flutuação das inclusões, mas também a camada líquida de pó fluxante deve absorver e fixar essas inclusões.

Nesse sentido, o pó fluxante terá suas propriedades modificadas durante o lingotamento, em função das reações químicas com o aço líquido e pela absorção de inclusões não metálicas. Ele também deve suportar tais modificações sem comprometer suas funções básicas e, conseqüentemente, a qualidade do lingotamento.

A inclusão de alumina (Al_2O_3), por exemplo, tende a aumentar sensivelmente a viscosidade da escória além de tornar a escória mais vítrea, devido ao aumento do grau de polimerização e à necessidade de cátions para o balanço de carga. Portanto, o aumento da Al_2O_3 contida durante a seqüência de lingotamento pode resultar na formação de escórias vítreas até o final da seqüência de lingotamento.

As inclusões de alumina são mais tipicamente observadas, entretanto pode ocorrer a formação de outros tipos de óxidos, que devem ser também conhecidos e mapeados para cada seqüência de lingotamento.

A taxa de absorção de alumina é determinada pela basicidade da escória. Nakato *et al.* (1991) utilizaram um índice de basicidade, Bi, para determinar a taxa de absorção. Este índice é definido conforme equação (3.5).

$$Bi = \frac{1,53\% CaO + 1,51\% MgO + 1,94\% Li_2O + 1,53\% CaF_2}{1,48\% SiO_2 + 0,10\% Al_2O_3} \quad (3.5)$$

Sob o ponto de vista de redução do nível de inclusões, um pó com maior Bi é desejável, mas deve-se levar em consideração que um aumento do teor de alumina na escória acarreta um aumento de sua viscosidade, prejudicando a lubrificação e tendo como consequência um aumento da incidência de agarramento e rompimento de pele (“*Breakout*”).

3.3 Parâmetros de Processo que Afetam o Desempenho dos Pós Fluxantes

Do ponto de vista do processo, conforme mencionado, o pó fluxante deve ser adicionado à superfície do molde, fundir e formar uma camada de escória líquida adequada e infiltrar na interface placa/molde.

As taxas de fusão, a viscosidade e a cristalização, são as propriedades do pó fluxante que devem estar adequadas. Todavia, essas propriedades devem agir de forma simultânea, ou seja, se uma das propriedades for alterada, o resultado para o processo de lingotamento contínuo pode ser catastrófico.

Entretanto, as condições de processo podem favorecer uma dada propriedade e prejudicar outra. Assim, as características do processo são fatores indispensáveis para a correta seleção e aplicação dos pós fluxantes.

Do ponto de vista da fusão do pó fluxante, todo parâmetro que afeta o fluxo de calor vertical, ou seja, aquele no sentido do menisco para a camada de pó fluxante “*in natura*” irá afetar o comportamento de fusão do pó fluxante no molde.

Em linhas gerais, meniscos com temperaturas baixas geram grandes problemas para a fusão do pó fluxante. Nesse caso, todas as variáveis que afetam a renovação do menisco, incluindo a temperatura de lingotamento, podem ser relacionadas com a fusão do pó fluxante. Nessa mesma linha de raciocínio, a temperatura está ligada diretamente com a viscosidade dos pós fluxantes e com a capacidade de lubrificação.

Além disso, os pós fluxantes estão em contato direto com o metal líquido e se modificam, não somente pela absorção de inclusões, mas também pelo equilíbrio simultâneo que se estabelece com esse contato.

3.3.1 Renovação do menisco

A renovação de aço para o menisco está diretamente ligada ao padrão de escoamento do aço líquido no interior do molde. Normalmente, para o lingotamento contínuo de placas, o perfil desejável de escoamento do aço líquido no molde deve estar na forma de duplo rolo, ou seja, o aço líquido proveniente do distribuidor gera correntes ascendentes e descendentes no molde formando um aspecto também chamado de “asa de borboleta”.

Na figura 3.25 é apresentado o resultado de simulação do perfil de escoamento do aço líquido em um molde retangular no qual se forma um escoamento de duplo rolo.

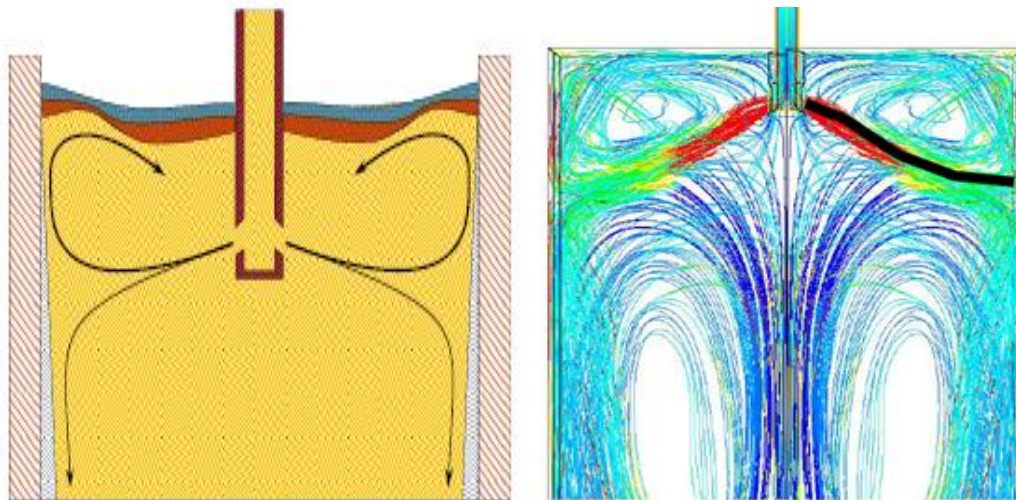


Figura 3.25 – Desenho esquemático do perfil de “duplo rolo” ou “asa de borboleta” (Hibbeler e Thomas, 2013).

O fluxo ascendente é aquele que direciona o aço para o menisco, mantendo sua temperatura mais estável e favorecendo a fusão mais homogênea do pó fluxante. Este perfil é afetado, principalmente, pela vazão de argônio no molde, pela geometria da porta de saída da válvula submersa e pelas condições de lingotamento (largura do molde, velocidade, temperatura).

Conforme Ramirez-Lopez *et al.* (1991), a vazão elevada de argônio na superfície do molde gera uma turbulência excessiva próxima da válvula submersa levando à tendência de mudança do padrão de escoamento de duplo rolo para rolo simples. Com isso pode ocorrer arraste de pó fluxante, gerando danos à qualidade superficial de placas como inclusão de pó (IP), bolhas (BH) e arraste de alumina, gerando inclusões.

Na figura 3.26 são mostrados os defeitos do tipo IP e BH ocorridos em placas devido ao excesso de vazão de argônio no molde.



Figura 3.26 – Fotos dos defeitos em placa: a) Inclusão de pó (IP) e b) bolhas (BH), (Usiminas, 2018).

O aumento do fluxo de aço no menisco pode acelerar a fusão do pó fluxante levando a um excesso de camada de escória líquida em detrimento da camada de pó fluxante “*in natura*”. Essa condição pode desfavorecer o isolamento térmico do menisco ou a geração de excesso de cordão de escória (“*slag rim*”) nas bordas do molde, ocorrendo à interrupção do fluxo de pó fluxante líquido para a interface placa/molde e prejudicando a lubrificação, podendo induzir inclusive à ocorrência de acidentes operacionais denominados rompimento de pele (*Breakout*) (Mills, 2016).

Ao contrário, uma baixa vazão de argônio pode incrementar a aderência de material no interior da válvula submersa (*Clogging*), e com isso pode gerar menor fluxo de aço do distribuidor para o molde devido à obstrução do canal interno da válvula submersa (SEN) e, posteriormente, interromper o sequencial. Além disso, as obstruções podem gerar fluxo assimétrico de aço no molde, induzindo a condições instáveis do menisco, conseqüentemente, instabilidade na fusão e na infiltração do pó fluxante nessa região.

Conforme Zhang *et al.* (2007), o modelo (geometria) de válvula submersa também altera o escoamento do aço no molde de forma substancial. Um dos fatores que tem uma enorme relevância é o ângulo da porta de saída da válvula submersa, pois ele faz o direcionamento do fluxo de aço no interior do molde. Um ângulo de saída mais direcionado para a parte inferior do molde faz com que o menisco fique com uma menor agitação, ou seja, um menisco estagnado. Já no fluxo de aço com um direcionamento para o menisco, é observada uma maior agitação do menisco (superfície do aço). Essas características induzem a conseqüências semelhantes às mencionadas anteriormente.

Na figura 3.27 é mostrado como é relevante a influência do ângulo da porta de saída (ângulo entre -25° a 5°), da válvula submersa na agitação do menisco.

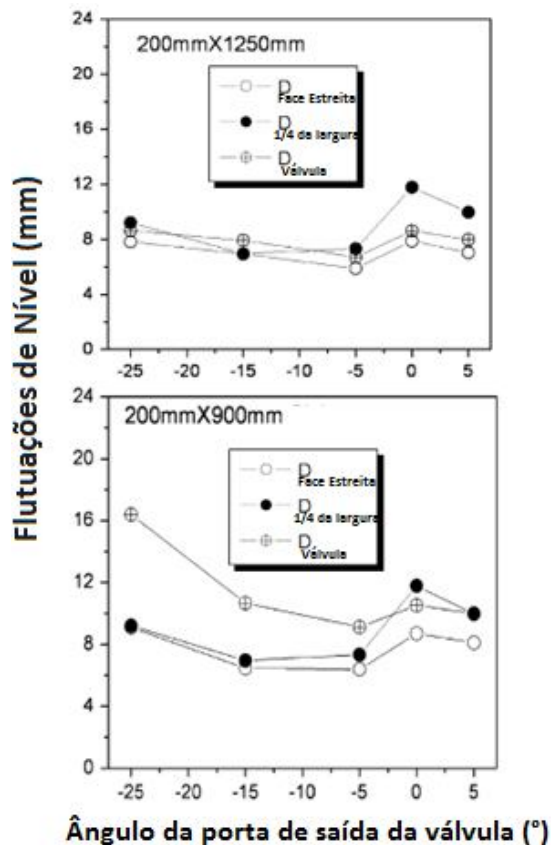


Figura 3.27 – Efeito do ângulo de saída da válvula submersa sobre as flutuações do nível de aço no molde (Zhang *et al.*, 2007).

O controle do nível de aço no molde também é um fator crucial para o correto desempenho do pó fluxante no molde. O controle de nível nada mais é do que manter a posição do menisco a mais estável possível a cada ciclo de oscilação do molde. A mudança na posição do menisco induz a uma maior tendência de formação de cordão de escória (*slag rim*) devido à constante exposição do pó fluxante líquido a diferentes condições (pseudo meniscos). Assim, durante um ciclo de oscilação, a mudança do nível do menisco pode coincidir com a posição do cordão de escória, interrompendo a infiltração de pó fluxante. Nessas condições, não importa se as propriedades do pó fluxante estão ajustadas ou não, ocorrem consequências para a qualidade de placa.

A temperatura do aço influencia diretamente a fusão do pó fluxante, pois é observado durante o lingotamento que ao lingotar um determinado aço com temperatura maior, ocorre a renovação do aço contido no menisco constantemente, e em consequência, uma adequada fusão do pó fluxante. Em contrapartida, o aço com temperatura menor tende a gerar um menisco com menor temperatura e estagnado (parado), provocando uma menor taxa de fusão do pó fluxante *in natura*. Novamente, a viscosidade também será impactada ao reduzir a temperatura do aço, conseqüentemente eleva-se a fricção, porque o atrito aumenta com uma maior viscosidade.

Aços que contêm altos teores de alumínio e manganês apresentam a temperatura *liquidus* menor em comparação com os aços carbono tradicionais. Em consequência, sua temperatura de superaquecimento é menor, e com isso o fluxo de calor vertical não consegue fundir o pó fluxante adequadamente. Conforme Park *et al.* (2007), para solucionar tal problema, foi desenvolvida a tecnologia de alimentação de escória líquida diretamente no molde, com o intuito de fornecer um suprimento constante na superfície do aço. Entretanto, foi observado que com a alimentação da escória líquida, ocorre uma elevação no consumo de pó fluxante.

3.3.2 Interação química do aço com o pó fluxante

Além da absorção de inclusões, a interação com o aço durante o processo de lingotamento pode induzir a trocas químicas e/ou à redução de elementos da escória por outros elementos dissolvidos no aço.

Ao longo do processo de lingotamento, a absorção de inclusões é frequentemente observada. Essas inclusões podem modificar o comportamento das escórias líquidas de pó fluxante quanto às suas características de escoamento (viscosidade) e cristalização, conforme discutido anteriormente. A grande dificuldade é separar a contribuição de compostos cujos teores se elevam na escória pelo efeito das inclusões e pelo efeito das reações químicas. Nesse caso, o conhecimento e experiência operacional são fundamentais.

Alguns aços, principalmente os microligados de alta resistência, possuem elevados teores de elementos tais como Al, Si, Ti e Mn, que podem alterar sistematicamente as propriedades dos pós fluxantes. Assim, durante o desenvolvimento industrial desses tipos de aço, uma abordagem consistente para a seleção de pós fluxantes deve ser considerada.

A título de exemplo, ao longo do desenvolvimento de aços HSLA com alto teor de Ti na Usiminas, observaram-se problemas relacionados à elevada incidência de trincas de borda (chamadas de “TQ”) em placas. Constatou-se que as trincas estavam relacionadas com a elevada profundidade das marcas de oscilação, em comparação a outros aços semelhantes com teores de Ti menores. Experiências industriais mostraram que o elevado teor de Ti nos aços levou a alterações no comportamento do pó fluxante durante o lingotamento. Detectou-se um incremento significativo de TiO_2 na escória líquida de pó fluxante (26% em relação ao aço sem Ti), que culminou na redução da viscosidade. Tendo em vista que os parâmetros de oscilação do molde não foram alterados, então, concluiu-se que a diminuição da viscosidade do pó contribuiu para o incremento da profundidade das marcas de oscilação e, conseqüentemente, para as elevadas ocorrências de trincas de borda, conforme é mostrado na figura 3.28.



Figura 3.28 – Foto do defeito trinca de borda (TQ) correlacionado com a marca de oscilação profunda (Reis *et al.*, 2017).

Para solucionar o problema, foi necessário ajustar as propriedades químicas do pó fluxante, prevendo o incremento de titânio na escória líquida.

Outro caso notório verificado na Usiminas foi quanto à influência da composição química do aço com alto teor de alumínio (0,5%). Esse aço apresentava um elevado

índice de alarmes do tipo de agarramento no sistema MSD (*mould sticker detection*). Experiências mostraram que o alumínio do aço incorporou na escória líquida do pó fluxante e, em consequência, ocorreu um *pick-up* elevado de alumina no decorrer da série de corridas acompanhadas no teste. Essa incorporação de alumina aumentou a viscosidade do pó, diminuiu a eficiência de lubrificação, e em consequência, aumentou o índice de alarme do tipo “agarramento”. Na figura 3.29 são apresentados os resultados do índice de alarme por agarramento em aços com teores de alumínio distintos.

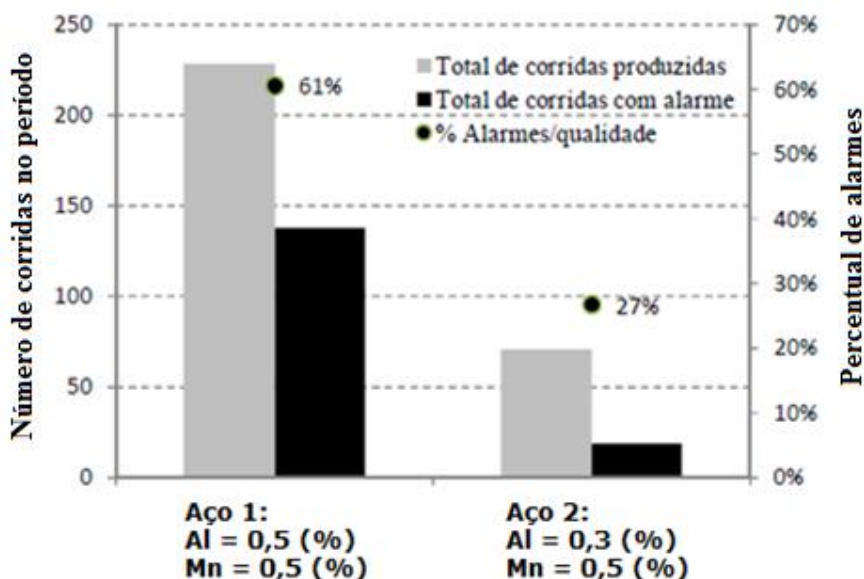


Figura 3.29 – Influência do teor de alumínio com o índice de alarmes do tipo agarramento (Oliveira *et al*, 2011).

Nesse caso, a solução adotada foi reduzir o teor de alumínio do aço e modificar as propriedades químicas do pó fluxante.

Esses são exemplos de problemas vivenciados na Usiminas, que induzem ao entendimento de que o desenvolvimento de pós fluxantes não chegou ao seu limite. Na medida em que os aços e os métodos de lingotamento se desenvolvem, a engenharia de desenvolvimento de pós fluxantes está cada vez aperfeiçoando.

Na busca pela correta adaptação das propriedades dos pós fluxantes aos diversos tipos de aço, algumas regras são seguidas. Na Tabela III.4 são apresentadas as propriedades

tipicamente requeridas para alguns grupos de aços. Observa-se que, no caso da viscosidade, existe um valor adequado para cada comportamento do aço no molde.

Tabela III.4 – Propriedades típicas de pós fluxantes para alguns tipos de aços (Valadares e Bezerra, 2006).

Tipo de aço	Viscosidade Original (Poise a 1300°C)	Viscosidade no Molde (Poise a 1300°C)	Temperatura de Fusão (°C)	Temperatura de Cristalização (°C)
Baixo Carbono	1,0	2,0 a 2,5	1030 a 1070	Tendência a Cristalização Suprimida
Médio Carbono	0,9 a 2,5	2,0 a 2,5	1130 a 1220	1040 a 1180
Ultra- Baixo Carbono	1,5 a 4,0	Próximo ao Original	950 a 1000	Tendência a Cristalização Suprimida

3.4 Consumo de Pó Fluxante

Conforme mencionado nos tópicos anteriores, os pós fluxantes possuem propriedades que devem ser adequadas aos tipos de aços e às características e particularidades do processo. Existem métodos para se caracterizar as propriedades dos pós fluxantes em laboratório, e a transposição dos resultados para a prática industrial é realizada com base na experimentação e na experiência dos fabricantes e usuários do insumo.

Com base nas experiências de processo, o consumo específico de pó fluxante pode ser um meio útil e simples de avaliar o desempenho do pó fluxante no molde, conforme descrito por Wolf (1994).

Em linhas gerais, o consumo pode ser considerado uma medida razoável da infiltração de pó fluxante na interface placa/molde e dar indicações sobre o comportamento de fusão do insumo, conforme menciona Mills (1997). Realizando um balanço de massa simples na região do menisco e na interface placa/molde, é possível definir o consumo de pó fluxante como sendo a massa de pó fluxante que infiltra na interface (pó fluxante

consumido), em relação ao pó fluxante alimentado na superfície livre do veio. Nesse caso, mantendo-se constantes as camadas de pó fluxante (*in natura* e camada líquida de pó fluxante) e as condições de lingotamento, o consumo é a relação entre a infiltração e a velocidade de fusão do pó fluxante.

Na figura 3.30 é apresentado um desenho esquemático para o balanço de massa proposto.

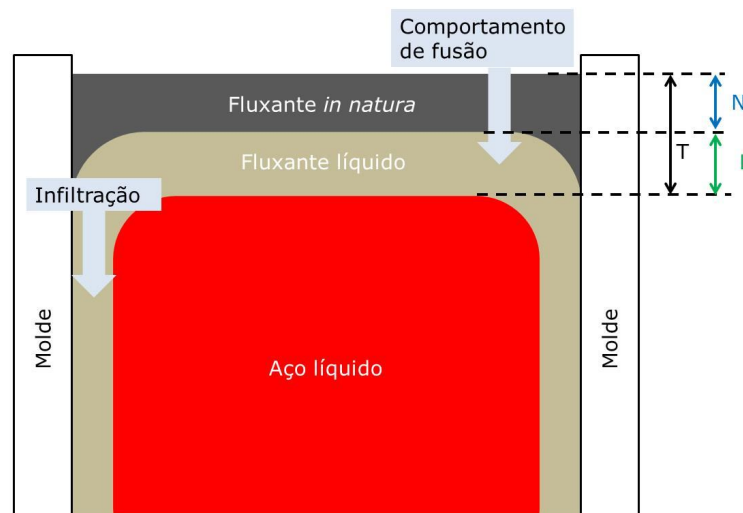


Figura 3.30 – Balanço de massa da infiltração do pó fluxante no molde (Elaborada pelo autor).

Na figura 3.30, a infiltração de escória líquida na interface placa/molde depende das características de oscilação, da velocidade de lingotamento e das propriedades do pó fluxante. Assim, em condição estacionária para um mesmo tipo de aço, não há que se considerar alteração na infiltração de escória, a menos que ocorram alterações na viscosidade do pó fluxante. Já a formação da camada líquida depende da combinação entre a infiltração de pó fluxante na interface e a taxa de fusão do insumo.

Com base nessas premissas, se houver, por exemplo, incremento ou redução na espessura da camada de escória líquida, com todos os outros parâmetros inalterados, dois cenários podem ser propostos, sendo: i) alterações nas características de fusão do pó fluxante ou ii) deficiência de infiltração (viscosidade).

Nesse sentido, a medida do consumo do pó fluxante, associado às medições das espessuras das camadas de pó fluxante no molde, pode ser uma avaliação direta de alterações nas propriedades dos pós fluxantes e uma boa alternativa para a seleção e avaliação desse insumo do ponto de vista de adequação às condições de processo ou influências na qualidade. Entretanto, a figura 3.30 é uma idealização impossível de se obter industrialmente, pois vários parâmetros do processo sofrem alterações ao longo de um sequencial e, conseqüentemente, influenciam no desempenho do pó fluxante em relação ao consumo. Assim, alguns desses aspectos serão abordados.

3.4.1 Definições gerais e efeitos de parâmetros de processo

O consumo de pó fluxante é definido como a quantidade de insumo utilizada ao longo do processo de lingotamento para se produzir uma determinada quantidade de aço em um período de tempo previamente definido. Usualmente, o consumo de pó fluxante pode ser expresso de duas maneiras: em quilogramas por tonelada de aço líquido, geralmente denominado como Q_t [kg/tonelada], ou quilogramas por unidade de área de molde [kg/m^2], geralmente denominada como Q_s .

As equações (3.6) e (3.7) apresentam duas formulações típicas para determinação do consumo específico de pó fluxante, sendo elas em função da área do molde e da massa de aço lingotado, respectivamente.

$$Q_s = \frac{q}{(2(w + t))l} \quad (3.6)$$

$$Q_t = \frac{q}{(7,6wt)l} \quad (3.7)$$

Nas equações (3.6) e (3.7), Q_s é o consumo específico por unidade de área [kg/m^2], Q_t é o consumo específico em quilogramas por tonelada de aço líquido [kg/t], q é a quantidade de fluxante utilizado (kg), w é a largura do molde (m), t é espessura do molde (m), $7,6$ é a densidade do aço líquido (t/m^3) e l é o comprimento do molde (m).

Conforme Mills *et al.* (2017), Wolf (1994), Neumann (1997) e Larson (1986), o consumo de pó fluxante diminui com aumentos da velocidade de lingotamento, da viscosidade do pó, da frequência de oscilação, do tempo de estripamento positivo e da conicidade do molde, e com reduções na temperatura de solidificação do pó fluxante, do comprimento do curso de oscilação e do superaquecimento do aço líquido no distribuidor.

No que diz respeito à velocidade de lingotamento, Mills e Dacker (2017) propuseram a relação modificada ($Q_s = 0.55/\eta^{0.5} \cdot V_c$) para avaliar o efeito da velocidade de lingotamento. A equação (3.8) pode ser reescrita e apresentada na forma da equação (3.9).

$$F_1 = A\eta (V_m - V_c) \rho_1 / Q_s \quad (3.8)$$

$$F_1 = A(V_m - V_c) \rho_1 \eta^{0.5} V_c / 0.55 \quad (3.9)$$

Nas equações (3.8) e (3.9) F_1 é a força de atrito, A é a área do molde (m^2), V_m é a velocidade do molde (a velocidade do molde varia, ocorre momento em que o molde sobe e momento em que o molde desce e em consequência a força de atrito é alterada), expressa em (m/min ou m/s), V_c a velocidade de lingotamento (m/min), ρ_1 a densidade do pó (kg/m^3), η a viscosidade da escória (dPas) e Q_s o consumo de pó fluxante (kg/m^2).

Com base nas equações (3.8) e (3.9), é possível dizer que ao aumentar a velocidade de lingotamento e a viscosidade, ocorrerá uma redução do consumo de pó.

Tsutsumi *et al.* (1999), Tsutsumi *et al.* (1998), Kwon *et al.* (1991), Itoyama (2001), Ogibayashi *et al.* (1987) e Saraswat (2004) relataram que com a *break temperature* ocorre a mesma situação, ou seja, ao aumentar a *break temperature* ocorrerá uma redução no consumo de pó. Na figura 3.31 é mostrada essa relação, em que ocorre uma redução do consumo de pó ao elevar a T_{br} , que representa a *Break Temperature*.

Ao reduzir a temperatura de solidificação do fluxante, ocorre o aumento da espessura do filme líquido, em consequência tem-se um escoamento melhor, sem comprometer a

espessura do gap. Então, o consumo de pó fluxante líquido entre a placa/molde tende a aumentar com a menor temperatura de solidificação.

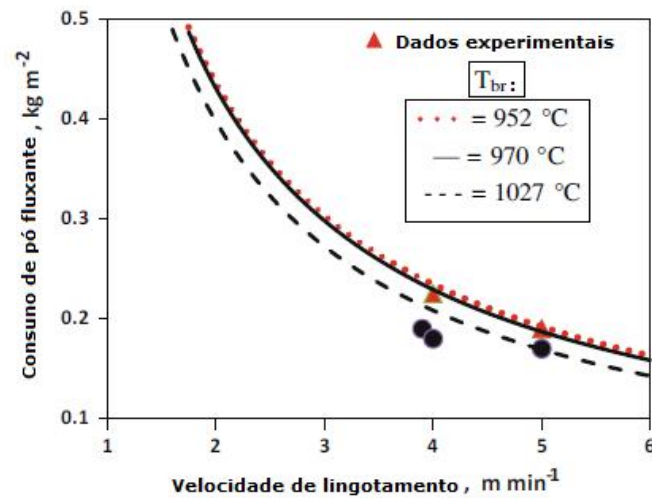


Figura 3.31 – Influência da *Break temperature* (T_{br}) no consumo de pó fluxante (Wolf, 1994).

O efeito da velocidade de lingotamento também pode ser visualizado na figura 3.32. Os dados foram coletados na empresa Dillinger Hütte para velocidades de lingotamento variando entre 0,25 a 0,65 m/min.

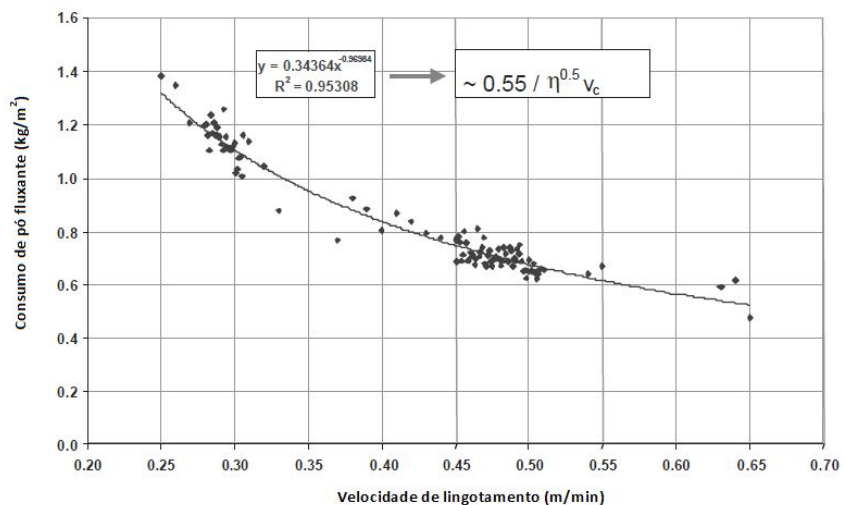


Figura 3.32 – Consumo de pó fluxante em função da velocidade de lingotamento (Normanton *et al.*, 2004).

Como pode ser visto na equação 3.10, ao aumentar a área do molde é observado que a força de atrito entre o molde e o veio também aumenta; conseqüentemente, há um consumo maior de pó fluxante. As dimensões do molde têm uma influência direta sobre o consumo de pó. Assim, quanto menor a espessura da placa menor será o consumo, pois a pele formada é mais fina devido ao curto tempo de permanência no molde.

$$F_1 = \frac{A\eta (V_m - V_c)}{d_1} \quad (3.10)$$

Sendo d_1 é a espessura do filme de escória líquida (m).

Vários autores (Ramirez-Lopez *et al.* (2011), Saraswat, *et al.* (2004), Itoyama (2001), Ramirez-Lopez *et al.* (2010), Shin *et al.* (2006), Emi *et al.* (1974), Wolf (1994), Kwon *et al.* (1991), Tsutsumi *et al.* (1998) e Suzuki *et al.* (1991)) avaliaram os efeitos dos parâmetros de oscilação no consumo específico de pó fluxante.

São várias variáveis envolvidas, como: velocidade de lingotamento, frequência de oscilação, etc. As conclusões são que os efeitos da oscilação não são representativos quanto à alteração do consumo de pó fluxante; porém alguns autores consideraram que a infiltração de escória ocorre durante o tempo de estripamento negativo (quando o molde está descendo com uma velocidade maior que a pele), resultando em uma pressão maior fornecida pelo cordão de escória descendente e causando um fluxo de escória líquida para a interface placa/molde.

Wolf (1994) realizou testes em várias siderúrgicas, onde mantiveram constantes todas as variáveis de lingotamento (exceto o comprimento do curso de oscilação). Foi concluído que à medida que aumenta o curso de oscilação, o consumo também aumenta. Este efeito tem relação com a variação do tempo de estripamento positivo. Na figura 3.33 são mostradas essas correlações.

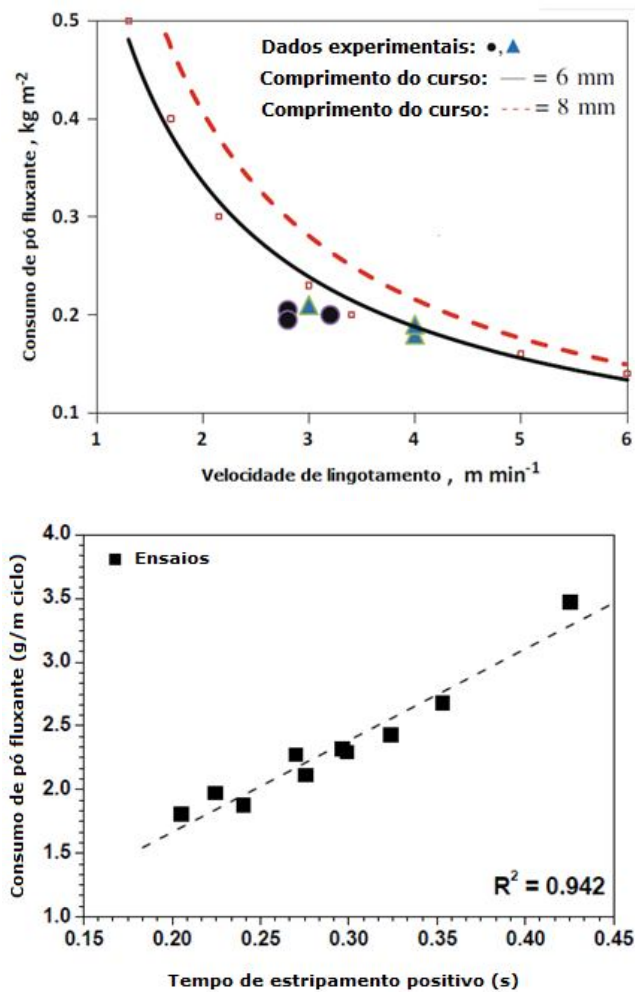


Figura 3.33 – Influência do comprimento do curso de oscilação e tempo de estripamento positivo sobre o consumo de pó fluxante (Shin *et al.* (2006)).

Foi relatado por vários autores, Suzuki *et al.* (1991), Tsutsumi *et al.* (1998), Tsutsumi *et al.* (1999) e Suzuki, *et al.* (1992)) que a oscilação não-sinoidal gera maior consumo de pó fluxante. Na figura 3.34 é mostrado que o uso da oscilação não-sinoidal tende a aumentar em até 10% o consumo de pó fluxante.

Conforme Thomas (2004), o efeito do aumento do curso de oscilação é correlacionado ao aumento no consumo de pó fluxante por unidade de área. Segundo Araki (1999), ocorre maior consumo de fluxante com o aumento do curso de oscilação, e maiores taxas de modificação da curva de oscilação podem favorecer as condições de

lubrificação, devido ao aumento da distância de estripamento negativo. Thomas (2004), apud Kawamoto *et al.*, interpretam alternativamente este efeito devido ao aumento da pressão durante a descida do molde.

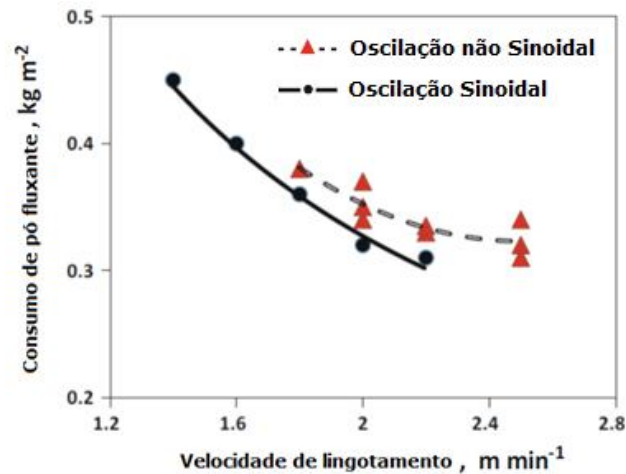


Figura 3.34 – Influência da oscilação não-sinoidal do molde sobre o consumo de pó fluxante (Suzuki *et al.* (1991)).

Mais um fator que influencia o consumo de pó fluxante é a sua temperatura de solidificação, que está associada à espessura do filme líquido na interface placa/molde. Assim, quando a temperatura de solidificação do fluxante é reduzida, a espessura do filme líquido aumenta, favorecendo o escoamento para a interface placa/molde, desde que não ocorra alteração na espessura do *gap*. Assim, o consumo de pó fluxante líquido na interface placa/molde tende a aumentar com a redução da temperatura de solidificação (Martins *et al.* (2016)).

Conforme Mills e Däcker (2017), podem ocorrer anormalidades (defeitos de qualidade, eventos operacionais) provenientes do consumo inadequado de pó fluxante, tais como:

- Trincas longitudinais (Emi *et al.* (1974));
- Rompimento de pele por agarramento (associado a uma pele fina e lubrificação fraca);
- Marcas de oscilação profundas (Fukuda *et al.* (1997));
- Trincas transversais (Ogibayashi *et al.* (1995));
- Trincas de quina (Thomas *et al.* (1996) e Meng e Thomas (2003));

- Formação de defeitos tipo depressões (controle de nível de aço com variação excessiva, onde ocorre a captação da borda da escória e o corte da infiltração da escória líquida) (Jenkins (1995) e Kim *et al.* (1995)).

3.4.2 Regras empíricas para calcular o consumo de pó

Vários autores têm buscado propor regras empíricas para calcular o consumo de pó fluxante. Estas regras são normalmente propostas utilizando dados operacionais de consumo associados aos dados de processo. Mills e Däcker (2017) apresentam uma coletânea de métodos empíricos para determinação do consumo de pó fluxante. No anexo I são apresentadas as equações propostas por estes pesquisadores.

Analisando as diversas equações empíricas apresentadas, verifica-se comumente a introdução do efeito da frequência de oscilação, do tempo de estripamento negativo, do curso de oscilação, do tempo de estripamento positivo, da velocidade de lingotamento e de propriedades da escória de fluxante na equações.

Com base na coletânea apresentada por Mills e Däcker (2017), verifica-se que na maioria das equações empíricas o consumo de pó fluxante é inversamente proporcional à velocidade de lingotamento e à sua viscosidade. No que diz respeito ao efeito dos parâmetros de oscilação não há consenso, existem informações divergentes com a afirmação de que uma maior frequência de oscilação irá diminuir o consumo de pó fluxante, por exemplo.

3.4.3 Métodos para medição do consumo específico

Conforme mostrado nas equações (3.6) e (3.7), não é muito complexo determinar o consumo de pó fluxante no processo de lingotamento contínuo. Basta, inicialmente, o conhecimento da quantidade [kg] de pó fluxante adicionado no molde e as dimensões ou quantidade [t] de aço lingotado. Entretanto, apesar de simples, não é comum medir o consumo durante o processo industrial.

Conforme Mills e Däcker (2017), na indústria o consumo de pó fluxante é normalmente determinado pelo número de pacotes do insumo consumidos em função de uma quantidade específica de aço lingotado. Entretanto, a prática pode variar de empresa para empresa, principalmente do ponto de vista de frequência na avaliação.

Conforme descrito pela *European Commission* (Normanton *et al.*, 2004), nas máquinas de lingotamento da Corus UK em Teesside e Scunthorpe, o consumo de pó é medido diretamente pela contagem do número de pacotes de 10 kg usados ao longo do processo. Não é uma prática frequente, ou seja, o consumo de pó não é medido diariamente. O controle do consumo nessas empresas é realizado conforme níveis de entrega e estoque para o ano.

A empresa Dillinger Hütte desenvolveu um sistema para medir o consumo de pó diretamente no veio, combinando o sistema de alimentação automática de pó com um dispositivo de pesagem e um banco de dados de processo para armazenar os dados operacionais.

Na Usiminas, a prática atual é realizar a medição do consumo de pó fluxante mensalmente por meio do controle de estoque. A quantidade de pó fluxante requisitado e usado posteriormente pela área operacional é dividida pela produção total de placas no período da requisição. Ocorrem casos onde é realizada a medição por meio da contagem de pacotes de 10 kg ou de baldes com pó fluxante. Esta prática somente é realizada em testes com um novo pó fluxante ou quando é observada alguma anormalidade em algum tipo de pó fluxante específico, em que é necessária a realização de ajustes na composição química por parte do fornecedor. Posteriormente, novos lotes de fluxante são testados para uma possível homologação, caso os testes fiquem dentro dos limites exigidos pela Usiminas.

Com o advento e implementação sistemática das máquinas de alimentação automática de pó fluxante, é possível buscar alternativas mais consistentes para a medição do consumo de pó fluxante no veio. Entretanto, apesar de existirem diferentes tipos de máquinas de adição automática, apenas algumas máquinas disponíveis já dispõem de medidores em tempo real da quantidade de pó fluxante adicionado ao molde. Todavia,

ainda é necessária a realização de integração desses dados ao processo para relacionar o consumo de pó fluxante ao volume de aço produzido.

Conforme Normanton *et al.* (2004), tem sido usado um método para avaliar o consumo de pó em vários locais no molde. A técnica divide o molde em seções usando divisórias e a frequência de fornecimento de pó a cada seção. Por meio desse método consegue-se concluir que o consumo é maior nos cantos do molde. Essa é uma área problemática para a qualidade de placas, pois ocorrem fortes marcas de oscilação e trincas de canto. Outra região problemática é próxima à válvula submersa, que é propícia ao surgimento de trinca longitudinal.

A adição de pó fluxante no molde pode ser feita de duas maneiras: em modo automático, através de máquinas com garfos de adição, ou manualmente (funcionário adiciona o pó na superfície do aço através de rodos). A adição manual não deve afetar o consumo, pois há homogeneidade de distribuição dos grãos do pó fluxante e não é observada degradação no tamanho dos grãos (quebras dos grãos). Já na adição em modo automático pode ocorrer uma degradação dos grãos (grãos muito finos) durante o transporte do pó fluxante desde a saída da máquina de adição até o molde. Com isso, é observada uma dispersão de pó (poeira de pó) quando ele entra em contato com o ar atmosférico.

A degradação do pó pode alterar suas características de fusão, reduzindo sua densidade aparente. Além disso, a geração de finos e poeiras pode provocar perdas de materiais que não são adicionados ao molde, além de tornar o ambiente insalubre.

Assim, apesar da adição automática ser uma tendência atual para o lingotamento contínuo moderno, os pós fluxantes devem possuir grãos suficientemente resistentes para os processos de degradação que as máquinas de adição impõem a ele.

3.5 Considerações finais

Ao longo da revisão bibliográfica, buscou-se mostrar não somente a importância do pó fluxante para o processo de lingotamento contínuo, mas também a complexa relação

que esse insumo tem com a qualidade de placas ou de material acabado (após laminado).

Em resumo, o objetivo final do processo de lingotamento contínuo é produzir placas com custo e qualidade que atendam aos requisitos de aplicação do aço. Existe um compromisso entre as características esperadas do pó fluxante, que definem suas propriedades, e as interações com o processo, que torna complexa a análise deste insumo.

Em linhas gerais, as características esperadas para o pó fluxante estão na interface do projeto do insumo (constituição e definição de propriedades) e das características do processo. Entretanto, as propriedades do pó fluxante podem ser afetadas pelo processo e vice-versa, induzindo a resultados inesperados.

Neste contexto, entender de maneira sistemática os efeitos dos parâmetros do processo e suas interações com as propriedades dos pós fluxantes, pode trazer um diferencial de qualidade para o processo de lingotamento contínuo. Uma maneira para buscar esse conhecimento é estimar o consumo de pó fluxante durante o processo de lingotamento.

Na figura 3.35 é mostrado um fluxograma onde é possível observar o quanto o consumo de pó fluxante é importante para o processo e para o ajuste do insumo. Além disso, na figura tenta-se mostrar a complexidade e a interação entre os parâmetros que se pretende estudar.

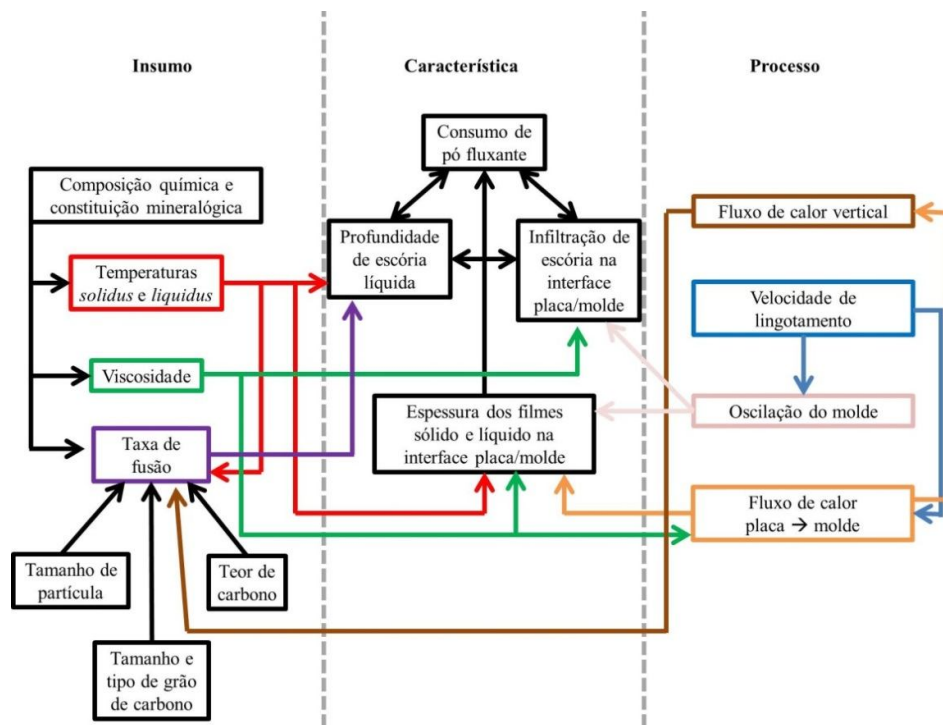


Figura 3.35 – Relação entre características do pó fluxante (insumo), parâmetros do processo e comportamento esperado no molde.

A complexidade apresentada na figura 3.35 é apenas um dos aspectos que se verificam no contexto operacional da indústria atualmente. Os desafios para o desenvolvimento de novos aços ou de novas tecnologias passam pela não compreensão das diversas interações que o processo apresenta. Muitas vezes se desenvolve um determinado tipo de aço ou busca-se maior produtividade para o processo através do aumento da velocidade de lingotamento, por exemplo. Entretanto, todo este caminho passa pelo desenvolvimento e aprimoramento dos insumos utilizados no processo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados encontrados nas análises dos fluxantes amostrados nas medições de consumo específico realizadas na área. Será descrito também o sistema desenvolvido para avaliar os consumos de pós fluxantes.

O presente trabalho quantificou o consumo específico dos pós fluxantes no processo de lingotamento contínuo com o intuito de estabelecer correlações para a seleção e avaliação desse insumo. Foi investigada também a sensibilidade do consumo de pós fluxantes à variação de parâmetros de processo (largura de placa, velocidade de lingotamento, temperatura de solidificação, viscosidade do pó fluxante), buscando relações de causa e efeito com eventos que possam induzir aos desvios de qualidade superficial.

Devido ao elevado número de qualidades de aços produzidos na Usiminas, o presente trabalho abrangeu apenas aços ultrabaixo teor de carbono (UBC), que contém o teor de carbono de 0 a 0,01% e baixo teor de carbono (BC), entre 0,02% a 0,07% e seus respectivos pós fluxantes de dois fornecedores. Desta forma, foi investigado o consumo de quatro tipos diferentes de pós fluxantes de dois fornecedores distintos.

Para realização do estudo foi desenvolvido um método para medição do consumo de pó fluxante em tempo real (durante o lingotamento). Foram realizados experimentos industriais para acompanhamento do consumo e caracterização laboratorial das propriedades dos pós fluxantes. As etapas e métodos seguidos nesse trabalho são descritos com maior detalhamento nos tópicos a seguir. O fluxograma apresentado na figura 4.1 mostra um esquema das etapas desenvolvidas.

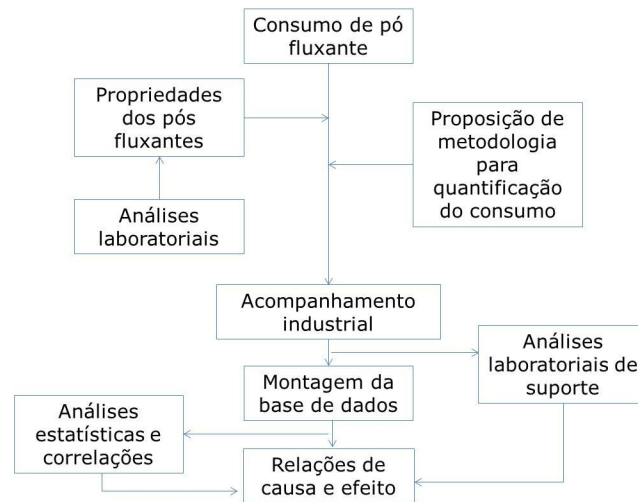


Figura 4.1 – Síntese das etapas para as atividades desenvolvidas.

4.1 Determinação das Propriedades Físico-química dos Pós fluxantes

Conforme mencionado na revisão bibliográfica, as propriedades dos pós fluxantes são importantes para seu desempenho no molde durante o processo de lingotamento contínuo. Assim, os pós fluxantes desse estudo foram amostrados e caracterizados quanto a composição química, as fases presentes, via difração de raios X, a distribuição granulométrica e densidade aparente, as características do comportamento de fusão, a viscosidade e a temperatura de cristalização.

Além das amostras de pó *in natura*, foram coletadas amostras de escórias do pó fluxante fundido no molde e avaliadas as possíveis alterações de composição química e de propriedades ao longo do processo de lingotamento.

As informações de propriedades dos pós fluxantes foram incluídas no banco de dados de análise de processo para possibilitar o entendimento do desempenho do insumo em relação às condições industriais.

Os pós fluxantes foram identificados quanto à sua aplicação e fornecimento, sendo: i) B e C, referentes aos pós fluxantes para aplicação em aços ultrabaixo carbono de dois fornecedores, ii) A e D, referentes aos pós fluxantes para aplicação em aços baixo carbono, dos mesmos fornecedores dos fluxnates de B e D.

4.1.1 Análise química

Para a análise química dos pós fluxantes, alguns métodos analíticos foram utilizados. Para análise do teor de carbono total dos pós fluxantes foi utilizada a técnica de fusão e absorção por infravermelho via equipamento LECO CR412. A determinação dos teores de flúor foi realizada pela técnica de cromatografia iônica. Os demais compostos foram analisados, na forma de óxido, via técnica de fluorescência de raios X, equipamento S8 Tiger, as análises químicas foram realizadas no laboratório de química analítica do centro de pesquisa da Usiminas..

4.1.2 Análise térmica diferencial (ATD)

A Análise Térmica diferencial (ATD) foi realizada em Termobalança Netzsch. A técnica foi utilizada para avaliar o comportamento no aquecimento e resfriamento, para o pó fluxante *in natura*.

Os pós fluxantes *in natura* foram analisados para avaliação da sua decomposição ao longo do aquecimento, por meio da utilização de um cromatógrafo acoplado à termobalança. Foram monitoradas as massas referentes ao dióxido de carbono (CO₂) e água ao longo do aquecimento da amostra. As variações de temperatura associadas ao monitoramento da massa ao longo do aquecimento da amostra auxiliaram no entendimento da decomposição do carbono e carbonatos, além da determinação da temperatura de fusão dos pós fluxantes.

Para avaliar o comportamento no aquecimento foram utilizadas 150 mg de amostra de pó fluxante *in natura* e uma taxa de aquecimento de 10°C/min, em cadinho de alumina, até temperatura de 1300°C. O ambiente do forno foi composto por ar sintético (80% de N₂ e 20% de O₂).

Durante o resfriamento foi avaliada a tendência de cristalização dos pós fluxantes pela observação da ocorrência de picos característicos. A taxa de resfriamento foi de 10°C/min após um tempo de 5 minutos de estabilização de temperatura em um patamar de 1300°C.

4.1.3 Difração de Raios X

Inicialmente os pós fluxantes amostrados foram encaminhados para análise por difração de raios X (DRX) com o objetivo de avaliar as diferenças mineralógicas das matérias-primas entre os diferentes pós fluxantes. Essas análises preliminares foram apenas para a compreensão da formulação de cada tipo de pó utilizado no estudo. O resultado da constituição mineralógica foi analisado em conjunto com os resultados de composição química e de análise térmica diferencial (ATD).

4.1.4 Determinação da Viscosidade

Na prática, grandes dificuldades são encontradas na medida da viscosidade de escória em virtude da presença ocasional de sólidos. Outros erros estão associados à ausência de padrões para o procedimento de calibração. De acordo com Mills (2000), os dados de viscosidade são propensos a enormes erros, de modo que a comparação interlaboratorial indica que as medidas de viscosidade de um dado fluxante variam na faixa de 50% quando comparados com os valores esperados. Segundo esse autor, os erros experimentais globais estão na faixa de $\pm 25\%$.

Devido ao alto custo do teste de viscosidade e sua complexa execução, é comum o uso de equações empíricas, ao invés de viscosímetros, para prever o comportamento da viscosidade dos pós fluxantes levando em conta sua composição química.

Alguns modelos são amplamente divulgados na literatura e vários fornecedores desse insumo os consideram para avaliar a viscosidade. O problema maior com relação à utilização dos modelos matemáticos é que estes não levam em consideração a estrutura cristalina das matérias-primas e sim a formulação na forma de óxidos, o que pode induzir a erros.

O ensaio é feito com o posicionamento do tijolo refratário na base do forno, ficando inclinado com um ângulo de 15 graus, servindo de apoio para as navículas. Em sequência o forno é aquecido até a temperatura de 1300°C. Posteriormente posiciona-se

o gabarito dentro da navícula, de maneira que o pó fluxante ocupe um volume que represente 1/4 do seu espaço útil.

A próxima etapa é manter as navículas dentro do forno por um período especificado (1, 3 e 5 min.). Para finalizar, são retiradas as navículas do forno e deixa-se resfriar até a temperatura ambiente, a figura 4.2 apresenta o ensaio.

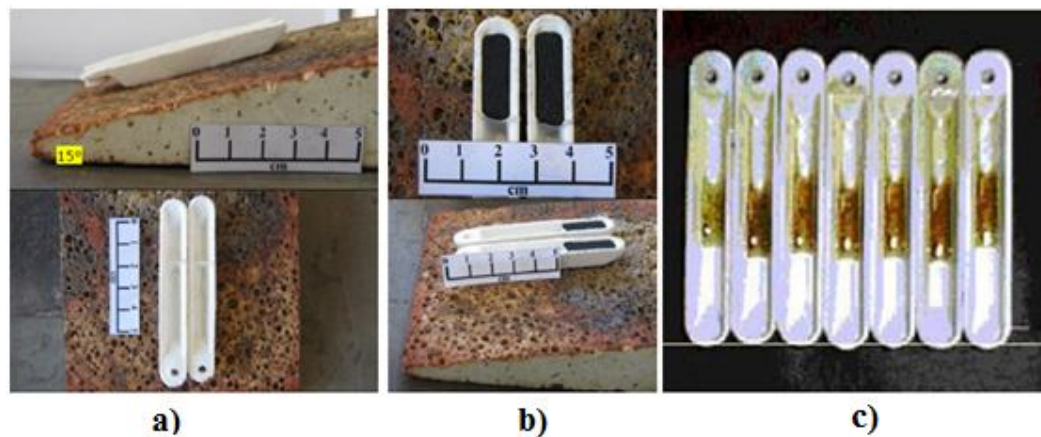


Figura 4.2 – Ensaio de navícula inclinada. a) Navículas com o ângulo de inclinação de 15°, b) Navículas com ¼ de seu volume preenchidas com pó fluxante e c) Navículas após o aquecimento a 1300 °C e teste de escoamento inclinado.

A avaliação da viscosidade do pó fluxante fundido no teste de navículas é indireta e feita em função do comprimento de escoamento obtido no ensaio de navícula. O teste é sempre comparativo, ou seja, duas amostras são ensaiadas de forma simultânea. Assim, se houver diferenças significativas de viscosidade, a distância percorrida apresentará diferenças. A amostra que possuir menor viscosidade apresentará maior comprimento percorrido pelo líquido.

Os testes físicos foram comparados aos resultados de viscosidade obtidos via modelos matemáticos. Os modelos que foram utilizados são aqueles apresentados na tabela III.2 da revisão bibliográfica. Os modelos foram implementados em planilha eletrônica e os resultados de composição química dos pós fluxantes foram utilizados para o cálculo de sua viscosidade.

Os modelos matemáticos para previsão da viscosidade foram aplicados também para avaliação da viscosidade das escórias de pó fluxante retiradas ao longo dos experimentos industriais. Tal informação trouxe conhecimento a cerca da influência da alteração de composição química na viscosidade do pó fluxante, ao longo do sequencial de lingotamento.

4.2 Metodologia para determinação do consumo

Para medir o consumo de pó fluxante foi proposta uma metodologia que permite o monitoramento em tempo real durante o processo de lingotamento contínuo. A proposta foi construir um dispositivo para avaliar a variação da massa do pó fluxante enquanto ele é adicionado automaticamente ao molde.

O dispositivo foi construído e acoplado na parte inferior da estrutura do silo que fica ao lado do veio, onde são armazenados os *Big Bags* de pó fluxante que são utilizados durante a operação. Na figura 4.3 é apresentado o protótipo do sistema desenvolvido. O sistema transmitiu o valor da variação de massa do pó fluxante para um sistema de aquisição de dados. Estes dados foram armazenados e analisados em conjunto com os dados de produção, posteriormente.

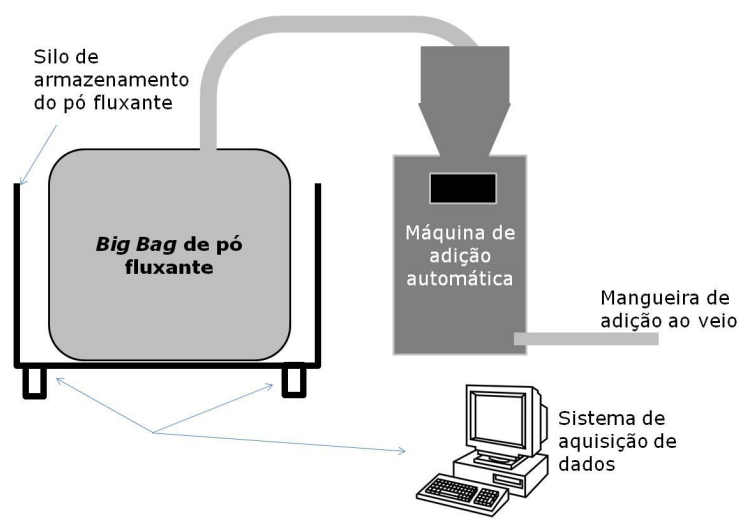


Figura 4.3 – Protótipo do sistema para o monitoramento do consumo de pó fluxante.

4.3 Experimentos Industriais

Foram realizados acompanhamentos industriais visando medição do consumo específico de pó fluxante. Nos acompanhamentos foi realizada amostragem do pó *in natura* no molde no início e fim de série e feita medição de camada de escória líquida do pó fluxante.

Os parâmetros de oscilação do molde foram mantidos constantes, e os parâmetros de processo (velocidade de lingotamento, temperatura do aço líquido e variação do nível de aço no molde, etc) foram coletados nos bancos de dados de processo.

Para monitoramento da espessura da camada líquida do pó fluxante no molde foi utilizado um dispositivo de imersão com fio de aço com revestimento de cobre. Esta técnica é atualmente a prática operacional da Usiminas Ipatinga e consiste na imersão do arame perpendicularmente na superfície do pó fluxante no molde. Após um tempo de 3 segundos ocorre à fusão total do arame que entra em contato com o aço líquido. A parte do arame em contato com o pó fluxante cru é totalmente preservada, e a parte em contato com a escória líquida perde apenas o revestimento de cobre. Posteriormente, são verificadas, com uma escala, as espessuras das camadas em análise.

Cada leitura fornece, então, duas informações sobre o pó fluxante no molde, sendo elas a camada de escória líquida e a camada total. A medição aconteceu quando a massa de aço líquido na panela atingiu 50% da capacidade (aproximadamente 80 toneladas). As espessuras medidas foram incluídas no banco de dados para análise conjunta com os dados de consumo do pó fluxante.

4.4 Análise de Dados

Todos os dados obtidos nas etapas laboratoriais e de acompanhamento industrial foram organizados em grandes bancos de dados. Vale ressaltar que os dados do processo de lingotamento são armazenados automaticamente pelos computadores de processo. As informações discretas, tais como, composição química e propriedades dos pós fluxantes e outras, foram alimentadas manualmente no banco de dados.

Foram realizadas análises estatísticas (*Minitab*) para determinar o grau de interação entre as variáveis monitoradas, estabelecendo correlações entre os parâmetros operacionais com o consumo de pó fluxante.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Determinação das propriedades dos pós fluxantes

Os pós fluxantes utilizados em dois tipos específicos de aços na Usiminas foram amostrados na área e analisados conforme a metodologia proposta. Os pós fluxantes em questão são os utilizados em aços Baixo Carbono (BC) e Ultra Baixo Carbono (UBC), de dois fornecedores distintos. Na tabela V.1 são apresentadas as identificações dos fluxantes analisados.

Tabela V.1 – Identificação das amostras de pós fluxantes analisadas.

Código da amostra	Fornecedor	Aplicação
A-1	A	Aços BC
B-1		Aços UBC
C-1	B	Aços UBC
D-1		Aços BC

5.1.1 Análise Química

Os resultados das análises realizadas para determinação da composição química dos pós fluxantes *in natura* são apresentados na tabela V.2.

Tabela V.2 – Resultados de composição química para os pós fluxantes amostrados em % de massa.

Amostra	CaO	SiO ₂	CaO/SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	F ⁻	C	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂
A-1	38,14	38,48	0,99	4,36	4,67	2,38	0,10	8,38	3,14	0,35	
B-1	38,17	36,17	1,06	4,04	4,88	3,96	0,03	7,98	1,85	0,40	2,52
C-1	35,59	37,45	0,95	4,62	4,59	4,19	0,08	7,80	3,39	2,29	
D-1	38,30	37,55	1,02	4,73	3,81	4,54	0,14	7,03	3,22	0,69	

Os pós fluxantes apresentam, no geral, pouca diferença em relação à composição química. A relação CaO/SiO_2 ficou em torno de 1,0, o que indica baixa tendência de cristalização. A maior diferença observada foi para o teor de carbono total da amostra do pó fluxante B-1, que apresenta menor valor que os demais. O carbono é responsável pelo controle da taxa de fusão dos pós fluxantes, o que remete a uma expectativa de maior taxa de fusão para a amostra B-1.

Na tabela V.3 são apresentadas as fases cristalinas identificadas no ensaio de difração de raios X. Na tabela V.3 o símbolo “S” indica a presença da fase na constituição do insumo *in natura*.

Tabela V.3 – Fases minerais identificadas nas amostras de pó fluxante *in natura* por difração de raios X (S = fase presente).

Amostra	CaF ₂	CaSiO ₃	MgO	SiO ₂	CaCO ₃	Ca ₄ Si ₂ O ₇ F ₂	Na(AlSi ₃ O ₈)	Mg(CO ₃)	Mg ₃ (OH) ₂ Si ₄ O ₁₀
A-1	S	S	S	S	S	S	-	-	-
B-1	S	S	-	S	S	-	S		-
C-1	S	S	-	S	S	S	S	S	S
D-1	S	S	-	S	S	S	-	S	-

Conforme tabela V.3, verifica-se que os pós fluxantes possuem como base as fases CaF₂, CaSiO₃, CaCO₃ e SiO₂. Não foram verificadas nas amostras fases cristalinas de carbono. Entretanto, o carbonato de cálcio está presente em todas as amostras. Apenas nos pós fluxantes do fornecedor B (C-1 e D-1) são identificados carbonatos de magnésio.

Observando os espectros da difração de raios X, verifica-se que existe o alargamento do ângulo de varredura (2θ) a aproximadamente 30°, indicando presença de substância amorfa. Nas amostras B-1 e D-1 foram encontrados traços da fase talco (Mg₃(OH)₂Si₄O₁₀) e na amostra C-1 foram encontrados traços de biotita (KMg₂Al₂Si₃O₁₁(OH)). No anexo II são apresentados os espectros de difração de raios X para cada uma das amostras avaliadas.

5.1.2 Análise Térmica Diferencial (ATD)

Para avaliar as reações/características dos pós fluxantes em ciclos de aquecimento e resfriamento foram realizados ensaios de análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (TG).

Nas figuras 5.1 a 5.4 são apresentados os resultados da análise térmica diferencial (ATD) para cada amostra de pó fluxante *in natura* estudada, onde estão representadas no mesmo gráfico as curvas de aquecimento e resfriamento das amostras, indicadas pela linha verde pontilhada. A curva contínua indica a variação de energia ao longo do aquecimento e resfriamento das amostras. Por convenção, as variações com inclinação negativa representam transformações exotérmicas e positivas transformações endotérmicas. A perda de massa está também representada e é lida em percentual de variação em relação à massa inicial da amostra. As curvas em vermelho e azul representam a detecção da massa representativa da água e do dióxido de carbono, respectivamente, nos gases de exaustão.

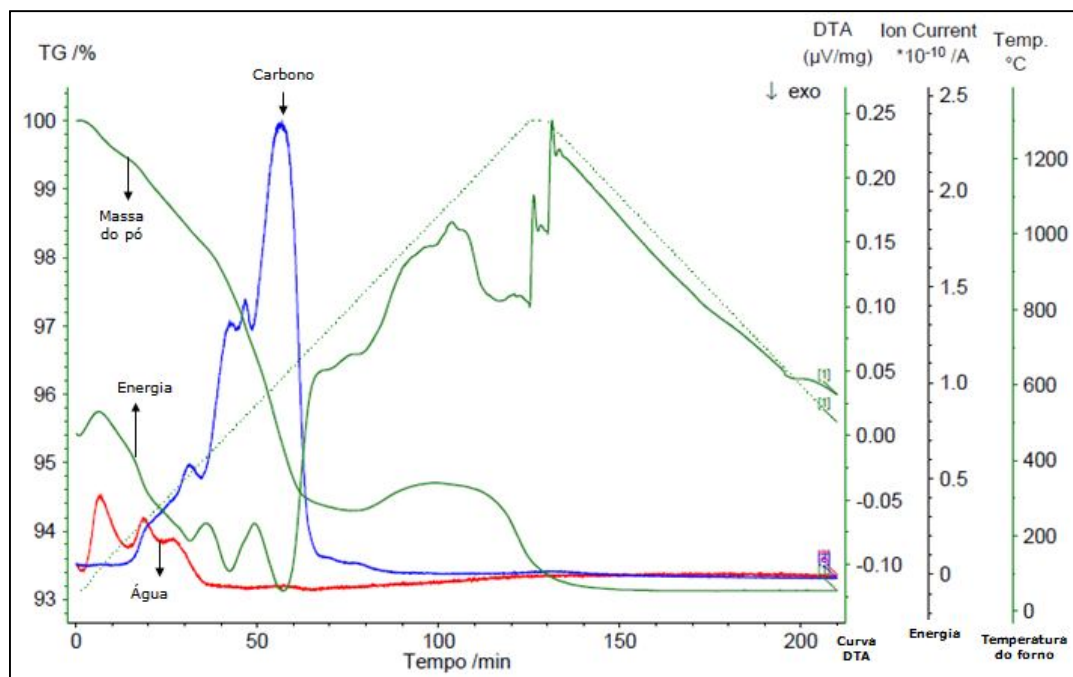


Figura 5.1 – Resultados da análise térmica diferencial do pó A-1.

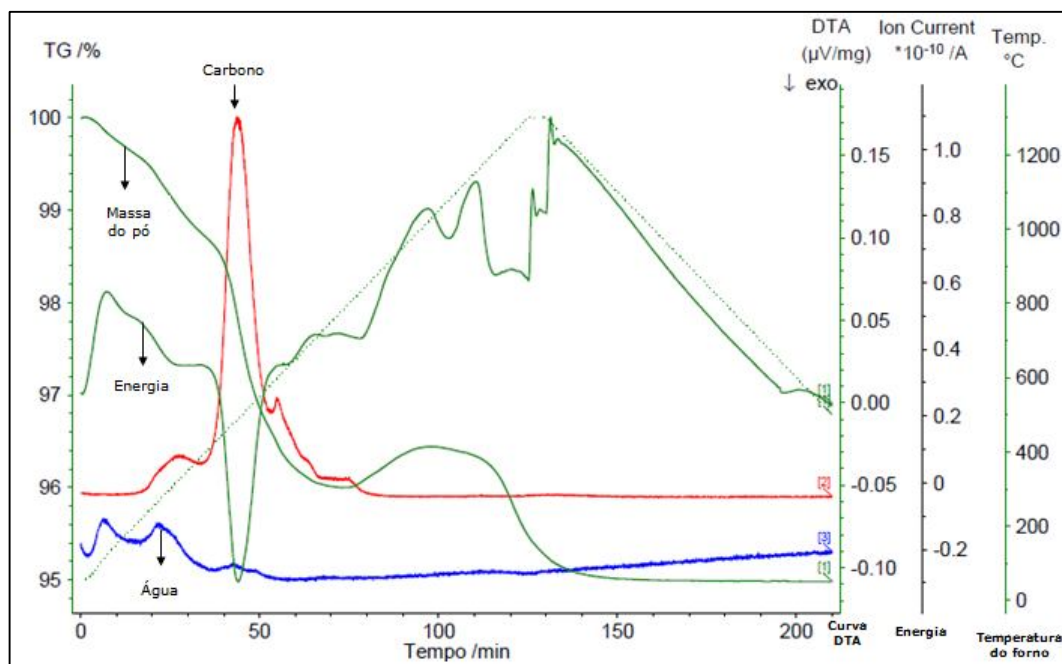


Figura 5.2 – Resultados da análise térmica diferencial do pó B-1.

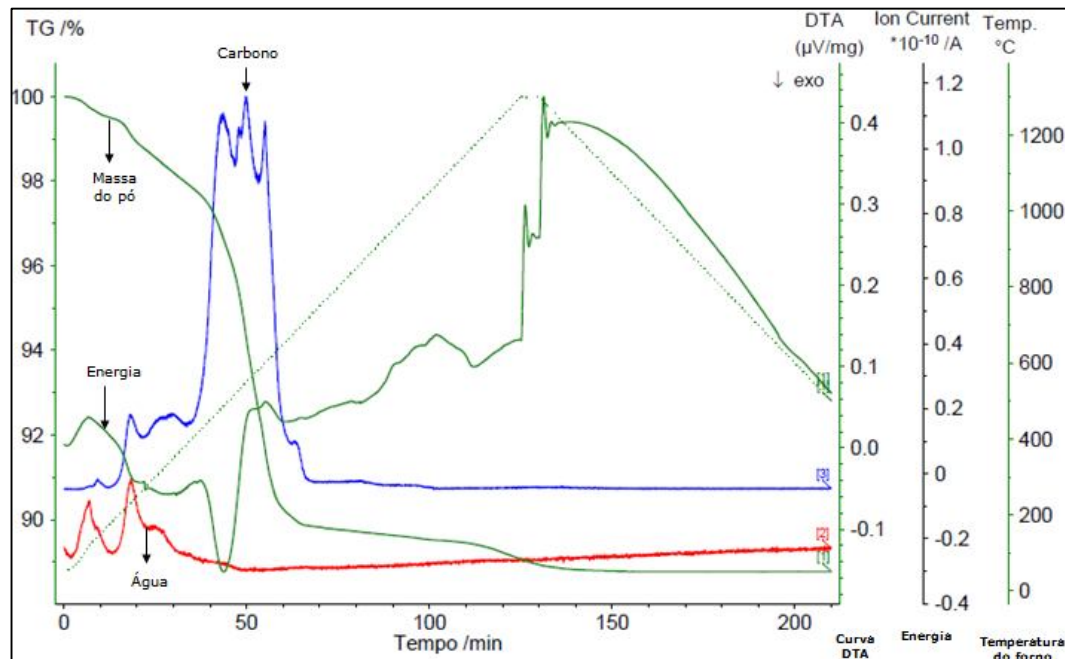


Figura 5.3 – Resultados da análise térmica diferencial do pó C-1.

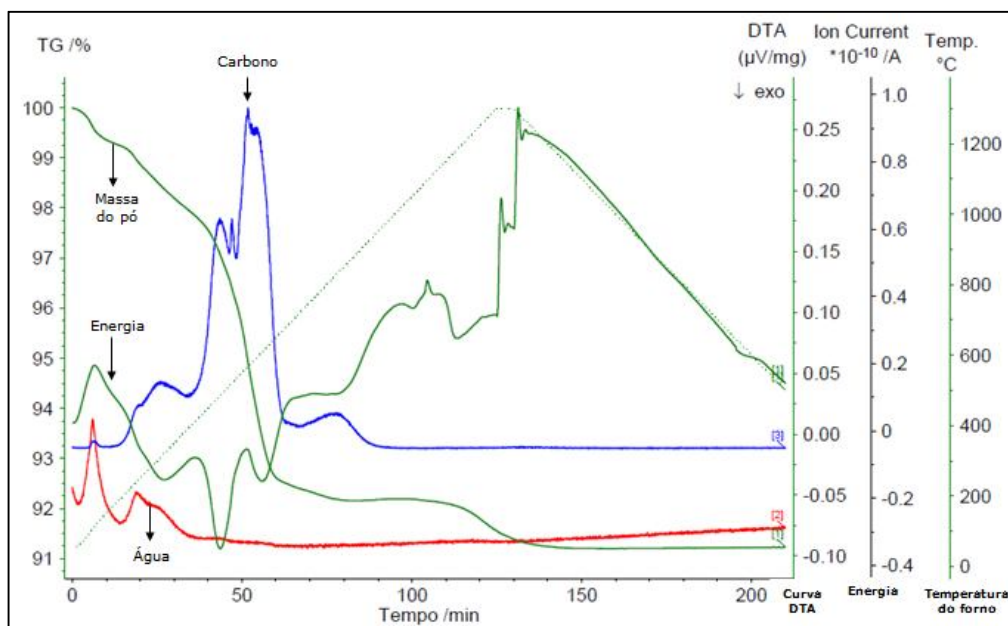


Figura 5.4 – Resultados da análise térmica diferencial do pó D-1.

Com os resultados da ATD várias informações podem ser coletadas. No aquecimento verificam-se as tendências de decomposição e evolução dos gases, e a temperatura de fusão dos insumos. No resfriamento, é possível identificar a tendência de cristalização. Todavia, os resultados devem ser interpretados e respaldados pelas características químicas e mineralógicas de cada insumo.

Com base nos resultados apresentados nas figuras 5.1 a 5.4, verifica-se que os pós fluxantes perderam aproximadamente 7% (A-1), 5% (B-1), 11% (C-1) e 9% (D-1) de massa durante o aquecimento. As reduções de massas estão associadas à perda de água (umidade e de hidratação) e CO_2 . A perda de água representa até 1% do total e ocorre em temperaturas entre 100 e 300°C. Esta perda de água está compatível com a especificação do produto, que permite até 0,5% de umidade máxima. Além disso, a presença de fases hidratadas (contendo OH^-) também foi identificada na difração de raios X, o que corrobora com os resultados. O restante da perda de massa está associado à formação de dióxido de carbono em temperaturas entre 300 e 900°C, relacionadas a picos endotérmicos e exotérmicos. Tais características indicam a queima de carbono e/ou a decomposição dos carbonatos.

A formação de CO₂ associada à variações exotérmicas, em temperaturas na faixa de 300°C a 600°C, indica queima de carbono. Segundo Bezerra *et al.* (2007), o carbono proveniente do coque metalúrgico reage na faixa de temperatura superior à do negro de fumo. Na forma pura, o negro de fumo inicia sua queima perto dos 300°C, enquanto que o coque metalúrgico próximo dos 500°C. Assim, entende-se que as amostras avaliadas possuem uma mistura de negro de fumo e coque metalúrgico. Ou seja, os teores de carbono analisados são, do ponto de vista da ATD, praticamente de carbono livre. A contribuição dos carbonatos é pequena e representando no máximo 1% da perda de massa total.

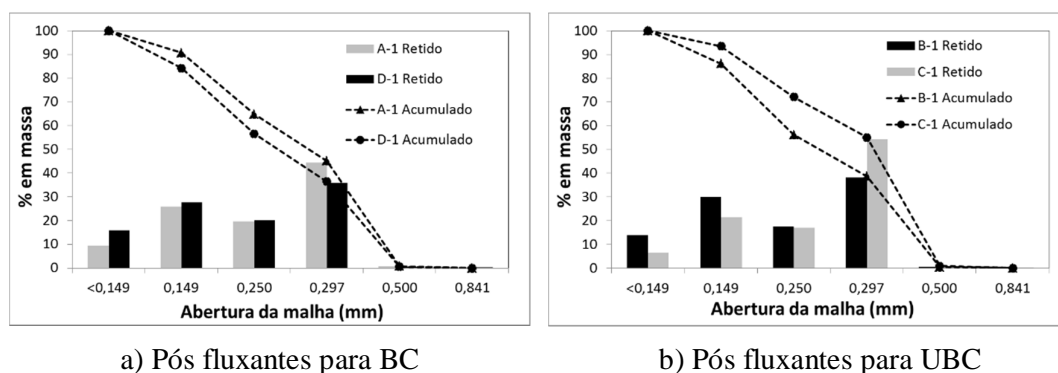
Comparando os resultados de perda de massa e evolução de CO₂ com a composição química das amostras percebe-se uma relação direta. A amostra B-1 apresenta menor perda de massa e menores teores de carbono total.

No aquecimento, verificaram-se também picos endotérmicos associados ao final da fusão dos pós fluxantes. As temperaturas de final de fusão identificadas foram: 1100°C (A-1), 1150°C (B-1), 1090°C (C-1) e 1100°C (D-1). Os valores de final de fusão não apresentam diferenças marcantes quando comparados entre si, principalmente quando se leva em consideração a condição de aplicação no molde, cujas temperaturas atingem cerca de 1530°C. Vale ressaltar que estes valores estão compatíveis com a especificação técnica dos produtos. Entretanto, cabe destacar que a especificação das temperaturas de início e final de fusão é baseada em outro método de medição, o microscópio de aquecimento.

No resfriamento, em nenhuma amostra houve variações de temperatura que identifiquem ocorrência de cristalização (variação exotérmica). Assim, para as taxas de 10°C/min os pós fluxantes não apresentaram comportamento de cristalização. Tendo em vista que as taxas de resfriamento no molde de lingotamento são superiores em relação às utilizadas em laboratório, não há que se mencionar tendências de cristalização dos pós fluxantes em operação. Este resultado está de acordo com as relações CaO/SiO₂ obtidas a partir da análise química.

5.1.3 Análise Granulométrica

As amostras de pó fluxante *in natura* foram avaliadas quanto a sua distribuição granulométrica utilizando as peneiras compatíveis com a seguinte distribuição granulométrica: #20 (0,841mm); #35 (0,500mm); #50 (0,297mm); #60 (0,250mm); #100 (0,149mm) e #100 (<0,149mm). Na figura 5.5 são apresentadas as distribuições granulométricas. Os resultados foram agrupados em função da indicação de aplicação de cada pó fluxante.



a) Pós fluxantes para BC

b) Pós fluxantes para UBC

Figura 5.5 – Distribuição granulométrica das amostras de pó fluxante estudadas.

Com base na figura 5.5, percebe-se que as amostras apresentam distribuição granulométrica equivalente, mesmo sendo produtos diferentes e de dois fornecedores distintos. Os insumos possuem cerca 90% de suas partículas concentradas em tamanhos entre 0,297 e 0,149 mm.

O tamanho de partícula é um parâmetro importante para o isolamento térmico da superfície do aço no menisco, e pode ser melhor representada pela densidade aparente do insumo. Na figura 5.6 são apresentados os resultados de massa específica para cada insumo avaliado.

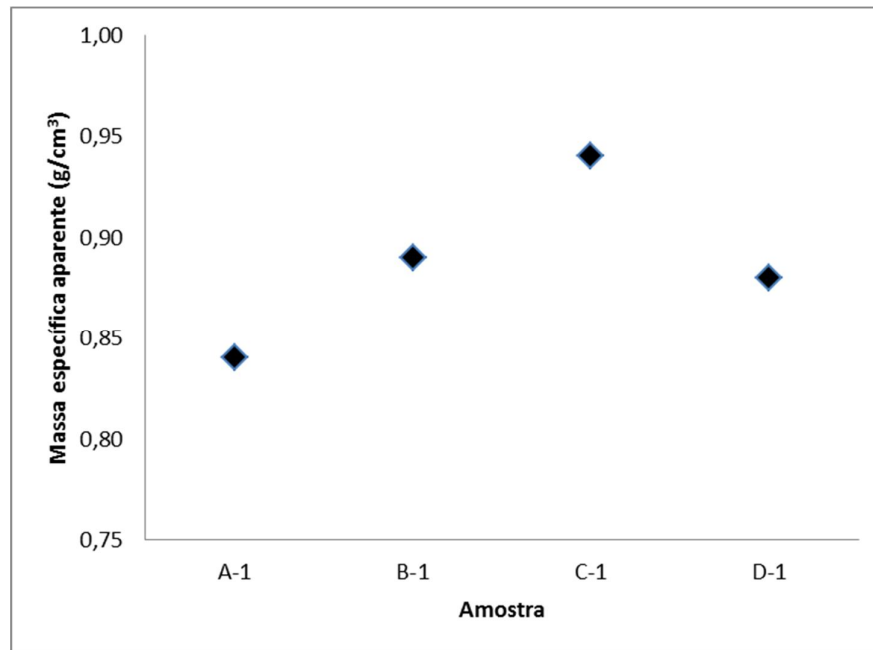


Figura 5.6 – Massa específica dos pós fluxantes *in natura*.

A densidade aparente (ou massa específica) é resultado do empacotamento de uma massa de partículas em um volume previamente definido. Este parâmetro é normalmente chamado de densidade a granel. O que se percebe com os resultados é que os pós fluxantes indicados para uso em aços UBC (B-1 e C-1) possuem densidade aparente ligeiramente superior. Todavia, nenhum insumo apresenta divergência com o especificado.

5.1.4 Estimativa da Viscosidade

Foi utilizado o método indireto de estimativa da viscosidade, através de ensaios de navículas inclinadas.

Na figura 5.7 são apresentados os resultados de ensaio para as amostras avaliadas no estudo. As amostras para a mesma aplicação foram introduzidas no mesmo instante no interior do forno, aquecido a 1300°C e mantidas por 5 minutos.

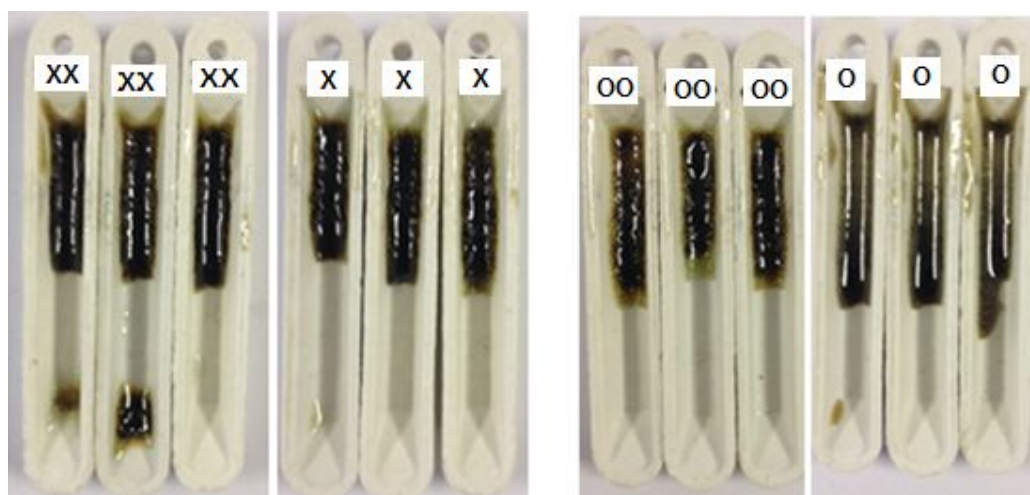
a) **XX** (A-1) e **X** (D-1)b) **OO** (B-1) e **O** (C-1)

Figura 5.7 – Resultados dos ensaios de navículas inclinadas para os pós fluxantes.

Conforme visto na figura 5.7, as amostras referentes aos pós fluxantes utilizados em aços BC dos fornecedores A e B apresentam escoamento semelhante, o que indica equivalência de viscosidade. Em contrapartida, os pós fluxante utilizados em aços UBC do fornecedor A apresentam menor escoamento, logo viscosidade superior.

Visando a comparação dos resultados, utilizaram-se três modelos empíricos para determinar as viscosidades dos pós fluxantes, além do valor especificado. Na tabela V.4 são apresentados os resultados dos cálculos realizados.

Tabela V.4 – Resultado do cálculo de viscosidade e especificações.

Amostra	Viscosidade (Poise)				Pó fluxante
	Zhang	IRSID	Iida	Especificação (IRSID)	
A-1	3,53	2,46	1,14	1,9	Aço BC
B-1	3,11	1,93	1,03	2,2	Aço UBC
C-1	2,6	1,72	0,94	1,9	Aço UBC
D-1	2,63	2,13	0,71	2,0	Aço BC

Percebe-se pela tabela V.4 que existem divergências entre as viscosidades calculadas e as especificadas para todos os insumos. Não há somente diferenças de valores, mas também de relações. Por exemplo, nas especificações dos pós fluxantes utilizados nos aços BC dos dois fornecedores as viscosidades são semelhantes, contudo, os modelos indicam viscosidade mais elevada para amostra A-1 (BC).

Na figura 5.8 são apresentadas as comparações entre as viscosidades especificadas e os resultados do escoamento do pó fluxante na navícula. O escoamento foi quantificado como o percentual de escoamento em relação ao tamanho total da navícula.

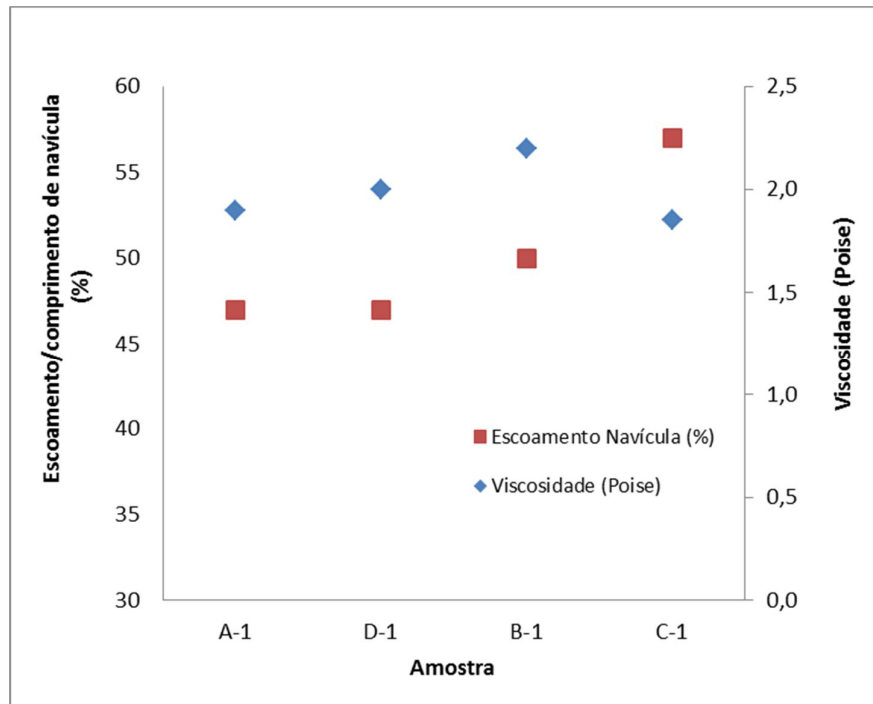


Figura 5.8 – Comparação dos resultados de escoamento de navícula e viscosidades especificada do IRSID.

Com base nos resultados da figura 5.8 percebe-se que os ensaios físicos estão compatíveis com os valores especificados de viscosidade. Entende-se que os pós fluxantes com viscosidades semelhantes apresentam mesmo escoamento e os de menor viscosidade maior escoamento que os demais. Assim, sugere-se uma avaliação dos resultados de composição química, tendo em vista que eles são utilizados nos modelos de viscosidade e/ou uma revisão dos modelos utilizados, visando verificar o motivo das distorções observadas.

5.2 Metodologia para determinação do consumo

5.2.1 Desenvolvimento do sistema de medição de consumo

Para medir o consumo de pó fluxante foi proposta uma metodologia que permite o monitoramento em tempo real durante o processo de lingotamento contínuo.

Optou-se por transformar a estrutura de apoio do *bigbag* em uma balança de medição. Foram instalados quatro extensômetros biaxiais de 350Ω em cada um dos pés de sustentação da estrutura de apoio do *bigbag*. Os extensômetros do tipo biaxial utilizados nesta aplicação são formados por dois sensores uniaxiais em uma mesma lâmina, sendo um sensor no sentido vertical e outro no sentido horizontal, conforme apresentado na figura 5.9, totalizando oito sinais a serem medidos.

A partir dos extensômetros, é obtida a deformação sofrida pela estrutura em função da quantidade de pó fluxante no interior do *bigbag*.

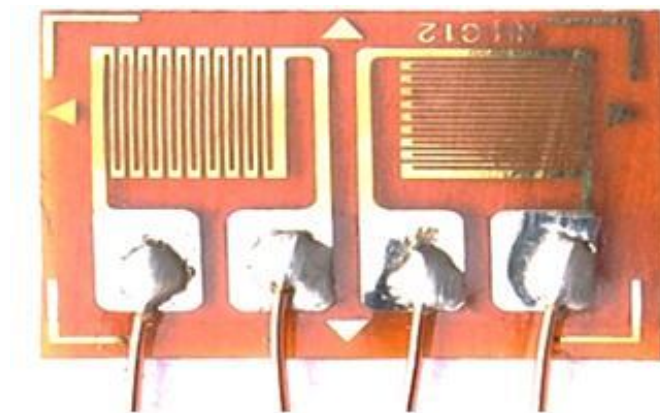


Figura 5.9 – Extensômetro biaxial.

O extensômetro foi acoplado em cada pé da estrutura onde é armazenado o pó fluxante. Na figura 5.10 é apresentado um extensômetro colado em um dos pés da estrutura de apoio.

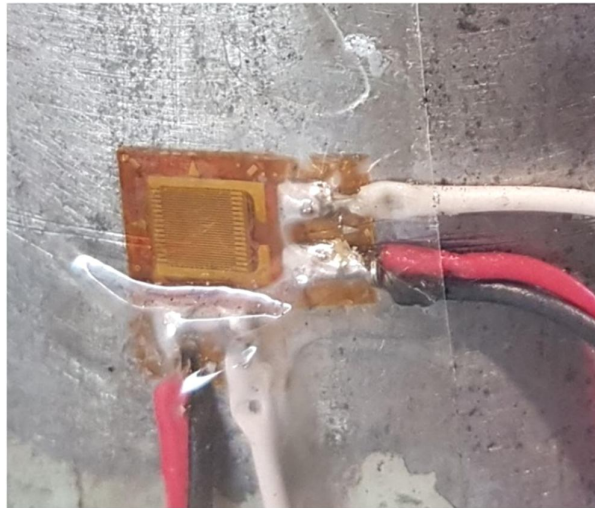


Figura 5.10 – Extensômetro biaxial instalado no pé da estrutura de apoio do pó fluxante.

Para a aquisição dos valores de deformação gerada em cada um dos oito sensores foi utilizado um módulo condicionador de sinal, modelo NI 9236, específico para extensômetros uniaxiais de $350\ \Omega$. Este módulo possui oito canais de entrada, taxa de amostragem de até $10\ \text{kS/s}$, 24 bits de resolução, excitação interna de $3,3\ \text{V}$ e isolamento contra transiente até $1.000\ \text{Vrms}$. Na figura 5.11 é apresentado o módulo NI 9236 e seu respectivo esquema elétrico.

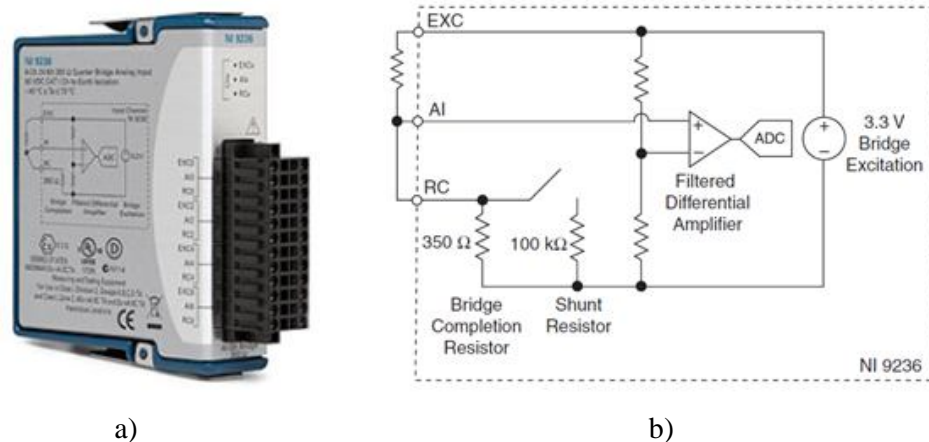


Figura 5.11 – (a) Módulo condicionador de sinal NI 9236 e (b) esquema elétrico.

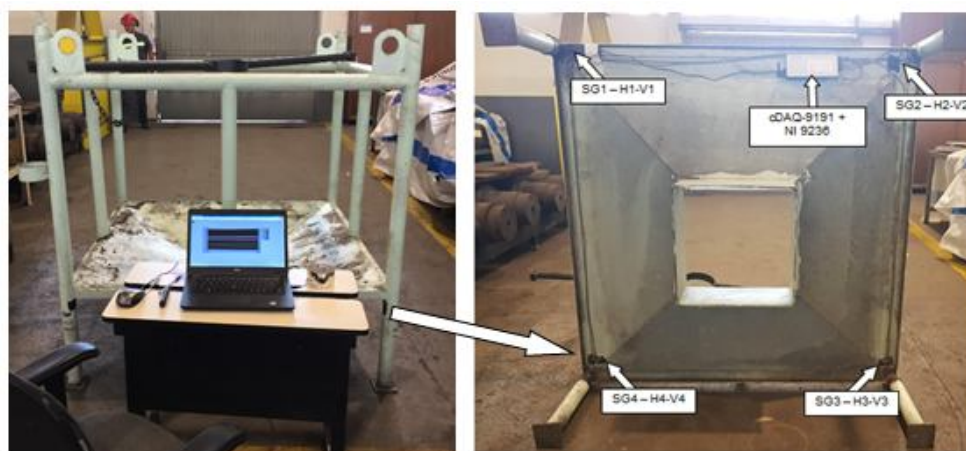
O módulo de condicionamento de sinal é conectado ao rack de aquisição de dados cDAQ 9191, que possui transmissão via Ethernet ou *wireless*. Na medição realizada

para homologação, foi utilizada a transmissão dos dados via Ethernet. A figura 5.12 apresenta esse módulo de transmissão de sinais.



Figura 5.12 – Módulo cDAQ-9191 de transmissão de dados via rede Ethernet ou wireless.

O módulo e todo o sistema de medição foram instalados na face inferior da estrutura de apoio do *bigbag*, como é apresentado na figura 5.13 Cada um dos pés de apoio possui um extensômetro biaxial, sendo que cada extensômetro é identificado com um componente horizontal e outro vertical. Assim, o extensômetro instalado no pé nº 1 (SG1) é composto pelo par H1-V1; no pé nº 2 (SG2), pelo par H2-V2; nº 3 (SG3), H3-V3; e nº 4 (SG4), H4-V4, onde H se refere ao extensômetro horizontal e V ao vertical. Os extensômetros e o módulo cDAQ são alimentados por uma bateria de 12V.



a) Vista frontal

b) Vista do fundo

Figura 5.13 – Sistema de medição instalado na face inferior da estrutura de apoio do *bigbag* com a localização dos extensômetros e do módulo de aquisição dos dados.

Para realizar a aquisição, processamento, apresentação e armazenamento dos dados de deformação foi desenvolvida uma rotina em LabVIEW, específica para esta aplicação. Esta rotina (programa) foi instalada em um *notebook*.

A figura 5.14 apresenta a tela do sistema de aquisição de dados.

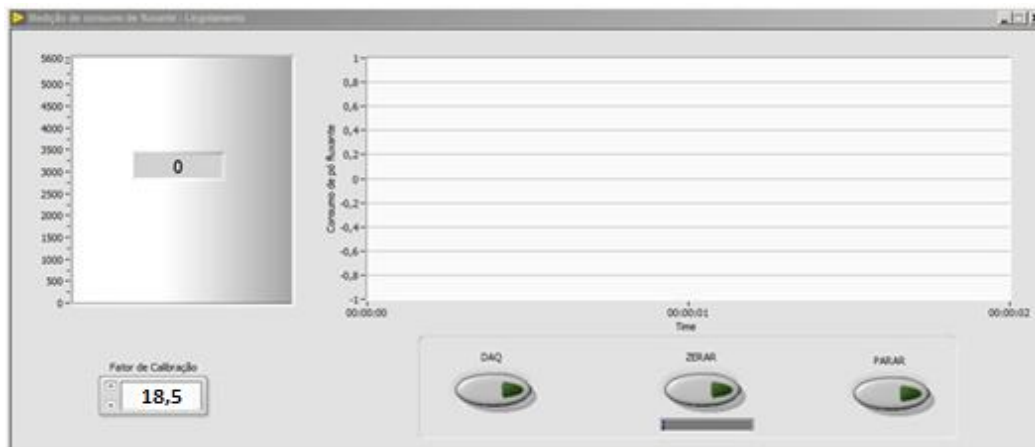


Figura 5.14 – Tela do *software* desenvolvido para aquisição dos dados.

O extensômetro é um componente linear e adimensional, a “unidade” dos extensômetros é *strain*, no qual são: tensão, deformação, distorção. Por ser adimensional, é possível obter peso, aceleração, deslocamento, vibração, temperatura

entre outras unidades a partir deste componente. Contudo, para que isso ocorra é necessário que o extensômetro seja calibrado de acordo com a unidade e a faixa que se deseja.

Se o objetivo é medir a temperatura a partir dele, deve gerar uma curva que correlacione o *strain* com a temperatura, obtendo °C; se o objetivo é medir aceleração, deve gerar uma curva que correlacione o *strain* com a aceleração ou força, obtendo m/s^2 ou Newton e se o objetivo é massa, deve gerar uma curva que correlacione o *strain* com a massa, obtendo kg.

O extensômetro, por ser linear, indica variação que é diretamente proporcional ao valor que se deseja obter, sendo que, para isso, multiplica-se o valor medido de variação do extensômetro pelo fator de calibração a fim de se obter o resultado. Nesse caso em questão, em massa (kg). Deste modo, foi inserido no *software* a possibilidade de ajuste desse fator de calibração a fim de poder corrigi-lo em função da movimentação ou de alterações do suporte do *bigbag* (estrutura).

Ocorrendo alguma variação nessa estrutura, sugere-se a verificação desse valor e o seu ajuste a fim de que se tenha a medida exata de peso de pó fluxante consumido pelo sistema.

O *software* realiza o processamento das informações dos extensômetros e apresenta o gráfico em toneladas consumidas durante o processo. Foi obtido um valor único de medição final, que considera a deformação de todos os extensômetros. Assim, para cada extensômetro (SG1, SG2, SG3 e SG4) é feita a medição da deformação horizontal e vertical. Dessa medição obtém-se a diferença entre elas em valor absoluto ($|H_n - V_n|$) passando a ter quatro valores, um para cada pé de apoio. Esses valores são então somados, obtendo-se um único valor de deformação referente à estrutura. Esse valor é, ao final, multiplicado pelo fator de conversão obtido a partir da calibração do sistema. O valor final representa o peso medido em toneladas de pó removido do *bigbag*. A figura 5.15 apresenta a rotina principal da lógica de programação do software responsável por realizar esse processamento, bem como, a apresentação e armazenamento dos dados em um arquivo compatível com planilha Excel.

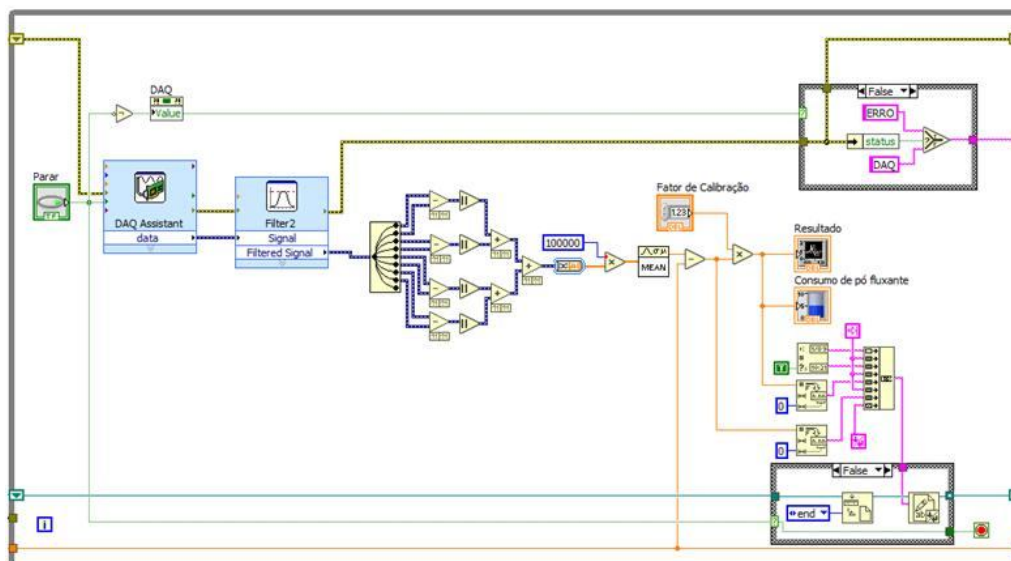


Figura 5.15 – Rotina principal do *software* desenvolvido para apresentação, processamento e armazenamento dos dados.

5.2.2 Avaliação do sistema de medição em bancada

A verificação do comportamento do sistema de medição foi realizada em laboratório, onde foi colocado sobre a estrutura um *bigbag* contendo 500 kg de pó fluxante embalados em pacotes de 10 kg, conforme mostrado na figura 5.16.

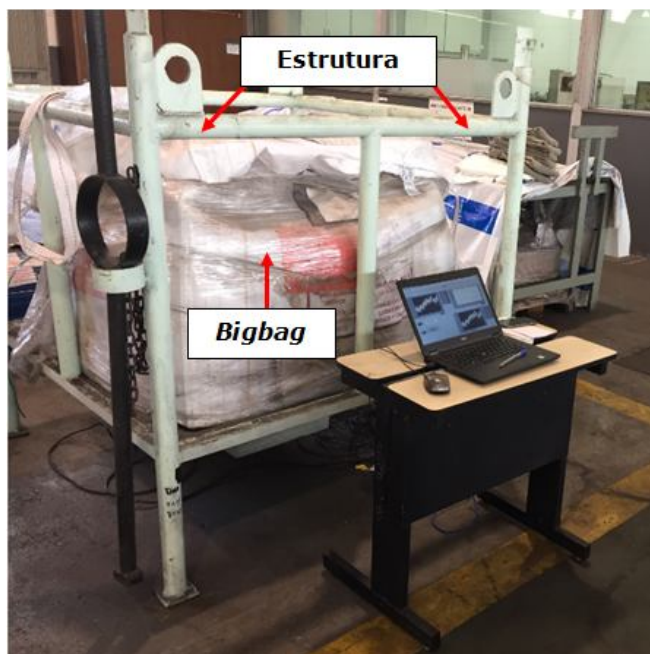


Figura 5.16 – *Bigbag* de pó fluxante posicionado sobre a estrutura para acondicionar o pó fluxante.

Após ter colocado o *bigbag* sobre a estrutura, foram retirados manualmente os pacotes de pó fluxante (contendo 10 kg), que foram colocados sobre uma balança, com intuito em verificar o peso de cada pacote e correlacionar com o valor medido pelo sistema em miliVolt (mV) com o valor em quilograma para cada pacote removido do *bigbag*.

Na figura 5.17 são mostrados os pacotes sobre a balança para conferência dos pesos e o painel da balança (*display*) com o peso encontrado referente aos 10 pacotes de pó fluxante.

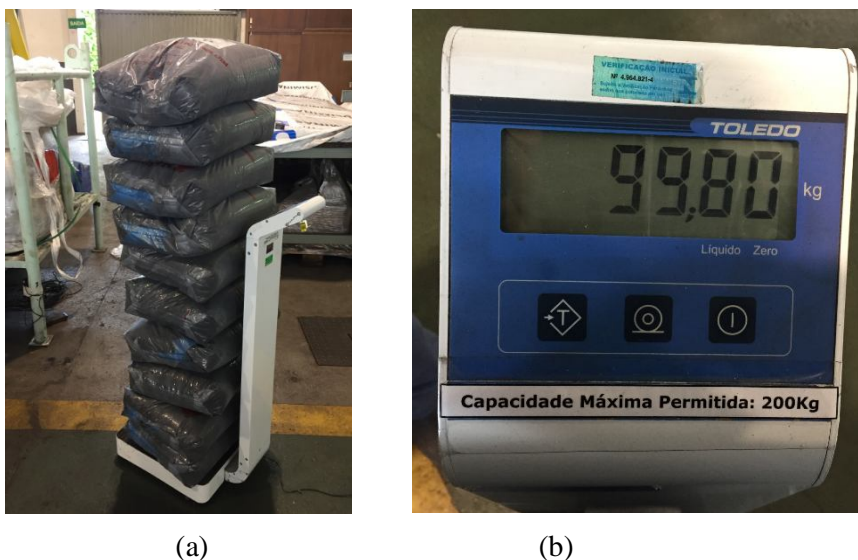


Figura 5.17 – a) Balança com os pacotes de 10 kg de pó fluxante do tipo a granel e (b) peso registrado para os 10 pacotes de pó fluxante.

Após a conferência de peso, realizada no Centro de Pesquisa, o sistema foi enviado para a área do lingotamento contínuo para realizar os testes.

5.3 Tipos de adições de pó fluxante

Há dois tipos de adição de pó fluxante no molde: automática (através de uma máquina) ou manual (através de adição com um rodo pelo operador).

Na adição automática, tem-se uma máquina com um silo acoplado que armazena o pó fluxante. Posteriormente esse é transportado através de uma mangueira até chegar aos garfos de adição, que ficam localizados sobre a superfície do aço no molde. Na figura 5.18 é apresentada a máquina de adição automática de pó fluxante com os respectivos garfos de adição.

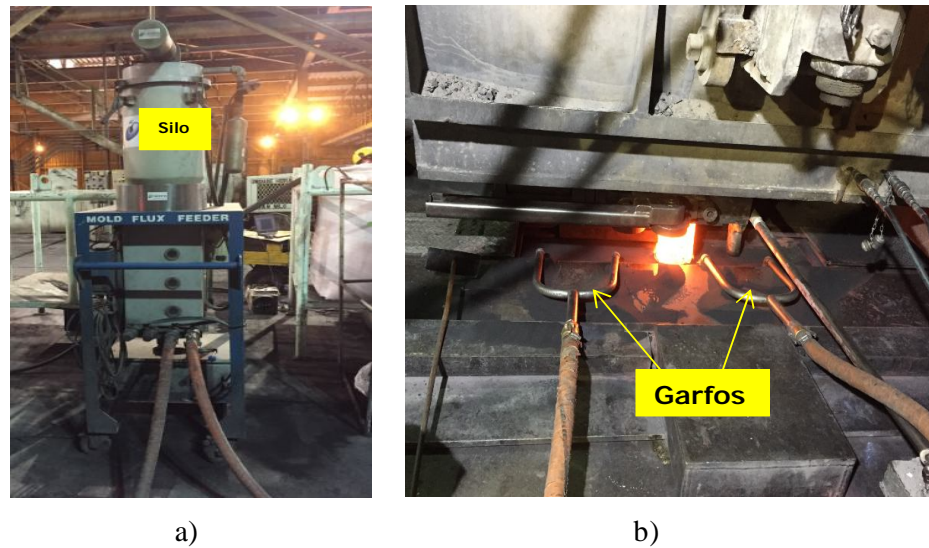


Figura 5.18 – a) Máquina de adição automática de pó fluxante e b) garfos de adição do pó fluxante.

Na adição manual, o pó fluxante é retirado do *bigbag* através de baldes e posteriormente é adicionado sobre uma tampa que fica na região próxima ao molde. O pó fluxante é adicionado à superfície do aço no molde através de um “rodo”. Na figura 5.19 é possível verificar o rodo de adição com o balde contendo pó fluxante.

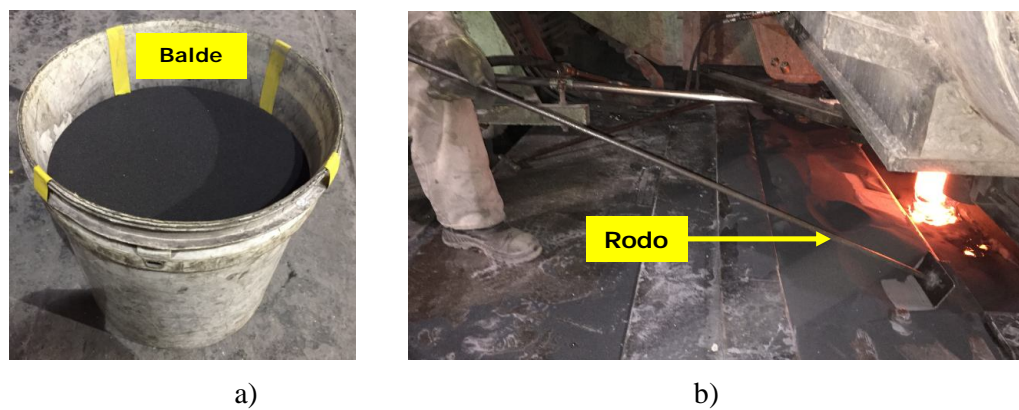


Figura 5.19 – a) Balde contendo o pó fluxante e b) rodo de adição de pó fluxante.

5.4 Calibração do sistema desenvolvido na área

A calibração do sistema de medição de consumo foi realizada com a máquina de adição automática de pó fluxante, que é usada no lingotamento contínuo para adicionar o pó fluxante na superfície do aço. A calibração foi realizada a partir da quantidade de pó que era transportado do silo da máquina até a saída (garfos). Foi então traçada a curva de calibração, onde consegue-se obter a quantidade de pó fluxante utilizado em cada instante. Na figura 5.20 é mostrada a balança portátil que foi posicionada próxima ao veio de lingotamento, com os garfos por onde sai o pó fluxante proveniente da máquina de adição automática e um tambor para armazenar a quantidade de pó que sai pelos garfos. A quantidade injetada foi registrada de 5 em 5 minutos.

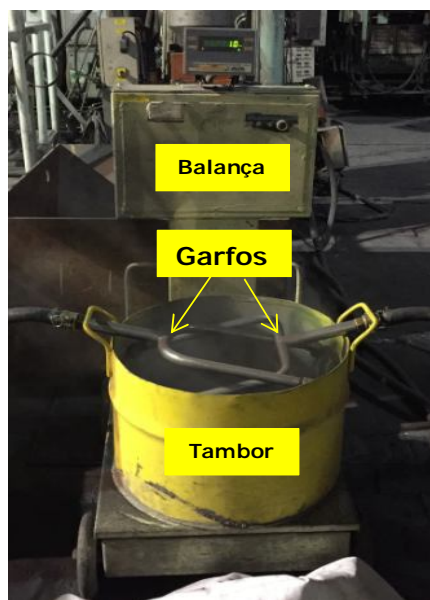


Figura 5.20 – Balança com o pó fluxante e os garfos de adição do pó fluxante.

A quantidade de pó fluxante utilizado para cada instante depende de vários fatores, como: velocidade de lingotamento, área do molde e temperatura do aço. Para o teste foram mantidos fixos esses fatores, para não ocorrerem desvios durante a calibração. Na Figura 5.21 é mostrada a curva obtida pelo sistema durante o procedimento de calibração.

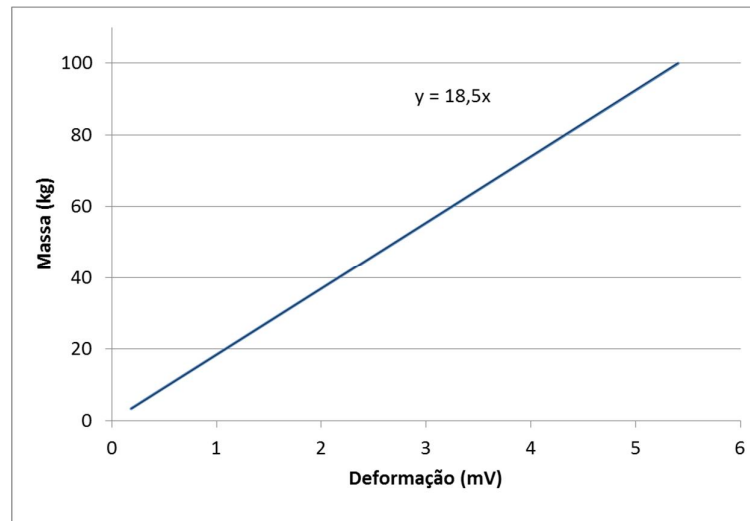


Figura 5.21 – Curva de calibração do sistema, correlacionando o sinal dos extensômetros (mV) com massa de pó fluxante (kg).

Sabendo-se que o extensômetro é um elemento com comportamento linear, foi obtido um fator de calibração igual a 18,5, sendo que cada mV de variação no sinal equivale a 18,5 kg de pó fluxante extraído do *bigbag*.

Então, a partir dos resultados de calibração foi estabelecido em um veio que fosse usado o sistema de injeção de pó fluxante no modo automático e, no outro veio, o sistema de medição manual. A utilização destes dois métodos foi feita com intuito de verificar se haveria ocorrência de desvios entre os métodos.

5.5 Testes feitos para homologação do sistema desenvolvido

A figura 5.22 apresenta a medição sendo realizada na área da Aciaria nº2 da Usiminas durante o processo de lingotamento contínuo do aço. Nessa figura, visualiza-se o notebook utilizado para registro dos dados, uma bateria de 12 V para alimentação do sistema de medição e, conseqüentemente, dos extensômetros, o *bigbag* com pó fluxante apoiado na estrutura e a mangueira de sucção inserida no *bigbag*.

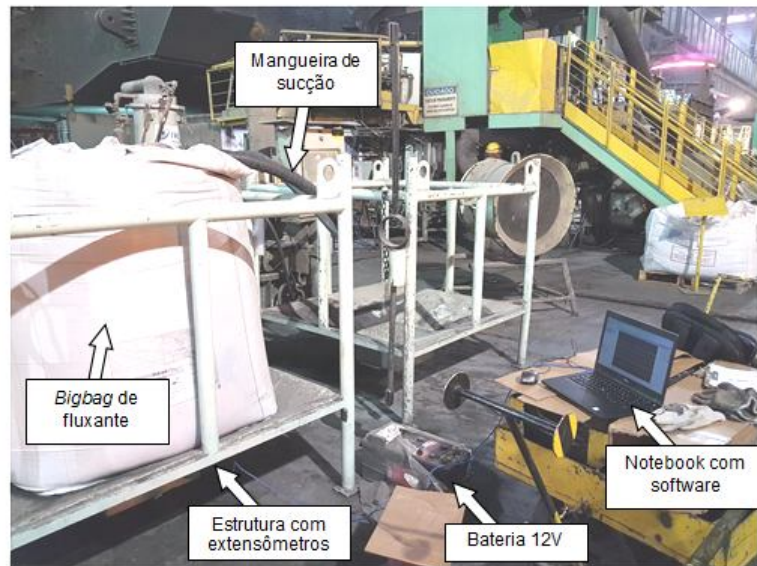


Figura 5.22 – Medição do consumo de pó fluxante durante processo de lingotamento contínuo na Aciaria n°2.

Os resultados obtidos durante os testes de homologação foram efetivos. Na figura 5.23 é apresentado um gráfico de consumo de pó fluxante obtido pelo sistema de medição durante lingotamento contínuo do aço UBC.

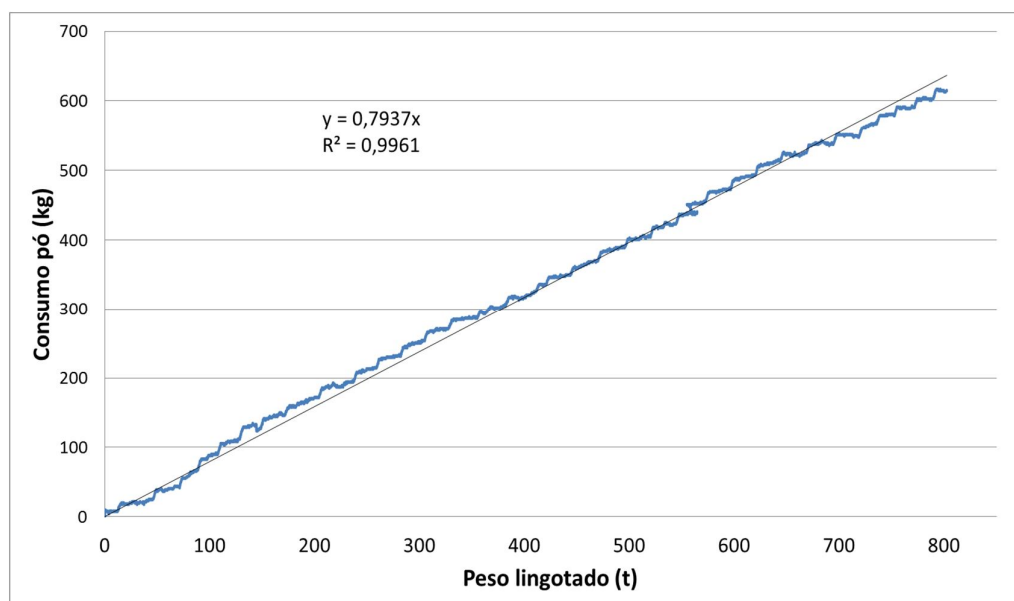


Figura 5.23 – Gráfico de consumo de pó fluxante durante lingotamento contínuo do aço UBC.

Na Figura 5.23 é possível identificar que o consumo específico de pó fluxante durante o teste foi de 0,79 kg/t.

O teste de homologação industrial foi realizado em uma máquina de lingotamento de dois veios, com intuito de comparar os dois métodos. Em um veio o pó foi adicionado manualmente e feita à contagem da quantidade de baldes adicionados e no outro veio o pó fluxante foi adicionado com a máquina de adição automática, no qual estava acoplado o sistema desenvolvido. O teste foi realizado dessa maneira a fim de ser verificado se o consumo específico nos dois veios ficaria com valores próximos, ou se ocorreria diferença relevante, sendo necessária uma nova calibração na máquina. Na Figura 5.24 é apresentada uma segunda medição com o método desenvolvido, onde obteve-se um consumo específico pelo sistema de 0,57 kg/t e pelo sistema tradicional de contagem do número de baldes de 0,58 kg/t.

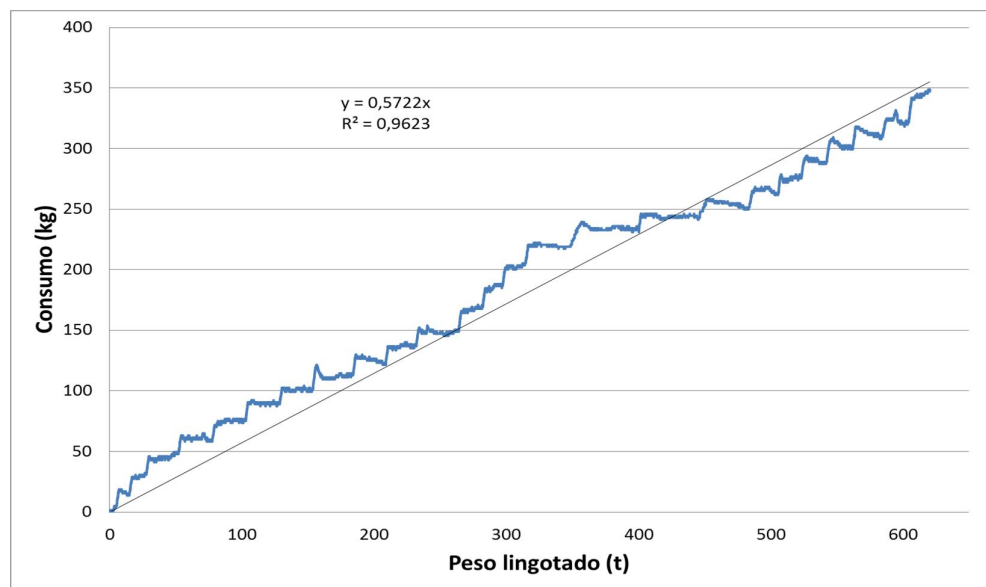


Figura 5.24 – Gráfico de consumo de pó fluxante durante o lingotamento contínuo do aço BC com o sistema desenvolvido.

Os valores de consumo apresentados nas figuras 5.23 e 5.24 são diferentes devido aos testes terem ocorrido com grupos de aços e pós fluxantes distintos.

Após o resultado destes testes de homologação, o sistema ficou disponível para realização de novos testes em escala industrial, onde foram quantificados os consumos específicos e desenvolvidas correlações com eventos que possam levar a desvios de qualidade superficial do produto lingotado.

5.6 Experimentos Industriais

Os testes foram realizados em vários sequenciais de aços produzidos nas máquinas de lingotamento. No decorrer das séries, o sistema foi acoplado em um veio e os sinais obtidos foram enviados para o banco de dados. O sistema de medição faz a leitura somente dos sinais enviados dos extensômetros, que posteriormente são convertidos em massa de pó fluxante consumido (kg). Foi, então, necessário obter informações de processo em outro sistema para correlacionar o pó fluxante consumido com o aço produzido. As informações de processo avaliadas nos testes realizados foram: largura, espessura e comprimento de placa, temperatura de liquidus do aço e velocidade de lingotamento. Esses dados foram coletados a cada segundo e exportados para o mesmo banco de dados no qual o peso de pó fluxante era armazenado. A massa de aço produzido em cada segundo foi determinada por meio de cálculo, conforme equação (5.1).

$$\text{Aço lingotado} = L \times E \times C \times D \quad (5.1)$$

Em que:

L: Largura do molde [m];

E: Espessura do molde [m];

C: Comprimento de placa lingotada a cada segundo [m];

D: Densidade do aço (7,6 t/m³).

A espessura do molde e a densidade do aço para os testes não sofreram alterações. Após o cálculo realizado para obtenção das massas de aço lingotado e de pó consumido, foi necessário inserir essas informações em um único banco de dados, onde se obteve o

consumo específico de pó fluxante, expresso pela razão entre a massa de pó fluxante (kg) e a massa aço lingotado (t).

Na tabela V.5 é apresentado um resumo das 14 séries em que foram realizados os testes de medição de consumo específico utilizando o dispositivo desenvolvido.

Tabela V.5 – Resumo dos 14 testes realizados com variáveis de processo.

Teste	Quantidade de corridas	Tipo pó fluxante	Largura média da placa (m)	Velocidade média (m/min)	Temperatura média do aço (°C)	Aço lingotado (t)	Tempo teste (h)
8	7	B-1	1,700	0,91	1574	422	3:56
2	3	C-1	1,624	0,83	1569	180	1:08
4	5	B-1	1,422	0,89	1563	352	2:57
6	8	B-1	1,280	0,80	1565	354	5:53
5	4	B-1	1,099	0,91	1565	337	2:49
1	3	B-1	1,044	0,87	1561	602	2:23
3	5	A-1	1,694	0,92	1571	232	2:51
7	3	D-1	1,402	0,88	1564	525	2:15
9	6	B-1	1,813	0,86	1567	793	5:09
10	6	C-1	1,690	0,95	1565	950	5:17
11	3	C-1	1,127	0,78	1560	192	2:18
12	5	C-1	1,335	0,79	1560	388	3:25
13	3	B-1	1,534	0,80	1564	215	2:41
14	2	B-1	1,681	0,97	1554	265	0:56

Os testes realizados geraram vários resultados de consumo específico para os pós fluxantes destinados ao lingotamento de aços ultra baixo carbono (UBC) e baixo carbono (BC). Foram 14 testes, sendo 63 corridas totalizando 5.807 toneladas de aço lingotadas e 3545 kg de pó fluxante consumidos.

Na figura 5.25 são mostradas as curvas obtidas nos testes realizados com cada tipo de pó fluxante.

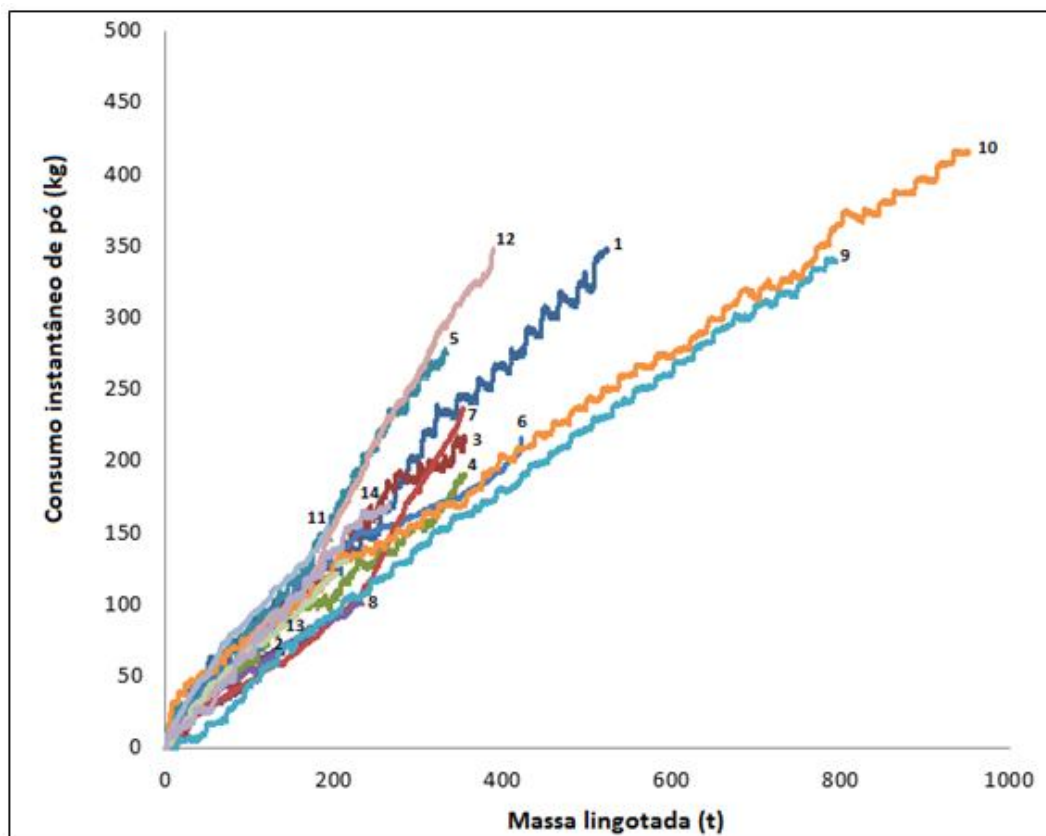


Figura 5.25 – Curvas de consumo específico instantâneo dos pós fluxantes (UBC e BC) com o aço lingotado em vários sequenciais.

Com base na figura 5.25, verifica-se que os vários testes realizados apresentaram respostas distintas em relação ao consumo instantâneo de pó fluxante. Para obtenção do consumo específico [kg/t aço] foi realizado um ajuste linear dos dados. A derivada da equação obtida representa o consumo específico de pó fluxante.

Na figura 5.26 são apresentadas as curvas de ajuste linear, passando pela origem do eixo, para os testes realizados com os fluxantes para aços UBC e BC.

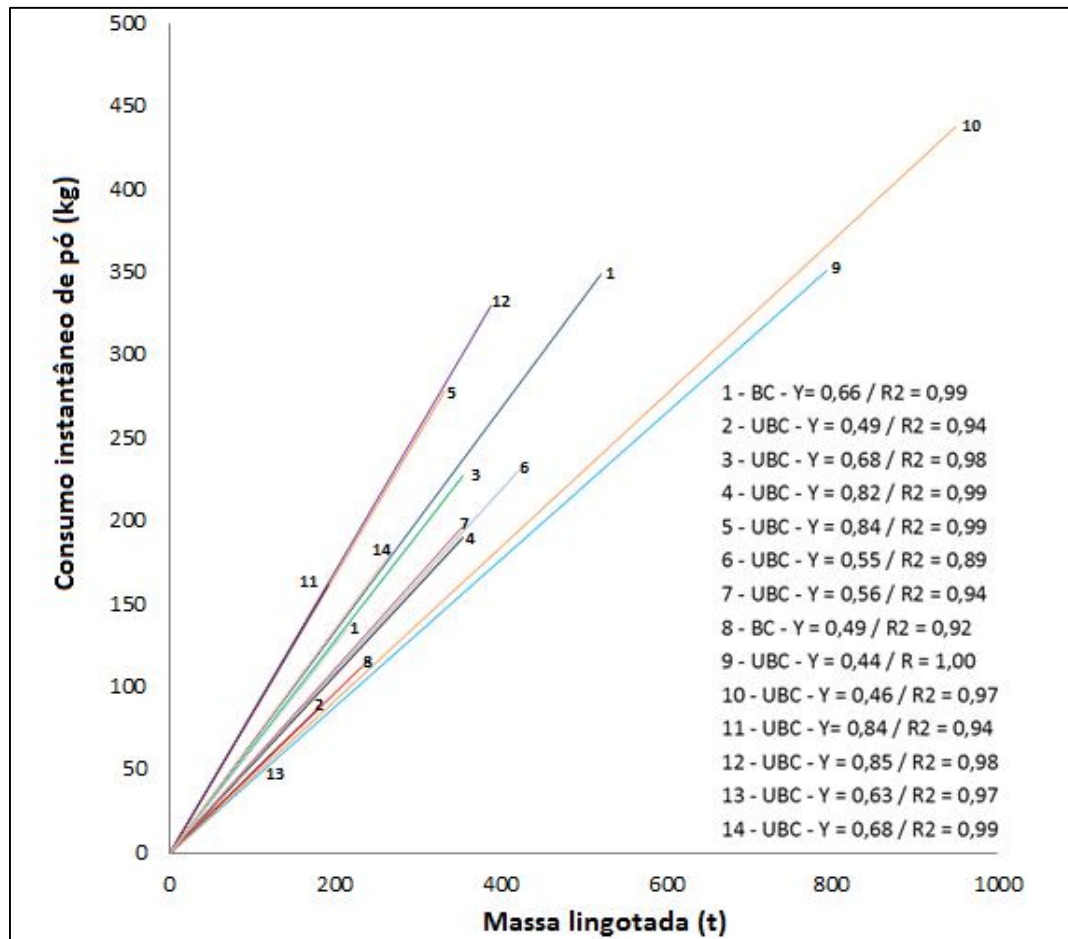


Figura 5.26 – Curvas de ajuste linear passando pela origem do eixo.

Em linhas gerais, conforme figura 5.26, são percebidas diferenças marcantes no comportamento em relação ao consumo específico medido. O consumo específico de pó fluxante variou entre 0,44 a 0,85 kg/t. aço. Esses valores são coerentes com dados de literatura (Normanton *et al.*, 2004).

Na tabela V.6 são apresentados os consumos específicos de pós fluxantes expressos em kg/t. aço e kg/m² para os 14 testes realizados. Para as análises de processo foi considerado o consumo expresso em kg/t. aço.

Tabela V.6 – Consumo específico para os testes realizados.

Teste	Consumo específico (kg/t)	Consumo específico (kg/m²)
1	0,55	0,44
2	0,49	0,38
3	0,56	0,56
4	0,64	0,51
5	0,84	0,66
6	0,82	0,69
7	0,49	0,37
8	0,66	0,56
9	0,44	0,37
10	0,46	0,39
11	0,84	0,65
12	0,85	0,74
13	0,63	0,51
14	0,68	0,55

Do ponto de vista da literatura (Wolf, 1994), o consumo tem relação direta com a velocidade de lingotamento, largura da placa além das características do próprio pó fluxante. Nesse sentido, uma análise das variáveis de processo pode elucidar as diferenças observadas para o consumo específico de pó fluxante, haja vista não haver diferenças significativas nas composições químicas dos aços.

Considerando os dados levantados nos testes realizados, na figura 5.27 é apresentada a relação entre o consumo de pó com a velocidade de lingotamento.

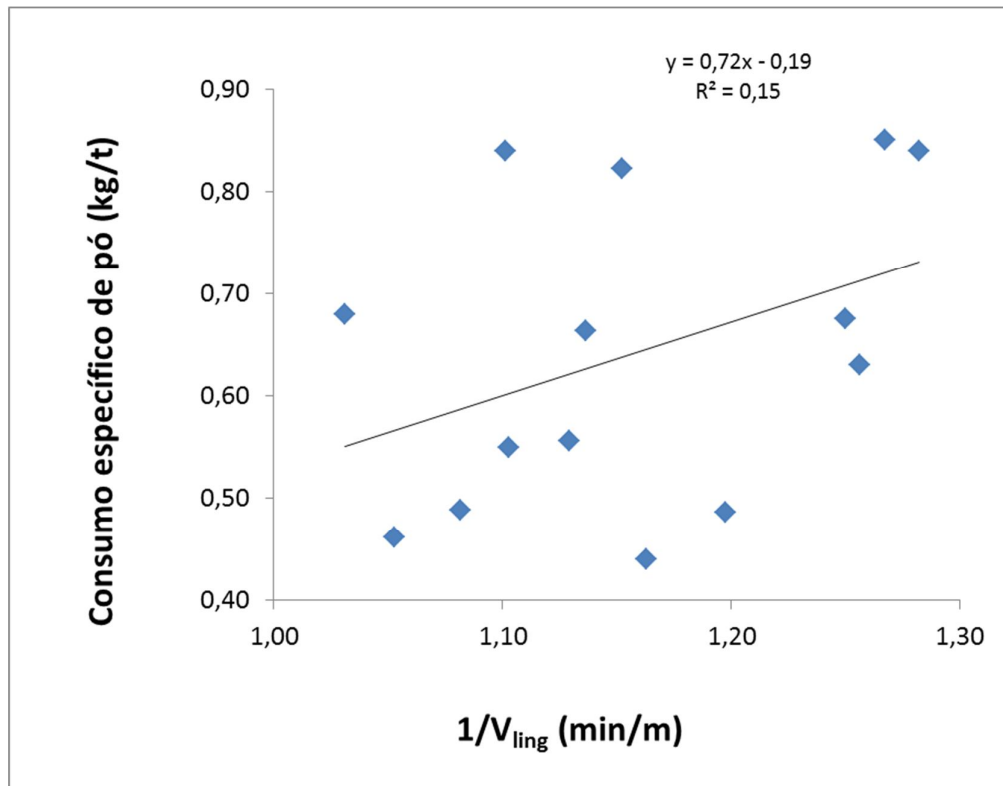


Figura 5.27 – Consumo específico médio em relação à velocidade média de lingotamento.

Conforme o gráfico da figura 5.27, a correlação entre o consumo específico de pó fluxante e a velocidade de lingotamento contínuo se mostrou baixa, o coeficiente de correlação foi de 0,15. Neste caso, apesar de pequena redução do consumo com o incremento na velocidade de lingotamento, entende-se que não há uma correlação evidente entre estas variáveis, o que em uma primeira abordagem contradiz a literatura técnica (Normanton *et al.*, 2004).

A variação de velocidade típica para o processo industrial da Usiminas é de 0,80 a 1,10 m/min, considerando condições normais de processamento. Os dados de variação de velocidade de lingotamento são mostrados na figura 5.28 e representam as variações observadas nos testes realizados.

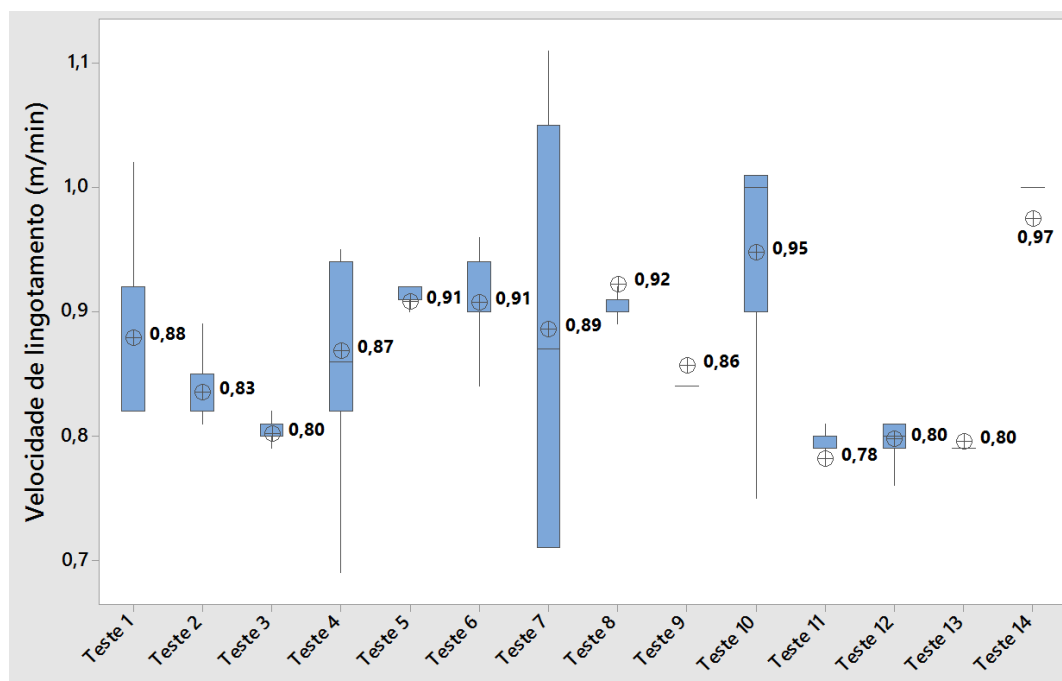


Figura 5.28 – Variação de velocidade de lingotamento nos testes realizados.

Como apresentado na figura 5.28, as velocidades de lingotamento praticadas nos testes industriais estão tipicamente inseridas no intervalo de variação de processo da Usiminas. Assim, com base nos resultados, entende-se que apesar da literatura apresentar relação inversa do consumo com a velocidade, as faixas de variação de velocidade praticadas na Usiminas não são suficientes para influenciar de forma significativa no consumo específico.

Tal constatação está de acordo com dados coletados na empresa CORUS NL (Normanton *et al.*, 2004) para velocidades de lingotamento variando entre 0,55 a 1,00 m/min, valores próximos aos da USIMINAS. Nesse caso, conforme figura 5.29, o efeito observado é semelhante ao constatado nesse presente estudo.

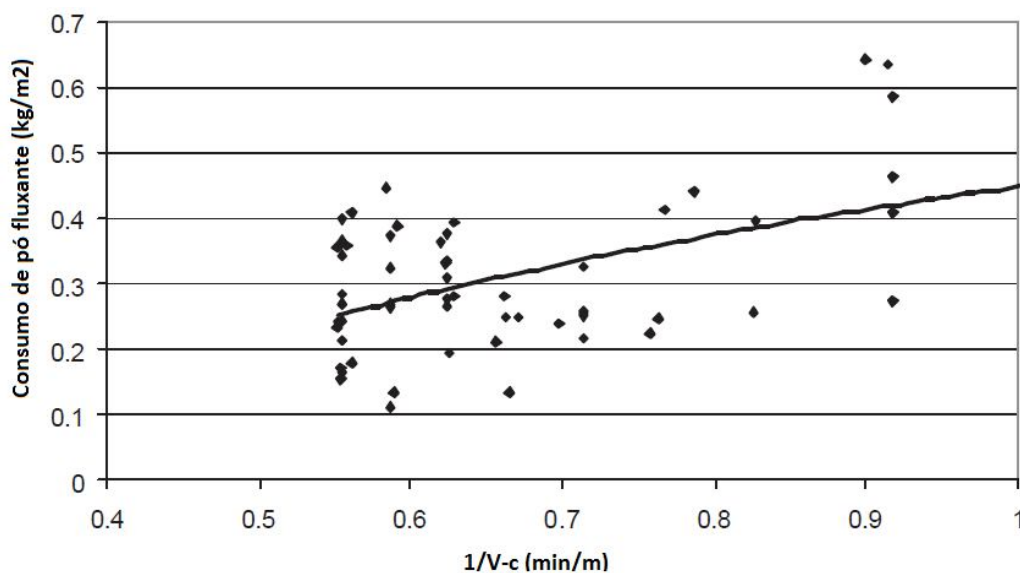


Figura 5.29 – Consumo de pó fluxante em função da velocidade de lingotamento (Normanton *et al.*, 2004).

Do ponto de vista das dimensões do molde, o consumo foi avaliado em função da área do molde durante os testes, conforme Kromhout (2011). O consumo de pó reduz drasticamente com o aumento da área do molde, na revisão bibliográfica foram apresentadas as equações 3.6 e 3.7, onde é possível constatar que os consumos específicos de pó fluxante são inversamente proporcionais à largura do molde (w) e ao comprimento do aço lingotado. Na figura 5.30 são apresentados os dados relacionando o consumo específico de pó com a largura média de placa para os testes realizados.

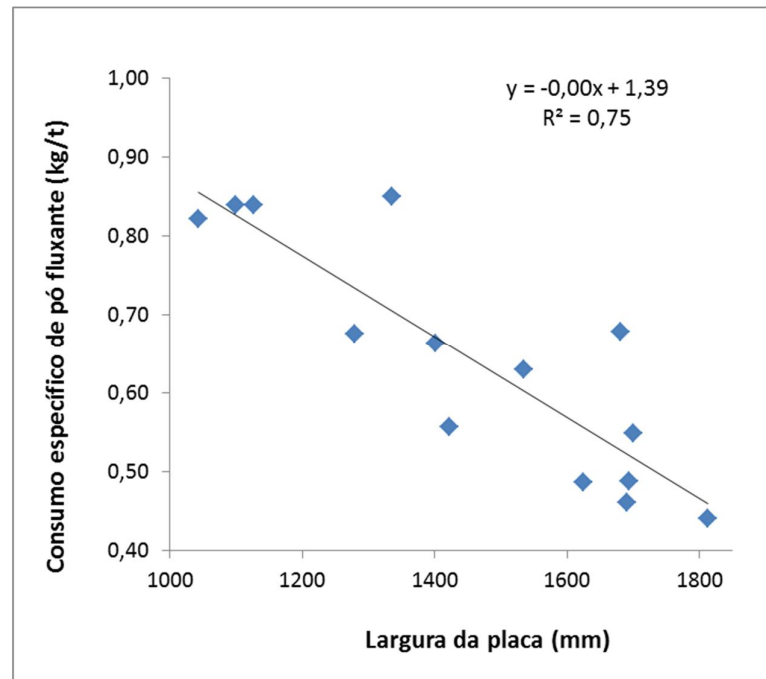


Figura 5.30 – Consumo específico médio em relação à largura média do molde para os testes realizados.

Como observado na figura 5.30, o consumo de pó fluxante é influenciado pela largura do molde. Com o aumento da largura, ocorre a redução do consumo específico de pó. A variação observada é linear e apresenta um coeficiente de correlação de 0,75, que pode ser considerado elevado em se tratando de dados industriais. Um incremento de 58% na largura de placa causa uma redução de até 51% no consumo de pó fluxante.

Na USIMINAS são produzidas placas com larguras entre 900 e 2020 mm, independente do tipo de aço. Ao longo dos testes aqui realizados, verificam-se larguras de placa variando entre 1044 e 1813 mm, indicando uma representação aceitável da faixa de variação típica.

Tendo em vista que uma das funções do pó fluxante é a lubrificação do molde, a redução de consumo com o aumento da largura de placa pode apresentar um risco ao processo. Neste caso, placas com maior largura podem apresentar maior tendência ao agarramento devido à maior área de contato com o molde. A redução do consumo de pó fluxante implicaria, em princípio, em menor espessura de filme líquido na interface placa molde, o que poderia levar a condições de riscos de rompimento de veio.

Para verificar tal tendência, foi realizado um levantamento do número de alarmes de agarramento ocorridos na Usiminas no período de 01/01/2017 a 30/06/2019. Na figura 5.31 é apresentada a correlação entre a quantidade de alarmes de agarramento ocorridos e a largura de placa correspondente.

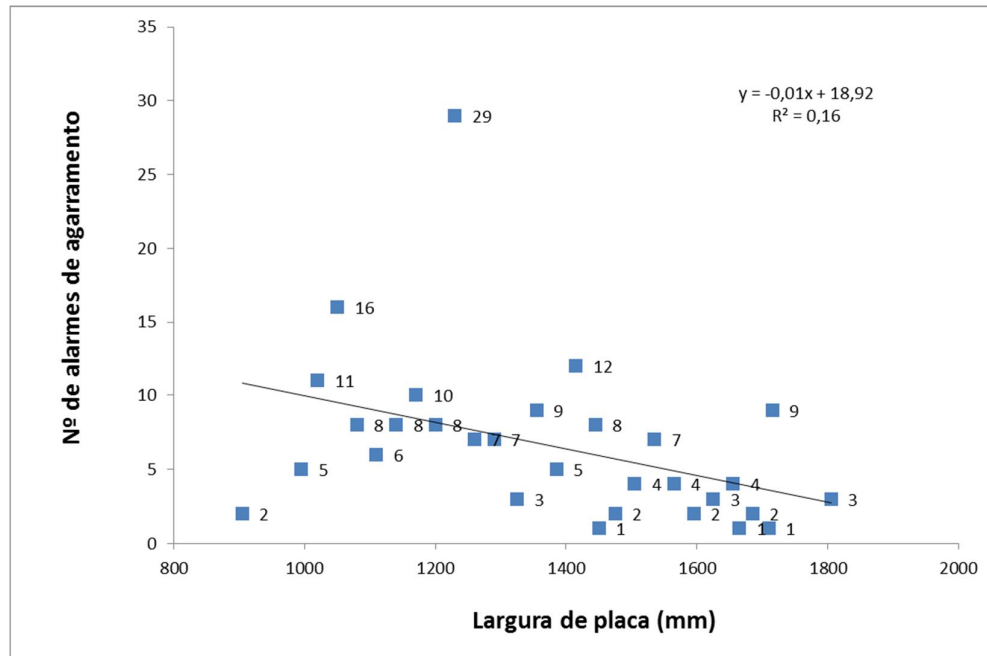


Figura 5.31 – Número de alarmes de agarramento em relação à largura de placa.

De maneira geral, a figura 5.31 mostra que no caso da Usiminas, ocorre maior concentração de alarmes de agarramento em menores larguras. Portanto, os dados da Usiminas foram inversos ao comentado anteriormente, apesar de a correlação ter ficado baixa.

A tendência de ocorrência mais elevada de alarmes em larguras menores pode ter outra origem, por exemplo o escoamento do aço no molde. Na figura 5.32 é apresentada uma correlação entre a largura e o tipo de fluxo de escoamento.

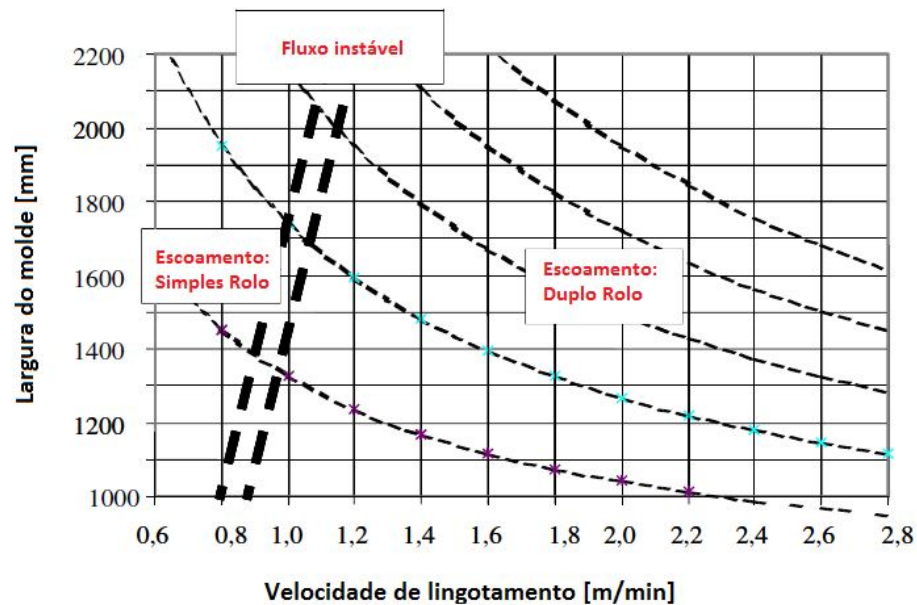


Figura 5.32 – Tipo de fluxo de aço em relação à largura de placa e velocidade de lingotamento (Pierre, 2012).

Conforme apresentado na figura 5.32, larguras menores e com velocidades menores (velocidades praticadas na Usiminas), ocorre o fluxo de escoamento do tipo *Single Roll*, que pode gerar rupturas na camada de escória líquida, interrompendo o fluxo da escória líquida e, conseqüentemente, comprometendo a lubrificação. Na figura 5.33 são apresentados os fluxos de escoamentos do tipo *Double Roll* e *Single Roll* em relação à movimentação do menisco (instabilidade).

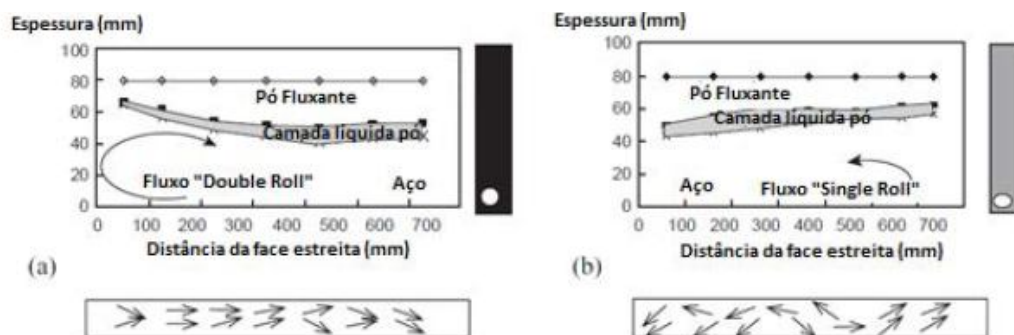


Figura 5.33 – Fluxo de escoamento de aço do tipo *Double Roll* e *Single Roll* em relação à velocidade do menisco (Thomas, 2003).

Conforme observado na figura 5.33, os alarmes de agarramento estão mais concentrados em menores larguras de placas, onde tem-se um fluxo de escoamento de aço instável, do tipo *Single Roll*.

Outra variável de processo avaliada foi a temperatura média do aço. Na figura 5.34 é apresentada a correlação do superaquecimento com o consumo de pó fluxante.

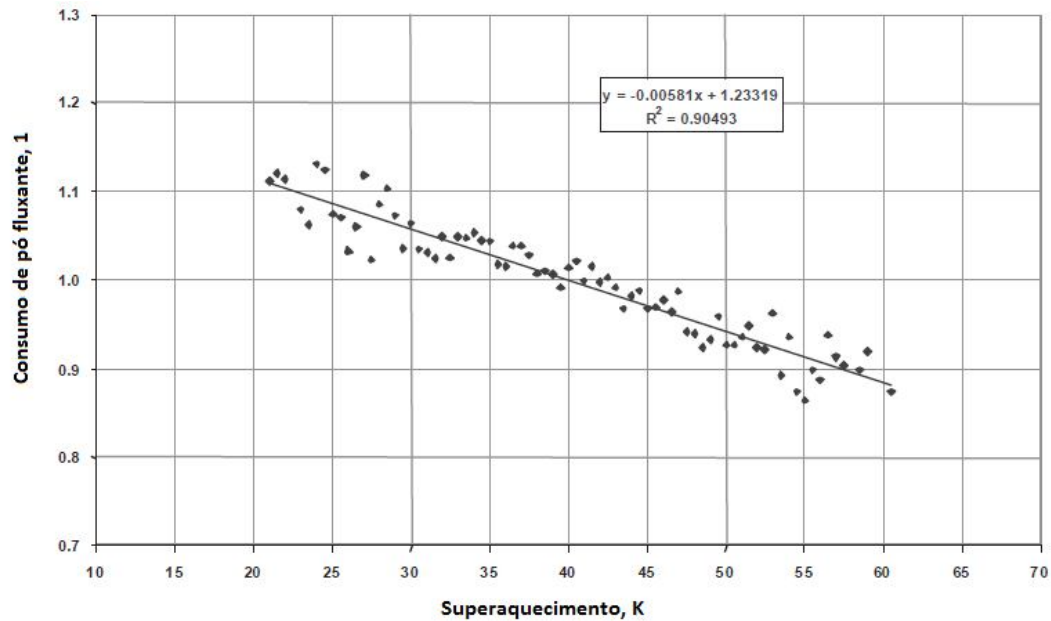


Figura 5.34 – Consumo específico de pó fluxante em relação ao superaquecimento do aço (Normanton *et al.*, 2004).

Como observado na figura 5.34, ao aumentar a temperatura do aço ocorre a redução do consumo de pó fluxante.

Os resultados dos testes realizados na USIMINAS são apresentados na figura 5.35.

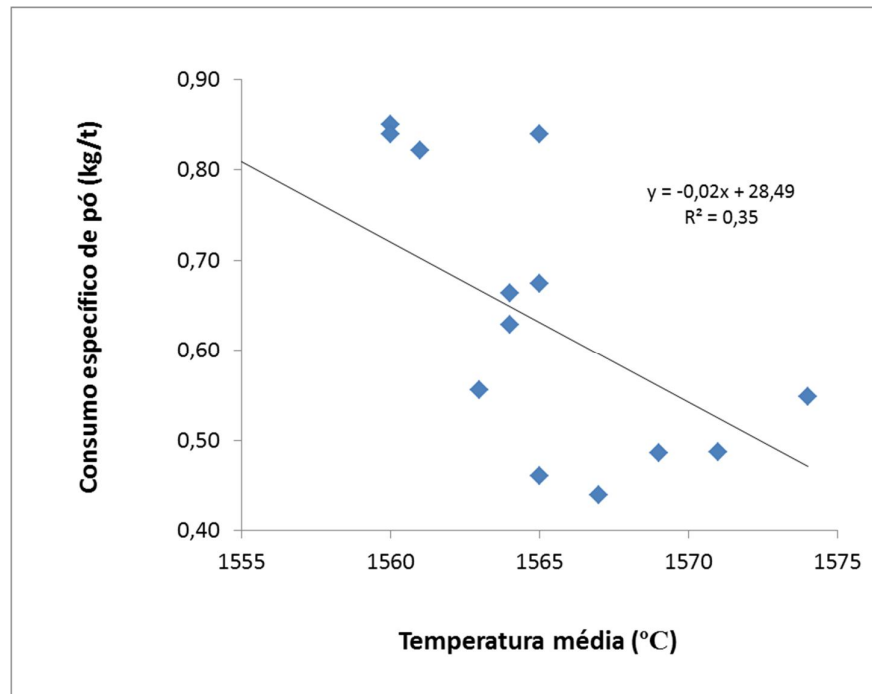


Figura 5.35 – Consumo específico em relação à temperatura de solidificação média do aço.

Conforme observado na figura 5.35, a temperatura média do aço também tem uma relação inversa com o consumo específico de pó fluxante. Apesar da relação linear apresentar baixo índice de correlação, ainda é possível inferir que o consumo de pó fluxante diminui com o aumento da temperatura de lingotamento.

As temperaturas de lingotamento visadas para as duas famílias dos aços testados são próximas, não sendo observadas elevadas variações. Na figura 5.36 são apresentadas as variações de temperaturas dos 14 testes realizados.

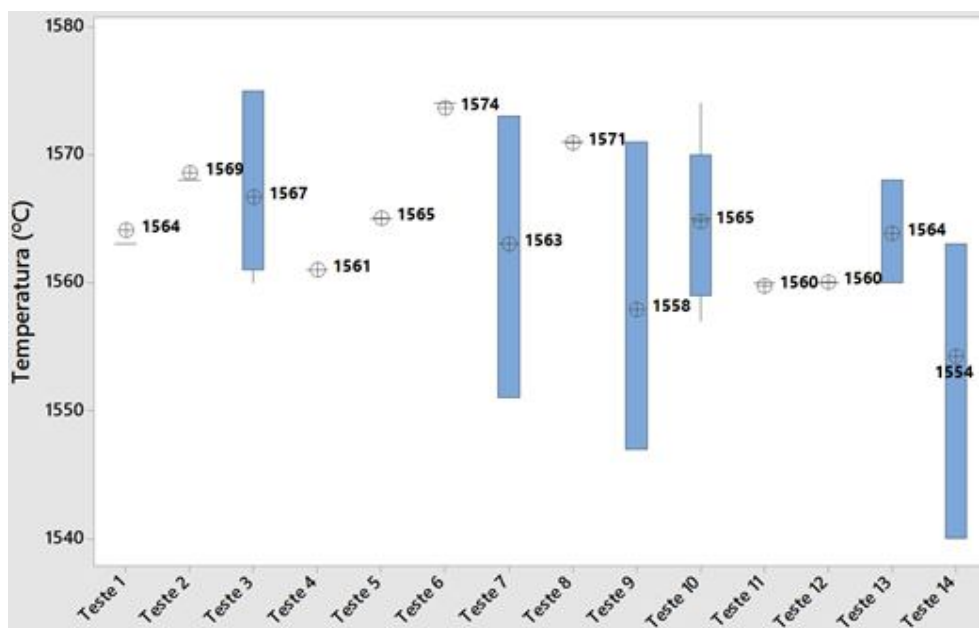


Figura 5.36 – Variações de temperaturas dos testes realizados.

Conforme apresentado na figura 5.36, as faixas de variação das temperaturas nos testes foram pequenas, isso pode explicar a baixa influência dessa variável no consumo de pó fluxante. Mesmo assim, esta deve ser uma variável considerada importante. De acordo com a figura 5.35, com o incremento menor de que 2% na temperatura pode-se verificar uma redução do consumo específico de pó fluxante de até 40%.

Considerando seus efeitos no processo, a elevação da temperatura de lingotamento reflete da redução na espessura solidificada no interior do molde. Com menor espessura, a pele de aço em solidificação possui menor resistência à pressão ferrostática reduzindo a distância entre a placa de cobre do molde e a pele em solidificação, conseqüentemente, resultando em menor consumo de pó fluxante.

Considerando as duas variáveis de processo (largura do molde e temperatura de lingotamento), entende-se que a combinação de ambas em valores elevados pode trazer riscos à operação do ponto de vista do rompimento de pele. Se já existe um menor consumo com larguras elevadas, o incremento de temperatura para maiores larguras pode potencializar o efeito da pressão ferrostática sobre a pele, considerando que para maiores larguras maior será a curvatura, aumentando o contato com o molde, elevando

o risco de agarramento. Neste caso, a redução da velocidade de lingotamento tende a aumentar a espessura da pele e minimizar estes efeitos.

Na figura 5.37 são apresentados dados da Usiminas referentes à quantidade de alarmes de agarramento e temperatura.

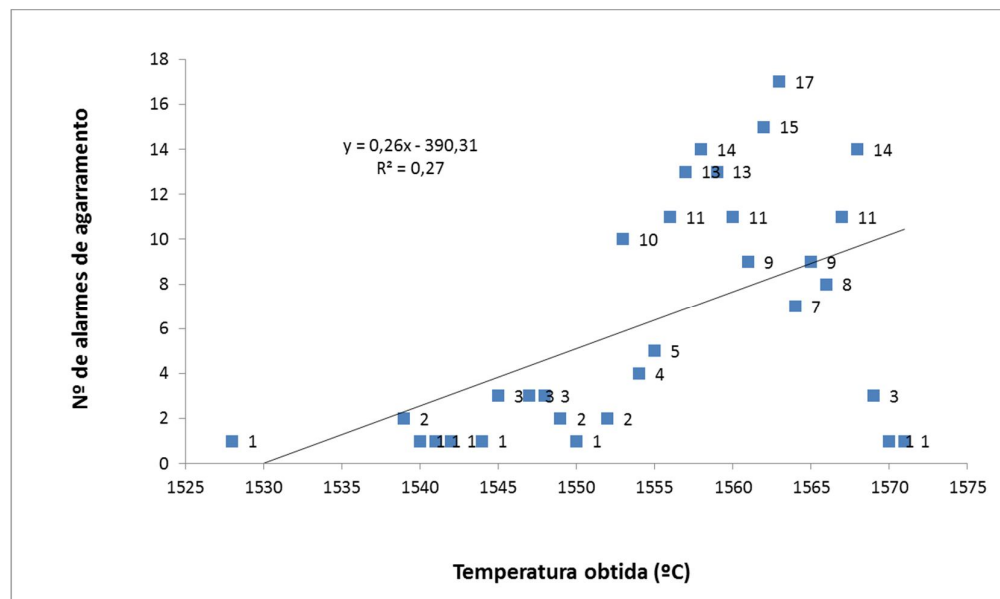


Figura 5.37 – Quantidade de alarmes em relação à temperatura do aço.

Conforme apresentado na figura 5.37, a temperatura não teve correlação direta em relação aos alarmes de agarramento, apesar da relação linear apresentar baixa correlação, existe uma pequena tendência de maior temperatura provocar maior número de alarmes de agarramento.

5.6.1 Propriedades dos pós fluxantes que influenciaram no consumo específico

Além dos efeitos das variáveis do processo, as propriedades do próprio pó fluxante podem influenciar no consumo medido. A viscosidade do pó fluxante é uma das variáveis que tem influência no consumo de pó fluxante, conforme Normanton *et al.* (2004). Em linhas gerais, o incremento na viscosidade tende a reduzir o consumo, pois reduz a capacidade da escória líquida em fluir para a interface placa/molde.

No presente trabalho, foram avaliados fluxantes com especificações distintas. Na tabela V.4 foi apresentada a viscosidade especificada e a calculada com base na análise química dos fluxantes que foram utilizados nos testes de avaliação do consumo específico.

As viscosidades dos fluxantes utilizados foram analisadas e comparadas com o consumo específico de cada teste realizado. Na figura 5.38 é apresentada essa informação.

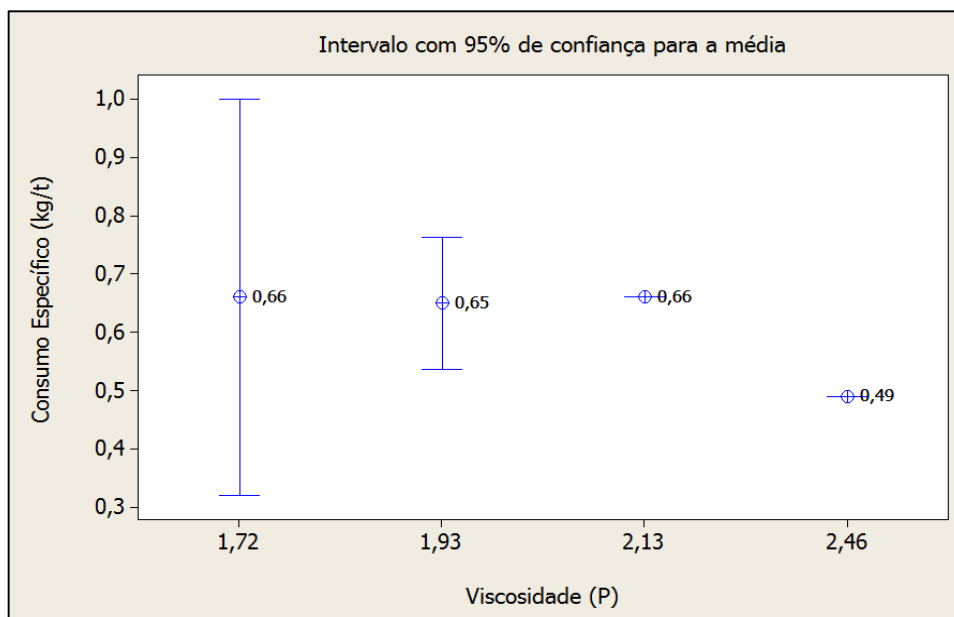


Figura 5.38 – Consumo específico de pó fluxante em relação à viscosidade do pó fluxante.

Conforme apresentado na figura 5.38, o pó fluxante de maior viscosidade (2,46 P) apresentou menor consumo específico de pó fluxante nos testes realizados. Isso está de acordo com a literatura (Mills *et al.* 2017), que indica que a viscosidade está diretamente ligada com a lubrificação do pó fluxante na interface placa/molde.

Outra variável que pode influenciar no consumo é a temperatura de cristalização dos pós fluxantes. Na tabela V.7 é apresentada a temperatura de cristalização analisada dos fluxantes testados.

Tabela V.7 – Temperatura de cristalização analisada dos pós fluxantes testados.

Pó Fluxante	Temperatura de cristalização (°C)
A-1	1100
B-1	1150
C-1	1090
D-1	1100

Na figura 5.39 é apresentada a variação do consumo específico do pó fluxante em relação à temperatura de cristalização para os pós fluxantes analisados.

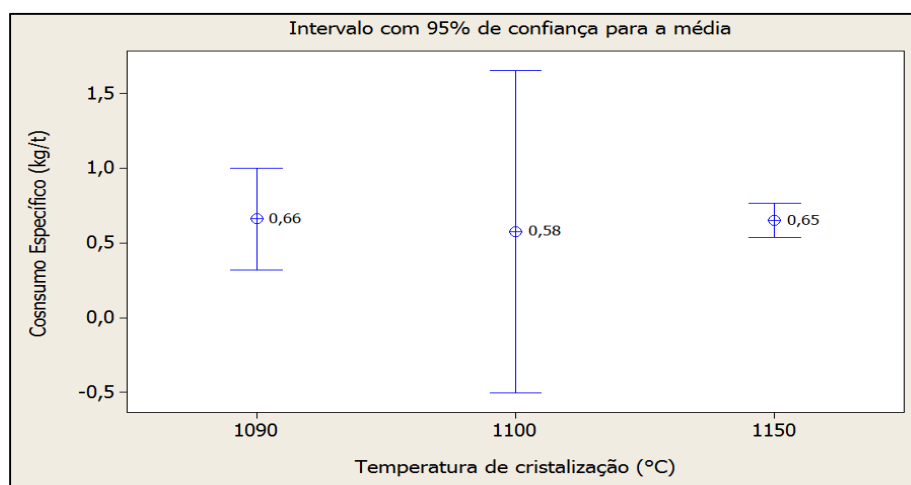


Figura 5.39 – Consumo específico do pó fluxante em relação à temperatura de cristalização do pó fluxante.

Conforme apresentado na figura 5.39, o desvio é alto ao correlacionar o consumo com a temperatura de cristalização. Desta forma, não é possível estabelecer ligação entre estas variáveis. Conforme MARTINS *et al.* (2016), na medida em que a temperatura de cristalização diminui, o consumo específico de pó fluxante aumenta, pois a espessura do filme de escória líquida fica maior, o que não favorece a infiltração do pó entre a placa de aço em solidificação e a placa do molde.

A temperatura de cristalização é uma maneira indireta para verificar se a lubrificação entre placa/molde está ocorrendo de maneira adequada, pois ela depende da camada de pó que está sendo infiltrada.

A taxa de fusão foi medida indiretamente pela quantidade de carbono livre existente nos pós fluxantes analisados. Na tabela V.8 é apresentado o teor de carbono livre dos pós fluxantes testados.

Tabela V.8 – Carbono analisado dos pós fluxantes testados

Pó Fluxante	Carbono livre (%)
A-1	3,24
B-1	1,83
C-1	3,60
D-1	3,27

O carbono livre tem influência sobre a taxa de fusão: quando se tem menores teores de carbono livre, é esperada uma fusão mais rápida.

Na figura 5.40 é apresentada o consumo de pó fluxante em relação ao teor de carbono livre.

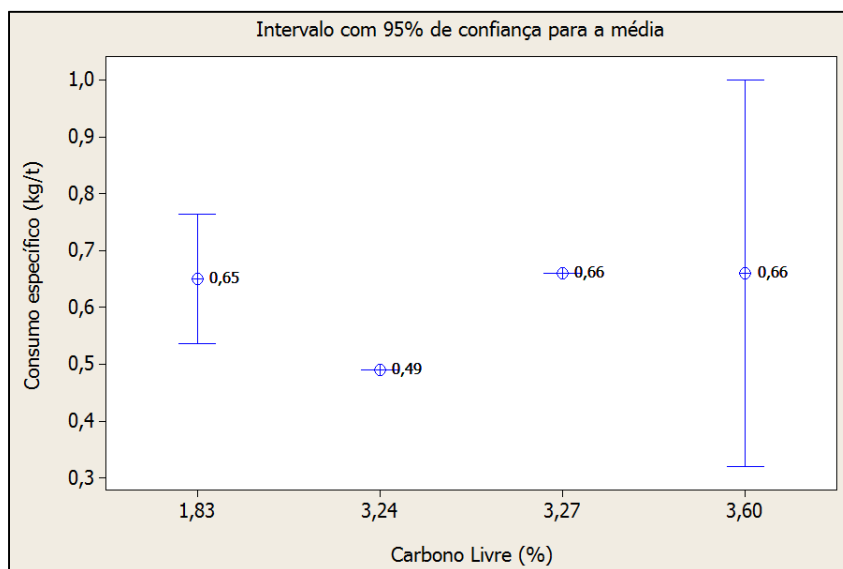


Figura 5.40 – Consumo específico do pó fluxante em relação ao carbono livre do pó.

Para verificar a influência do teor de carbono em relação ao consumo é preciso conhecer a altura da camada de escória líquida de pó existente no molde. Na figura 5.41 é apresentada a espessura da camada de escória líquida em relação ao carbono livre do pó.

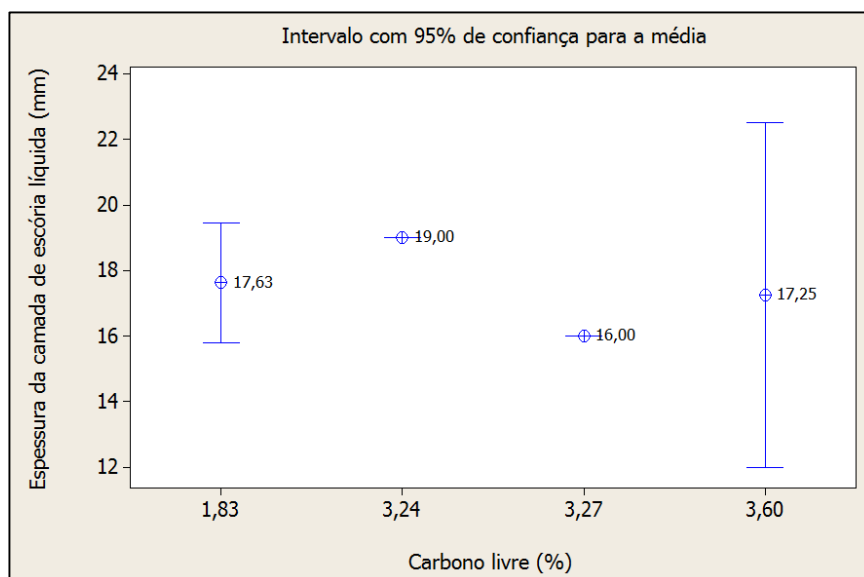


Figura 5.41 – Espessura da camada de escória líquida em relação ao teor de carbono livre do pó.

Conforme mostrado na figura 5.41, a espessura da camada de escória líquida não teve correlação com o teor de carbono livre do pó fluxante. Teores de carbono entre 1,83 e 3,60% apresentaram espessuras médias de camada de escória líquida próximas. Esses dois fluxantes são aplicados para o aço UBC. Na figura 5.42 é apresentado o consumo de pó fluxante em função da altura da camada de escória.

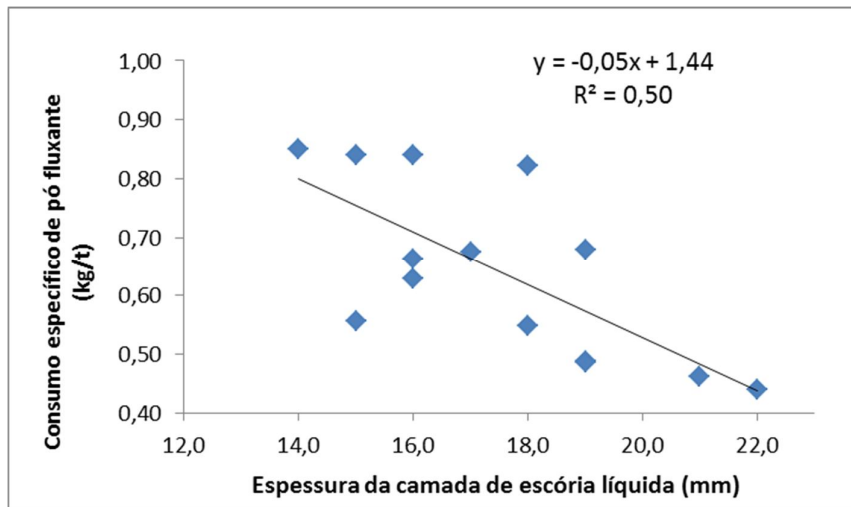


Figura 5.42 – Espessura da camada de escória líquida em relação ao consumo específico.

Conforme apresentado na figura 5.42, a espessura da camada de escória tem uma correlação considerável com o consumo: à medida que o consumo reduz, a espessura da camada de escória líquida aumenta.

A tabela V.9 apresenta um resumo dos testes com os respectivos resultados obtidos.

Tabela V.9 – Resumo dos testes realizados.

Pó Fluxante	Consumo médio (kg/t)	Viscosidade Analisada (IRSID)	Temperatura de Cristalização (°C)	Camada escória média (mm)	Carbono livre (%)
A-1	0,490	2,46	1100	19	3,24
B-1	0,650	1,93	1150	18	1,83
C-1	0,661	1,72	1090	17	3,60
D-1	0,664	2,13	1100	16	3,27

Na tabela V.9 é apresentado um resumo dos resultados com as respectivas variáveis de processo, os resultados obtidos estão coerentes com a literatura (Normanton *et al.*, 2004), viscosidade maior ocorre menor penetração de pó entre a interface placa/molde, com isso ocorre a redução do consumo de pó. O carbono livre esta relacionado com a taxa de fusão, maior taxa de fusão, menor o teor de carbono livre (Kromhout, 2011), e consequentemente maior consumo de pó fluxante.

Já para a temperatura de solidificação menor, o fluxante irá fundir mais rápido e consequentemente o consumo será maior, conforme Martins *et al.* (2016).

5.7 Resultado de Qualidade

Conforme mencionado na revisão bibliográfica, durante o trabalho foi verificada a sensibilidade do consumo de pós fluxantes à variação de parâmetros de processo, buscando relações de causa e efeito com eventos que possam induzir a desvios de qualidade superficial. Então, foram correlacionados defeitos que pudessem estar ligados ao desempenho e consumo de 3548 kg de pó fluxante, em 5795 toneladas de aço lingotados. No levantamento, não foi evidenciado defeito em produto acabado (bobinas), todo o material lingotado geraram bobinas, pois os aços testados são destinados à laminação de tiras a quente.

Vale ressaltar que a Usiminas faz uso do processo de escarfagem geral automática em algumas qualidades de aço, onde são retirados os defeitos superficiais. Tal fato tem influência sobre o resultado de produto acabado, e explica a ausência de evento de qualidade no laminado. Em um segundo momento, pode ocorrer *Down Grade* de placas, que são transferidas para outros clientes, o que também tem influência no resultado dos produtos finais que foram gerados. Para finalizar, não houve defeito grosseiro em placa que estivesse correlacionado com consumo do pó.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um sistema automático para medição do consumo de pó fluxante durante o lingotamento contínuo de placas, correlacionando esse com as variáveis de processo que influenciam no consumo.

Considerando os resultados, foi possível obter as seguintes conclusões:

- A estrutura de apoio do *bigbag* apresentou deformação possível de ser medida em função do volume de pó fluxante. Para obter a deformação sofrida pela estrutura do *bigbag* em função da quantidade de pó fluxante em seu interior, foram instalados extensômetros em cada um dos pés de sustentação da base de apoio do reservatório de pó fluxante.
- Foi desenvolvida uma rotina computacional para realizar a aquisição, processamento, apresentação e armazenamento dos dados de deformação e peso.
- O teste de homologação do sistema de medição de consumo foi satisfatório, ao comparar com o método manual e não havendo diferença relevante entre os métodos.
- Após a homologação do sistema desenvolvido, foram realizados acompanhamentos de medição de consumo específico do pó fluxante utilizado, verificando-se as variáveis de processo que afetaram o consumo:
 - A largura de placa teve a maior influência: larguras maiores induziram a menores consumos de pó;
 - A viscosidade do pó fluxante teve pouca influência nos resultados dos testes realizados;
 - A faixa de velocidades de lingotamento praticadas na Usiminas não permitiu identificar influência, haja vista que a faixa de trabalho e as variações naturais de velocidade de lingotamento são baixas e de pouca relevância.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando dar continuidade ao trabalho de quantificar o consumo específico de pó fluxante através do sistema desenvolvido, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Realizar medições de consumo em aços médio carbono e alto carbono;
- Investigar o efeito da viscosidade do fluxante no molde sobre a qualidade de placa para grupos específicos de aços, velocidades e superaquecimentos, incluindo o nível de limpidez/inclusões (alumina/aluminatos de cálcio) dos aços;
- Avaliar as variáveis (largura de placa, velocidade de lingotamento, viscosidade, temperatura de solidificação) que têm influência no consumo específico de pó fluxante para os novos aços a serem testados;
- Implementar o sistema de medição automática de pó fluxante desenvolvido em todos os veios, incluindo a Aciaria 01;
- Avaliar a qualidade superficial de placa (trinca de quina, marca de oscilação) e de produto acabado para os novos testes a serem realizados.

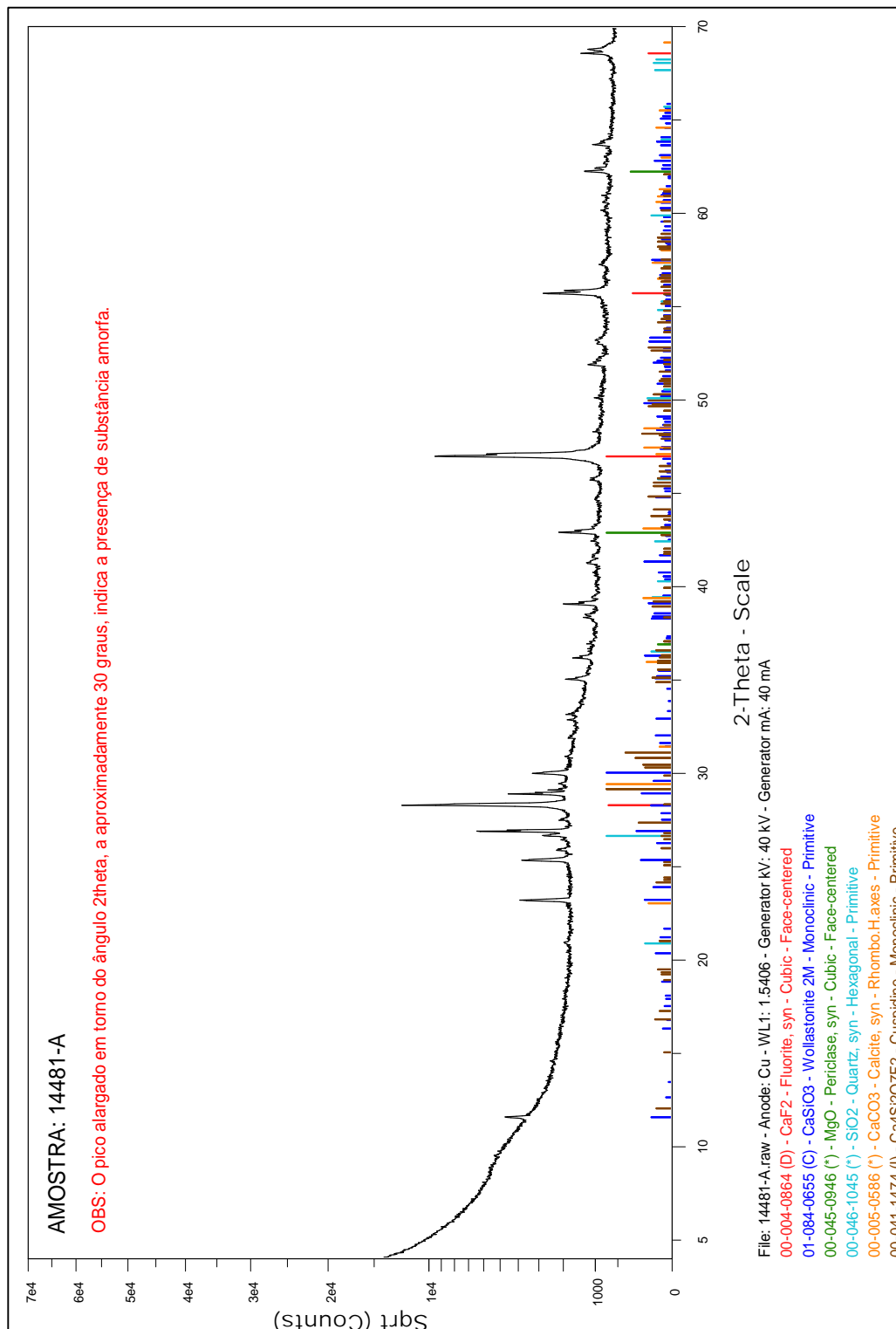
8 ANEXOS

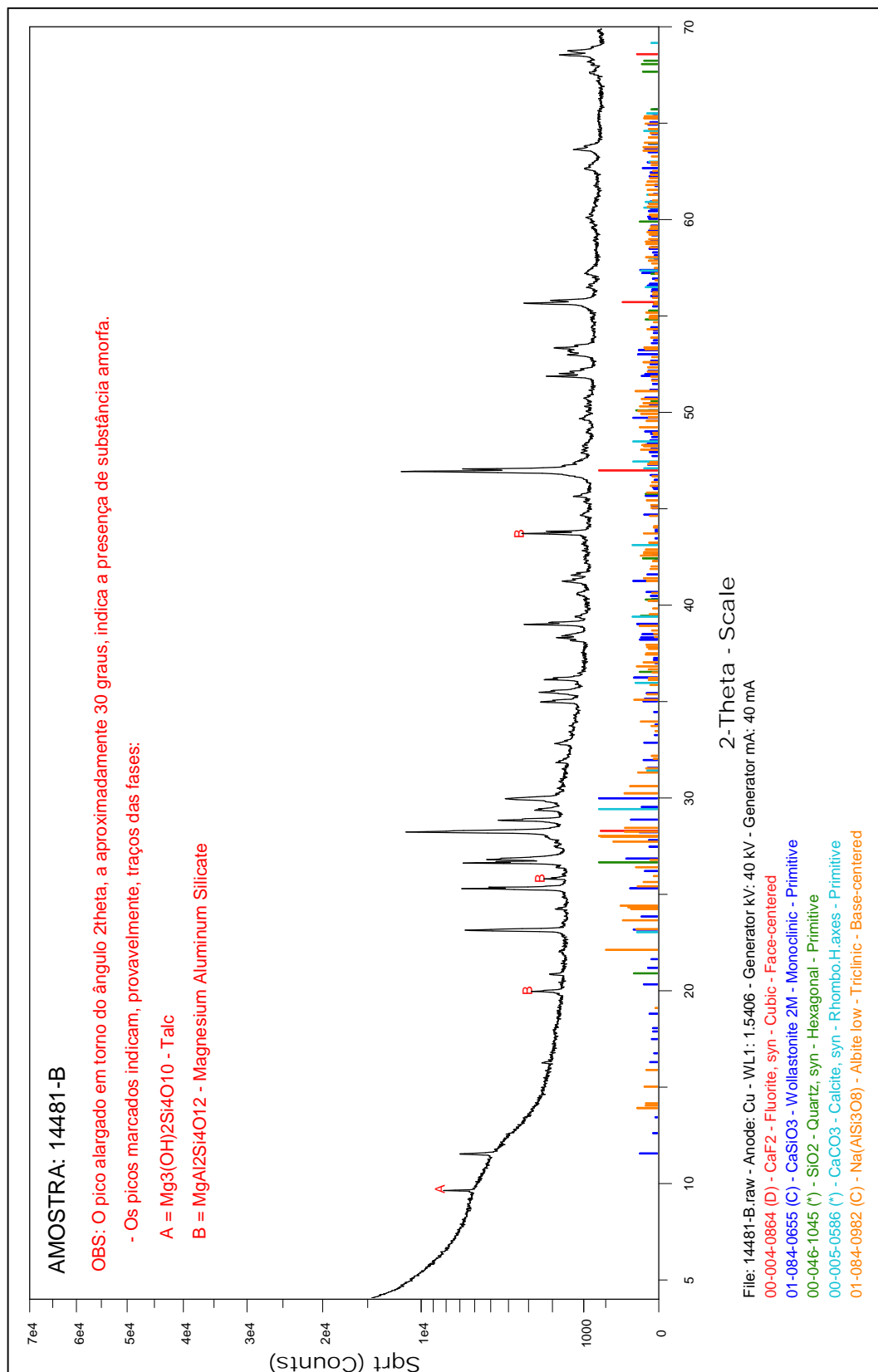
Anexo I

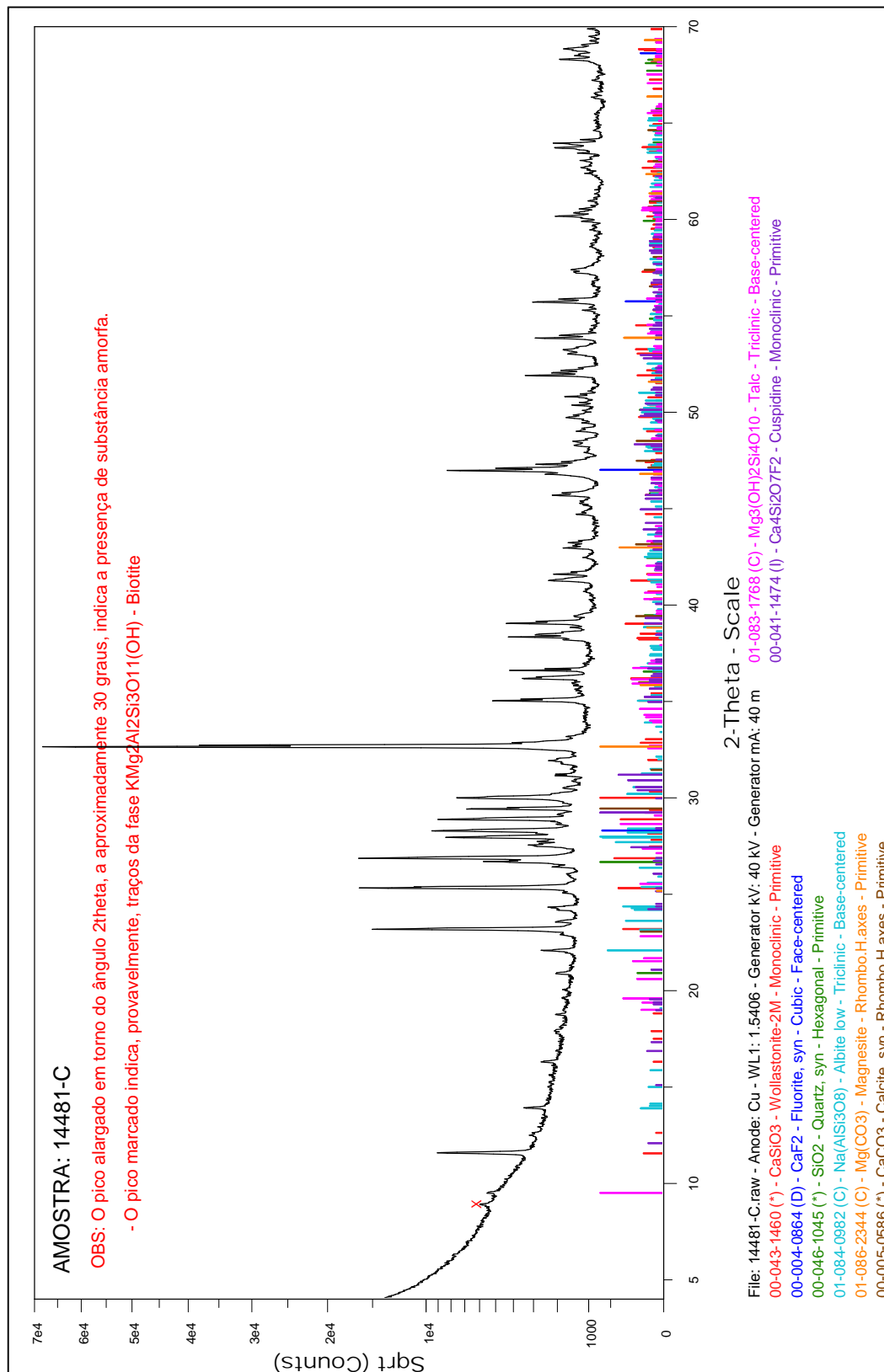
References	Equation, Q_s	V_c	η	f	$T_{\text{tot}} T_{\text{lag}}$	s	t_p	t_m	t_{cycle}	ρ_{lag}	d_l	d_{OM}
Wolf	$Q_s = 0.1 + 0.55 (60/f\eta^{0.5} V_c)$	↓	↓									
Ogibayashi	$Q_s^{\text{nomd}} = 0.60/\eta V_c$	↓	↓									
Wolf, Fox	$Q_s^{\text{nomd}} = 0.70/\eta^{0.5} V_c$ <i>modified</i> $Q_s^{\text{nomd}} = 0.55\eta^{0.5} V_c$	↓	↓									
Kwon	$Q_s = 0.22 + 0.4 [60/(0.5 s)^{0.3} \eta^{0.5} V_c]$	↓	↓	↓		↓						
Maeda	$Q_s = 0.15 f \cdot t_p' (\eta \cdot V_c)$	↓	↓	↑	↓		↑					
Nakajima	$Q_s = 205400V_c^{-0.628} T_{\text{lag}}^{-0.366} s^{0.341} \frac{1}{t_{\text{cycle}}^{0.076} f_p^{0.116}}$	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓				
Sridhar	$Q_s = 0.3/(\eta^{0.045} V_c)$	↓	↓									
Wolf 5	$Q_s = 0.5 (s \cdot f\eta V_c/1000)^{-0.5}$	↓	↓	↓		↓						
Jenkins	$Q_s = (0.433A_c^{0.5}) [1 + (0.0283/\eta V_c)]$	↓	↓									
Fox-modified	$Q_s = (0.369A_c^{0.5})(1 + 0.1564/\eta V_c^2) - 0.123$	↓	↓									
Nebeshima	$Q_s = (\rho_s d_{\text{oxd}}/2V_c) + (\rho d)$	↓	↓	↑					↑	↑	↑	
Tsutsumi	$Q_s = (k\beta s^{0.4} T_{\text{tot}}^{-0.5} V_c) \cos^{-1} [1000V_c/2\eta s]$	↓	↓	↓	↓	↑						
Emi	$Q_s = 0.6\eta^{-0.15}$		↓									
Nakato	$Q_s = \rho_{\text{lag}}(0.143 - 0.003\eta)$		↓	↓						↑		
Kitagawa	$Q_s = 0.0085 t_p f V_c$	↓	↓	↑			↑					
Noguchi	$Q_s = 10^{-3} (1952 - 246V_c - 44\eta - 1.07T_{\text{lag}})$	↓	↓	↓	↓							
Kobayashi	$Q_s = 0.003(t_{\text{cycle}} + t_p)^{1.5} f V_c$	↓	↓	↑			↑		↑			
Shimizu	$Q_s = f t_p [0.0184(T - T_{\text{lag}}) - 2.58]/10V_c$	↓	↓	↑			↑		↑			
Itoyama	$Q_s = Q_m + Q_g + Q_l + Q_{\text{ost}}$											
Shin	$Q_s = [0.025 \rho_s k^{1.43} (2\Delta T/\Delta\rho g)^{0.5} \rho_m^{0.389} \cdot V_c^{-1.49} + 0.507e^{-3.59\eta} (fV_c)]$ where $v_x = V_c/10^3/60$											
Saraswat	$Q_s = e^{28.81/V_c \eta^{0.66} \cdot f^{0.89} \cdot s^{1.37} \cdot T_{\text{br}}^{3.48}}$	↓	↓	↓	↓	↓						

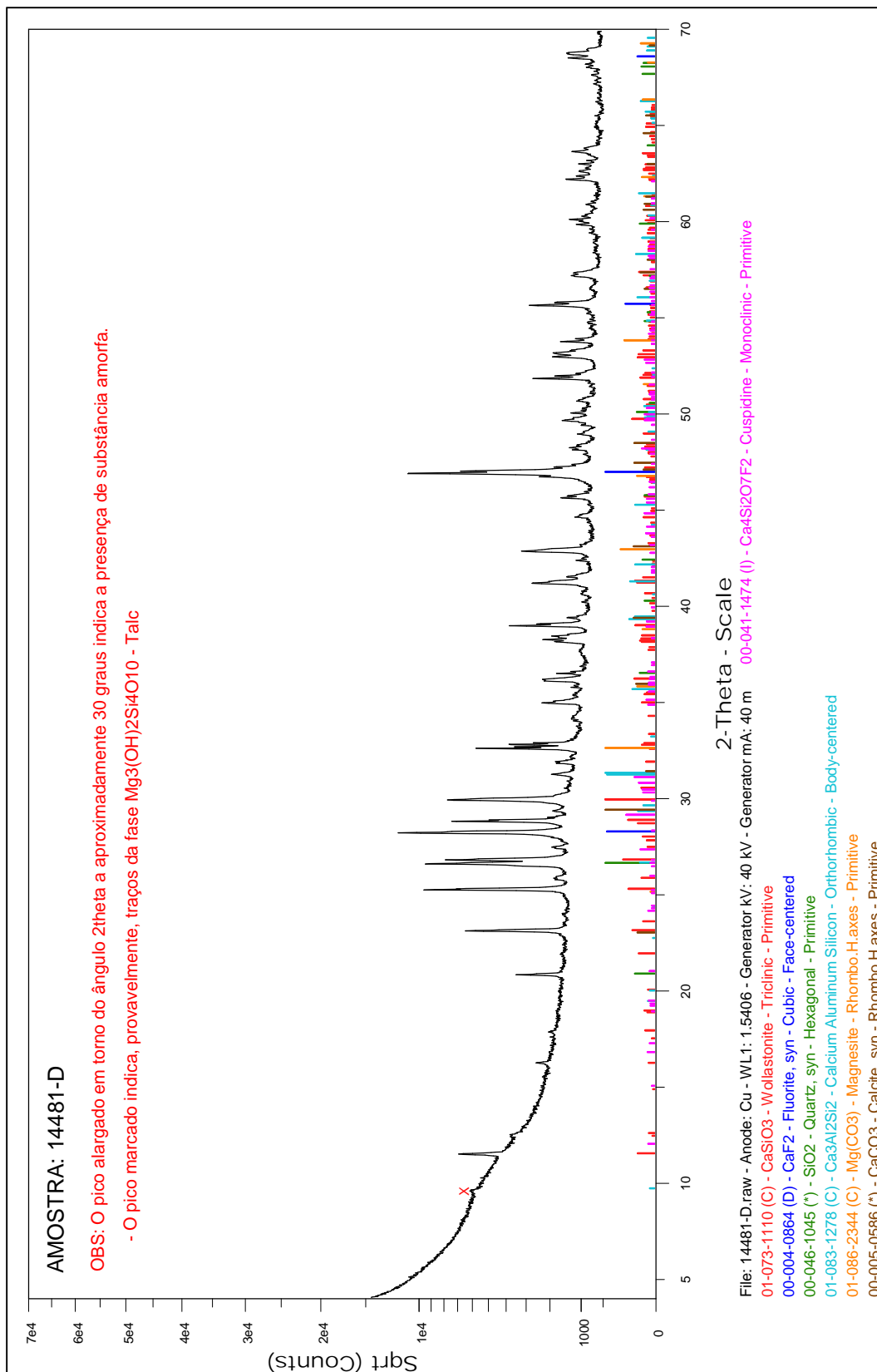
Anexo II

Resultados de difração de Raios X dos pós fluxantes analisados









9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAKI, T.; IKEDA, M. *Optimization of mold oscillation for high speed casting—new criteria for mold oscillation*. Canadian Metallurgical Quarterly, Volume 38, Issue 5, Dezembro-1999, Pág. 295–300.

ATTAR, S. S., MONSHI, A. MERATIAN, M. *The influence of TiO_2 and Na_2CO_3 on the viscosity and crystallization behavior of mold powders*. International Journal of ISSI. Vol.8. No.1, pp.5-11. 2011

BARBOSA, F. A. *Modelamento matemático e físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do lingotamento contínuo da Usiminas – Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, Julho de 2002.*

BEZERRA, M. C. C; et alli. *Avaliação do efeito do carbono em fluxantes para lingotamento contínuo de aços*. In: XXXVIII Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais. ABM, maio de 2007, Belo Horizonte, MG.

BRANION, R.V. *Mold fluxes for continuous casting*. Iron and Steelmaker (USA), September 1986, pp 41-50.

BRANION, R.V. *Mould Flux Technology*. Course sponsored by ISS (Iron and Steel Society), King of Prussia, Pennsylvania, United States, Published by ISS, October 1994.

BRINCK, V.; VALADARES, C. A. G.; PACO, M. R. *Padronização de testes de pós fluxantes para lingotamento contínuo*. 1980. Relatório de P&D (AI 7807) – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais.

DAUBY, P.H. *Continuous casting: make better steel and more of it!*. Revue de Métallurgie, vol.109, n.2, p113-136, 2012.

DIEHL, S.; MOORE J.A.; PHILLIPS R.J. *Improved Spherical Granular Mold Flux*. Steelmaking Conference Proceedings, 1995, pp 351-358

DODD, J.W.; TONGE, K.H. *Thermal methods*. London, John Wiley & Sons, 1987. 337p. (Analytical Chemistry by Open Learning).

EMI, T. *The mechanism for sticking type breakouts and new developments in continuous casting mold fluxes*. Steelmaking Conference Proceedings, 1991, pp 639-646.

EMI, T., NAKATO, H., SUZUKI, K., IIDA, Y., UEDA, T. *Properties of Continuous-Casting Powders Influencing Surface Defects of Wide Slabs for Plates*. Tetsu- to Hagane, 60 (7), 981, (1974) Henry Bratcher Translation HB9357.

FOX, A. B., PhD THESIS, *Mould fluxes their properties and performance*. Dept. of Materials, Imperial College, London, (2003).

FUKUDA, Y., KAWAI, H., OKIMORI, M., HOJO, M., TANAKA, S. Proc. 5th Intl. Conf. Slags, Fluxes and molten salts, Sydney, 1997, (ISS, Warrendale, PA, 1997) p. 791.

HIBBELER, L. C., THOMAS, B.G. *Mold Slag Entrainment in Continuous Casting Molds*. In: AISTECH 2013 IRON AND STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE, 1, 2013. AIST. Warrendale, 2013. p.1215-1230.

ITOYAMA, S., *Evaluation of Mold Flux Consumption in Continuous Casting of Steel Based on Cold Model Experiments*. CAMP- ISIJ, 14, 893, (2001).

JENKINS M. S., *Characterisation and modification of the heat transfer performance of mold powders*. Proc. 78th Steelmaking Conf., 1995, (ISS, Warrendale, PA, 1995) p. 669.

KAWAMOTO M.; NAKAJIMA K.; KANAZAWA T.; NAKAI K. *Melting mechanism of mold powder for continuous casting*. Steelmaking Conference Proceedings, 1992, pp 389-396.

KAWAMOTO et all - 1994 - *Design Principles of Mold Powder for High Speed Continuous Casting*, Iron and Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Fuso-cho, Amagasaki, Hyogo-ken, 660 Japan.

KIM J.W., KIM S. K., KIM D. S., LEE Y. D., EUM J. I., LEE E. S., *Eduction of depressions on type 304 stainless steel cc slabs*. Proc. 78th Steelmaking Conf. 1995, (ISS, Warrendale, PA,1994) p. 333.

KROMHOUT J, A.; LUDLOW V.; McKAY S.; NORMANTON S.; THALHAMMER M.; ORS F.; CIMARELLI T. *Physical properties of mould fluxes for slab casting*. Ironmaking and Steelmaking, 2002 n°3, pp 191-193.

KROMHOUT J. *Mould powders for high speed continuous casting of steel*. Tese, Universidade de Tecnologia de Delft, Holanda. 2011.

KWON O.D., CHOI J., LEE I.R., KIM J.W., MOON K.H., SHIN Y.K., *Optimization of Mold Oscillation Pattern for the Improvement of Surface Quality and Lubrication in Slab Continuous Casting*. Proc.74th Steelmaking Conf.,1991, (ISS, Warrendale, PA,1991) p. 561.

LARSON, D. *Criteria for selecting mold powders to optimise continuous cast steel quality*. Industrial Heating, April 1986, 16-19 p.

LIN, K. J.; CHUNG, Y.H. *Selection of casting powder China Steel Technical Report*, N°6, 1992. pp 71-79

MARTINS, R. S.; OLIVEIRA, L. J. S.; DIEGO, A. A.; CUNHA, E. P.; SEMINÁRIO DE ACIARIA - INTERNACIONAL, 47, 26 a 30 de setembro. *Desempenho industrial de pó fluxante com teor reduzido de flúor para aços com baixo teor de carbono*. Rio de Janeiro, RJ 2016.

MENG, Y., THOMAS, B.G., Proc. ISS Tech., Indianapolis, 2003 (ISS, Warrendale, PA, 2003) p. 589.

MILLS, K. C. *Continuous casting powders and their effect on surface quality and sticker breakouts*. Molten Slags, Fluxes and Salts '97 Conference, 1997, 675-682 p.

MILLS, K. C. *Structure and properties of slags used in the continuous casting of steel: Part 2 specialist mould powders*. ISIJ International, Vol. 56 (2016), No. 1, pp. 14–23.

MILLS, K. C.; DACKER, C. *The Casting Powders Book*, DOI 10.1007/978-3-319-53616-3_2, Springer International Publishing AG 2017

MILLS, K. *Mold powder for continuous casting*. Course sponsored by IAS, (Instituto Argentino de Siderurgia), San Nicolas, Argentina, published by IAS, August 2003.

MILLS, K. *Mold powders for continuous casting*. Center for Materials Measurement and Technology National Physical Laboratory. Department of Materials, Imperial College, London 2000.

MOORE, J. A.; PHILLIPS R.J.; GIBBS T.R. *An overview for the requirements of continuous casting mold fluxes*. Steelmaking Conference Proceedings, 1991, pp 615-621

NAKATO, H. SAKURAYA T., NOZAKI T., EMI T., NIKOSHAWA H. *Mould fluxes for continuous casting and bottom pour teeming* (ISS, Warrendale, PA, 1987) p. 23.

NAKATO, H.; TAKAEUCHI S.; NOSAKI T. *Characteristics of new mold fluxes for strand casting of low and ultra low carbon steel slabs* Steelmaking Conference Proceedings – 1991. pp 639-646

NAKATO, H.; et al. *Physical and chemical properties of casting powders affecting the mold lubrication during continuous casting*. ISS, 1987.

NEUMANN, F. et al. *Mould fluxes in high speed thin slab casting*. ASIA Steel, 1997, 172 p.

NORMANTON, A, S; LUDLOW, V; HARRIS, B; et. ali. *Mould powder consumption, melting and lubrication and their effects on mould heat transfer and subsequent surface quality of continuously cast slab*. European Commission, Technical steel research. Contract No 7210-PR/273, 1 July 2001 to 30 June 2004.

OGIBAYASHI S., YAMAGUCHI K., MUKAT T., TAKAHASHI T., MIMURA Y., KOYAMA K., NAGANO Y., NAGANO T. *Mold Powder Technology for Continuous Casting of low-Carbon Aluminum-Killed Steel*. Nippon Steel Technical Report, 34, 1, (1987).

OGIBAYASHI, S., MIZOGUCHI T., KAJATANI T., Intl. Workshop on Thermophys. *Data for the Development of Mathematical models of solidification*, Gifu City, Japan (1995).

OLIVEIRA, L. J. S.; et alli. *Desenvolvimento de metodologia para caracterização de pós fluxantes*. 2007. Relatório de P&D (RPPQ05103) – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais.

OLIVEIRA, L. J. S.; LIMA, M. T. D.; RODRIGUES, F. D.; VALADARES, C. A. G.; DIEGO, A. A.; SEMINÁRIO DE ACIARIA - INTERNACIONAL, 42, 15 a 18 de maio. *Avaliação da extração de calor no molde de lingotamento contínuo utilizando*

diferentes pós fluxantes. Salvador, BA 2011. Disponível em: <CT479.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2018.

OLIVEIRA, L. J. S. et al. *Análise da incorporação de Al_2O_3 em pó fluxante utilizado para lingotamento de aços alto alumínio*. 2010. Relatório de P&D (RAMR8453) – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais.

OLIVEIRA, L. J. S.; NASCIMENTO, A. A.; LIMA, M. T. D.; TAVARES, R. P. *Comportamento de cristalização dos filmes de pós fluxantes no molde de lingotamento contínuo*. Seminário de Aciaria - Internacional; 41 Resende, RJ, ABM 2010. Disponível em: <CT423.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2018.

RAMIREZ-LOPEZ, P.E., MILLS K.C., LEE P.D., SANTILANNA B., *A New Approach for Modelling Slag Infiltration and Solidification in a Continuous Casting Mould*. ISIJ Intl., 30, 1797, (2010).

RAMIREZ-LOPEZ, P.E., MILLS K.C., LEE P.D., SANTILANNA B., *A Unified Mechanism for the Formation of Oscillation Marks*. Met. Mater. Trans. 43, 109, (2011).

REIS, R. F.; OLIVEIRA, L. J. S.; NASCIMENTO, A. A. *Investigação da composição química dos aços S700MC/LN700 no desempenho do pó fluxante*. 2017. Relatório de P&D (RAMR013931) – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais.

RIBOUD, P. V.; ROUX L.D.L.; GAYE H. *Improvement of continuous casting powders* Fachberichte Hüttenpraxis Metallweiterverarbeitung N°10 (1981) pp 859-869.

SARASWAT R., FOX A.B., MILLS K.C., LEE P.D., DEO B., SCAND. J. *The factors affecting powder consumption of mould fluxes*. Met., 33, 85, (2004). SHIMIZU, S., IMADA Y. et al., Proc. 6th Intl. Iron and Steel Congress (1990) p. 487.

SHIN, H.J., KIM S.H., THOMAS B.G., LEE G.G., PARK J.M., SENGUPTA J., *Measurement and Prediction of Lubrication, Powder Consumption, and Oscillation Mark Profiles in Ultra-low Carbon Steel Slabs*. ISIJ Intl., 46, 1635,(2006).

SRIDHAR, S.; MILLS K.C.; MALLABAND S.T. *Powder consumption and melting rates of continuous casting fluxes*. Ironmaking and Steelmaking, (2002), Vol 29, N° 3, pp 194-198.

SRIDHAR, S. *Pertinent Properties for Metals and Slags in Continuous Casting*. The Making, shaping and treating of steel. AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA, 2003.cap. 2

STURGILL, D. *Mold fluxes for continuous casting: theory and workshop*. Urbana: CV Materials, Ltd., 1999. 1v.

SUPRADIST, M., CRAMB, A. W., SCHWERDTFEGER, K. *Combustion of Carbon in Casting Powder in a Temperature Gradient*. ISIJ International, Vol. 44 (2004), No. 5, pp. 817–826

SUZUKI, M., MIZUKAMI H., KITAGAWA T, KAWAKAMI K, UCHIDA S, KOMATSU Y., *Development of a New Mold Oscillation Mode for High-speed Continuous Casting of Steel Slabs*. ISIJ Intl., 31, 254-261, (1991).

SUZUKI, M., MIYAHARA, S., KITAGAWA, T., UCHIDA, S., OKIMOTO, K., *Effect of Mold Oscillation Curves on Heat Transfer and Lubrication Behaviour in Mold at High Speed Continuous Casting of Steel Slabs*. Tetsu-to Hagane, 78, 113, (1992).

SWARTZ K. E., HIBBELER L. C., JOYCE B. P., and THOMAS B. G. “*Numerical Investigation of Slag Entrainment in Continuous Casting Molds*,” Proc. AISTech 2014.

THOMAS, B.G., MOITRA A., MCDAVID R., *Simulation of Longitudinal off - Corner Depressions in Continuously - Cast Steel Slabs*. Iron and Steelmaker, 23 (4), 51 (1996).

THOMAS, B. G., SHIN, H. J. CHOI, W. Y., KANG, S. M., PARK, J.H., KIM, S. H. *Effect of Mold Oscillation on Powder Consumption and Hook Formation in Ultra Low Carbon Steel Slabs. AISTech - 2004*, Nashville.

TSUTSUMI, K., MURAKAMI H., NISHIOKA S., TADA M., NAKADA M., KOMATSU M., *Estimation of Mold Powder Consumption in Continuous Casting*. Tetsu- to- Hagane, 84, 617, (1998).

TSUTSUMI K., NAGASAKA T., HINO M., *Surface Roughness of Solidified Mold Flux in Continuous Casting Process*. ISIJ Intl., 39, 1150, (1999).

TURKDOGAN, E. T. *Physicochemical properties of molten slags and glasses*. United States Steel Corporation Research Laboratory. Monroeville, Pennsylvania, 1983.

VALADARES, C. A. G.; BEZERRA, M. C. C. *Fluxantes para lingotamento contínuo*. In: VALADARES, C. A. G. (Orgs.). *Lingotamento contínuo de placas*. São Paulo: ABM, 2006. cap. 5, p. 92-111.

WANG, Z.; SUN, Y.; SRIDRAR, S.; ZHANG, M.; ZHANG, Z. *Investigation on viscosity and nonisothermal crystallization behavior of P-bearing steelmaking slags with varying TiO₂ content*. Metallurgical and Materials Transactions B. 2016. DOI: 10.1007/s11663-016-0825-

WOLF, M., Proc. Conf. *Continuous casting of steel in developing countries*, Beijing, China (1994) p. 69.

WOLF, M. *Mould powder consumption – a useful tool* METEC Congress 1994, 2nd European Continuous Casting Conference, Düsseldorf, Germany, 20-22 June 1994, 78 p.

ZHANG, L. *et al.* *Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting*. Metallurgical and Materials Transactions B, vol.38B, p.63-83, 2007.

ZHOU, L.; WANG, W.; ZHOU, K. *Effect of Al₂O₃ on the Crystallization of Mold Flux for Casting High Al Steel*. ASM International (ASM) and The Minerals, Metals & Materials Society (TMS) 2015.