



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**Análise da Influência de Alguns Parâmetros Sobre Tempo de Mistura,
Taxa de projeção e Emulsão em um reator BOF**

Pedro Henrique Silva

Ouro Preto, dezembro de 2018.

Pedro Henrique Silva

**Análise da influência de alguns parâmetros sobre tempo de mistura, taxa de
projeção e emulsão em um reator BOF**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Carlos Antônio Silva, PhD.

Dezembro de 2018.

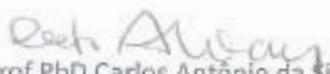


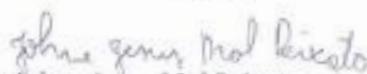
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

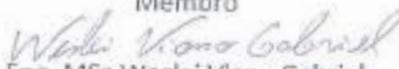
ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

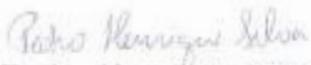
Aos 20 dias do mês de dezembro de 2018, às 15horas, no Laboratório de Pirometalurgia - DEMET – Campus Morro do Cruzeiro, foi realizada a defesa de monografia de graduação em Engenharia Metalúrgica pelo aluno **Pedro Henrique Silva**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Carlos Antonio da Silva (Presidente), Johne Jesus do Mol Peixoto e pelo Doutorando Wesley Viana Gabriel (REDEMAT). O aluno apresentou a monografia intitulada *“Análise da Influência de Alguns Parâmetros Sobre Tempo de Mistura, Taxa de projeção e Emulsão em um reator BOF”*. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno um prazo de 15 dias para incorporar, ao texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata, que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo aluno.

Ouro Preto, 20 de dezembro de 2018.


Prof PhD Carlos Antônio da Silva
Orientador – Presidente


Prof. MSc Johne Jesus Mol Peixoto
Membro


Eng. MSc Wesley Viana Gabriel
Membro - Doutorando REDEMAT


Pedro Henrique Silva
Aluno

RESUMO

Para se explorar ao máximo as vantagens da utilização do sopro combinado nos convertedores, parâmetros operacionais e geométricos devem ser otimizados de modo a conseguir uma boa combinação de condição de homogeneização, projeções (*splashing* e *spitting*) e emulsão controladas. Neste trabalho, avaliou-se a influência das vazões pelo fundo, pela lança, do ângulo de rotação da lança em relação às ventaneiras e do número de ventaneiras, sobre tempo de mistura, taxa de projeção e formação de emulsão, via modelagem física (modelo BOF escala 1:15). As determinações de tempo de mistura foram feitas por meio da injeção de um traçador. As taxas de projeção foram medidas pela variação do peso de um feltro devido à absorção das gotículas de água ejetadas. Nesses casos, água foi utilizada para simular o comportamento do aço e ar comprimido para o comportamento do oxigênio e dos gases inertes. Para modelagem da emulsão, utilizou-se uma solução de ácido acético 4% para simular o comportamento do aço e uma mistura de óleos de motor 10W30 e querosene com bicarbonato de sódio em dispersão para simular a escória. Avaliou-se a diferença de altura máxima e evolução do crescimento da camada de espuma. Observou-se que a vazão de fundo é o fator de maior influência no tempo de mistura e o aumento da vazão pela lança é o principal responsável pelo aumento da taxa de projeção, havendo, porém, relevância da interação jato/pluma. Verificou-se que a formação de bolhas de gás *in situ* é fundamental para formação de emulsão. Não houve considerável diferença entre a altura máxima atingida dos arranjos de ventaneiras analisados, mas o de menor número resultou em evolução mais rápida da emulsão.

Palavras-chave: Tempo de mistura; Taxa de projeção; Emulsão; Modelagem física.

ABSTRACT

In order to explore to the most the advantages of combined blowing technology, operational and geometrical parameters have to be optimized to provide better mixing conditions, controlled splashing, spitting and slag foaming. The purpose of this study is to assess the influence of top blowing, bottom blowing and top lance rotation on mixing time, spitting and slag foaming through physical modelling (BOF 1:15 model). Mixing time has been determined through injection of tracer and conductivity measurements. Spitting was measured through weight variation due to droplets trapped in a cloth positioned above the physical model. In these cases, water was used to simulate steel bath and air was used to simulate oxygen and inert gases. Slag foaming modelling required an acetic acid solution (4%) in place of water and a combination of oils (10W30 engine oil and kerosene) with sodium hydrogen carbonate to simulate slag. *In situ* gas generation through chemical reactions was observed to be fundamental to obtain foaming. Maximum height and foam thickness were measured. Bottom blowing appears to be the most importante parameter in both mixing time and slag foaming. Increases in top blowing are responsible for increases in spitting rate, however, jet/plume interactions must be taken into account. The number of bottom tuyeres has not shown considerable influence on maximum foam height but the six nozzle arrangement achieved maximum height faster. Operational conditions wich resulted in higher spitting rates achieved higher values of maximum foam height.

Keywords: Mixing time; spitting rate; slag foaming; cold modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esquema dos testes realizados por Murthy e Elliot (1992).	14
Figura 3.2 - Concentração adimensional x tempo para uma vazão de gás de $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ em um banho com diâmetro de 0,63m e altura de 0,58m.....	15
Figura 3.3 - Vista lateral das diferentes inclinações das ventaneiras: a) 90° em relação ao fundo do modelo; b) 60° em relação ao fundo do modelo; c) 60° em relação às paredes do modelo.	16
Figura 3.4 - Vista de topo da distribuição de ventaneiras e diferentes inclinações, sendo a) P1; b) P2; c) P3.	16
Figura 3.5 - a) Bico da lança utilizado nos testes de Gasparini (2011) e Gabriel (2009); b) esquema da vista de topo do bico torcido; c) vista lateral.	16
Figura 3.6 - Efeito da variação dos parâmetros operacionais distância lança-banho, vazão pelas ventaneiras e vazão pela lança sobre o tempo de mistura – QF refere-se á vazão de fundo; QT refere-se à vazão pela lança; dlb refere-se à distância lança banho.....	17
Figura 3.7 - Resultados do tempo de mistura evidenciando torção da lança para ventaneiras na posição P1.....	17
Figura 3.8 - Resultados do tempo de mistura evidenciando torção da lança para ventaneiras na posição P2.....	18
Figura 3.9 - Resultados do tempo de mistura evidenciando torção da lança para ventaneiras na posição P3.....	19
Figura 3.10 - Configurações simétricas de ventaneiras estudadas por Lai et al. (2008).	19
Figura 3.11 - Configurações assimétricas de ventaneiras estudadas por Lai et al. (2008).	20
Figura 3.12 - Tempo de mistura em função da vazão de fundo para diferentes distâncias lança banho no arranjo 1 de ventaneiras - QB, m refere-se à vazão de fundo; T refere-se ao tempo de mistura; hL, m refere-se à distância lança-banho.....	21
Figura 3.13 - Tempo de mistura em função da vazão de topo para os arranjos assimétricos - QB, m refere-se à vazão de fundo; T refere-se ao tempo de mistura; QT, m refere-se à vazão pela lança.	21
Figura 3.14 - Tempo de mistura em função da vazão de fundo para o arranjo 6 - QB, m refere-se à vazão de fundo; T refere-se ao tempo de mistura; hL, m refere-se à distância lança-banho	22

Figura 3.15 - Posições da lança e configurações de sopro pelo fundo (LP1 e LP2 referem-se às posições de incidência do jato da lança; 3N, 4N e 5N referem-se ao número de ventaneiras).	23
Figura 3.16 - Tempo de mistura medido como função da vazão de gás pelo fundo.	23
Figura 3.17 - Tempo de mistura para sopro combinado e somente pelo fundo.	24
Figura 3.18 - Lança normal (à esquerda) e lança com furos torcidos (à direita).....	25
Figura 3.19 - Aparato experimental utilizado por Higuchi e Tago (2003).....	26
Figura 3.20 - Aparato experimental utilizado por Gasparini (2011) nos testes de projeção.	27
Figura 3.21 - Variação da massa do feltro em função do tempo de sopro.	28
Figura 3.22 - Resultados dos testes de projeção com indicação das condições operacionais. .	28
Figura 3.23 - Distribuição de ventaneiras e posição relativa aos furos no bico da lança – (1) corresponde a 0° de torção da lança, (1') corresponde a 20° de torção da lança e (1'') corresponde a 40° de torção da lança.	29
Figura 3.24 - Aparato experimental.....	30
Figura 3.25 - Arranjo de ventaneiras no fundo e interação com as cavidades da lança na superfície do banho.....	31
Figura 3.26 - Projeção nas paredes do modelo para diferentes arranjos de ventaneiras em função da distância lança-banho/altura da lança.	32
Figura 3.27 - Total de projeção e grau de sobreposição das cavidades das lança e plumas para distância lança-banho (h) de 0,22m.....	33
Figura 3.28 – Figura esquemática da direção de projeção sem (a) e com interação entre o jato da lança e a pluma (a)	34
Figura 3.29 - Taxa de projeção na parte superior do modelo para diferentes arranjos de ventaneiras em função da distância lança-banho.....	35
Figura 3.30 - Esquema da montagem dos testes de emulsão de Ito e Fruehan (1989a).....	37
Figura 3.31 - Ilustração da emulsão. Qg é a vazão de gás.....	38
Figura 3.32 - (a) Relação entre altura de emulsão e vazão de gás para diferentes diâmetros de cadinho; (b) Relação entre altura de emulsão e velocidade superficial do gás para diferentes diâmetros de cadinho.	39
Figura 3.33 - Esquema do aparato experimental utilizado por Jiang e Fruehan (1991).....	41
Figura 3.34 - Aparato experimental para análise da influência de parâmetros relacionados à emulsão.....	42
Figura 4.1 - Desenho do modelo bipartido utilizado: (a) Vista isométrica; (b) Vista frontal; (c) Vista superior. Dimensões em milímetros.....	43

Figura 4.2 - Fundo do modelo em acrílico e distribuição de ventaneiras. Dimensões em milímetros.....	44
Figura 4.3 - Desenhos do bico da lança: a) Vista frontal; b) Vista trimétrica; c) Vista superior.	44
Figura 4.4 - Esquema da posição relativa entre bicos da lança e ventaneiras.	45
Figura 4.5 - Esquema da montagem para os testes de tempo de mistura.	47
Figura 4.6 - Curva típica de dispersão de um traçador.....	48
Figura 4.7 - Fundo do modelo e distribuição das 12 ventaneiras	49
Figura 4.8 - Esquema das configurações analisadas nos testes de tempo de mistura.....	50
Figura 4.9 - Esquema de montagem dos testes para medição de projeção.....	51
Figura 4.10 - Exemplo de feltro utilizado nos testes de projeção.....	52
Figura 4.11 - Fotografia da montagem dos testes de projeção.	52
Figura 4.12 - Curva típica do teste de projeção – variação do peso medido x tempo.	53
Figura 4.13 - Curva típica de um teste de projeção depois de eliminada a região de saturação do feltro – variação do peso medido x tempo.....	53
Figura 4.14 - Esquema das configurações analisadas nos testes de projeção.....	54
Figura 4.15 - Plano de testes de emulsão.	56
Figura 4.16 - Esboço do modelo destacando a espessura da camada de espuma (parâmetro H_{max}) medida.	57
Figura 5.1 - Tempo de mistura (A) em função de configuração de operação evidenciando a influência do ângulo de rotação da lança, 6 ventaneiras.	58
Figura 5.2 - Tempo de mistura (B) em função da configuração de operação evidenciando a influência do ângulo de rotação da lança, 6 ventaneiras.	59
Figura 5.3 - Tempo de mistura (A) em função de condição de operação evidenciando a vazão pela lança, 6 ventaneiras.....	60
Figura 5.4 - Tempo de mistura (B) em função de condição de operação evidenciando a vazão pela lança, 6 ventaneiras.....	60
Figura 5.5 - Tempo de mistura (A) em função da condição de operação evidenciando a vazão pelo fundo, 6 ventaneiras.....	61
Figura 5.6 - Tempo de mistura (B) em função da condição de operação evidenciando a vazão pelo fundo, 6 ventaneiras.....	62
Figura 5.7 – Tempo de mistura (A) em função da condição de operação evidenciando influência do número de ventaneiras.	63

Figura 5.8 - Tempo de mistura (B) em função de condição de operação evidenciando a influência do número de ventaneiras.	64
Figura 5.9 - Gráficos de interação para tempo de mistura, 6 ventaneiras.	65
Figura 5.10 - Gráficos de efeitos principais para tempo de mistura, 6 ventaneiras.....	65
Figura 5.11 - Taxa de projeção média em função do ângulo de rotação da lança destacando vazão pelo topo, 6 ventaneiras.....	66
Figura 5.12 - Taxa de projeção média em função do ângulo de rotação da lança destacando vazão pelo fundo, 6 ventaneiras.	67
Figura 5.13 - Gráfico de efeitos principais para taxa de projeção, 6 ventaneiras.....	68
Figura 5.14 - Gráfico de interação sobre taxa de projeção, 6 ventaneiras.....	68
Figura 5.15 - Ilustrações dos ensaios de bancada visando otimização das características do óleo para simular emulsão - (a) Óleo de motor 10W30 e querosene, proporção 1:1; (b) Querosene; (c) Óleo de motor e querosene, proporção 3:1.	69
Figura 5.16 - Emulsão para (a) 6 ventaneiras, 200L/min pela lança e 30L/min pelas ventaneiras e (b) 12 ventaneiras, 200L/min pela lança e 30L/min pelas ventaneiras.	70
Figura 5.17 - Espessura máxima da camada de espuma em função de condições operacionais (vazões pela lança e pelo fundo) para 6 e 12 ventaneiras.....	72
Figura 5.18 - Espessura da camada de espuma na parte superior (cilíndrica) do modelo em função do tempo para 6 e 12 ventaneiras com vazões pela lança e pelo fundo fixas em 200 L/min e 30 L/min respectivamente.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Correspondência de configuração e parâmetros relativos aos resultados apresentados nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.	18
Tabela 3.2 - Resumo das condições físicas e geométricas simuladas.	29
Tabela 3.3 - Propriedades físicas das soluções aquosas utilizadas por Stadler et al. (2006) para análise da formação de emulsão.	42
Tabela 4.1 - Grupos adimensionais considerados para modelagem.....	46
Tabela 4.2 - Variáveis analisadas nos testes de tempo de mistura	48
Tabela 5.1 - Configuração de teste, 6 ventaneiras	59
Tabela 5.2 - Configuração de teste, 6 ventaneiras.....	61
Tabela 5.3 - Configurações de teste, 6 ventaneiras.	62
Tabela 5.4 – Configurações de teste	64
Tabela 5.5 – Medições de viscosidade, densidade e tensões interfaciais.....	70
Tabela 5.6 - Configurações e medições de altura máxima.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo Geral.....	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1	Tempo de Mistura	13
3.2	Taxa de projeção	25
3.3	Emulsão	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1	Tempo de Mistura	58
5.2	Taxa de Projeção.....	66
5.3	Emulsão	69
6	CONCLUSÃO	74
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais rotas de produção de aço no mundo é via forno básico a oxigênio (BOF – *Basic Oxygen Furnace*) com sopro combinado. O reator consiste em um vaso contendo o banho metálico no qual se sopra oxigênio através de uma lança de topo para oxidação de impurezas e gás inerte através de ventaneiras no fundo para homogeneização do banho.

A demanda de produtos de melhor qualidade e menor custo implica na necessidade de constantes melhorias em termos de parâmetros operacionais e geométricos de modo a aprimorar gradativamente a operação de refino primário nos convertedores e aumentar a produtividade.

A produtividade de um BOF é ditada fundamentalmente pela taxa de descarburização, que tende a aumentar com o aumento da vazão de oxigênio pela lança. No entanto, o simples aumento da vazão eleva a taxa de projeção, podendo provocar transbordamento da emulsão gás/metálico/escória, e conseqüente perda em rendimento metálico (GASPARINI, 2011), além de aumentar o desgaste do revestimento refratário.

A realização de testes na planta industrial esbarra em dificuldades práticas, econômicas e de segurança que dificultam a exploração de alternativas e melhorias nos parâmetros operacionais do processo. Dessa forma, torna-se fundamental a realização de estudos em escala de laboratório a partir de modelagem física e matemática de modo a nortear a prática industrial.

Nesse contexto, este estudo foi realizado com o intuito de analisar a influência do ângulo de rotação da lança e disposição de ventaneiras (fatores geométricos), vazão pela lança e pelas ventaneiras (fatores operacionais) sobre tempo de mistura, taxa de projeção e formação de emulsão por modelagem física a frio do processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência de alguns parâmetros geométricos e operacionais sobre o tempo de mistura, taxa de projeção e emulsão em um convertedor de sopro combinado via modelagem física.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da vazão pela lança, vazão pelo fundo e ângulo de rotação da lança em relação às ventaneiras sobre o tempo de mistura;
- Analisar a influência da vazão pela lança, vazão pelo fundo e ângulo de rotação da lança em relação às ventaneiras sobre a taxa de projeção.
- Determinar como a formação de emulsão é afetada por vazão pela lança, vazão pelo fundo e número de ventaneiras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tempo de Mistura

A junção da técnica de sopro de oxigênio pela lança com a injeção de gás inerte pelo fundo é largamente utilizada nos convertedores com o intuito de promover melhor condição de agitação e homogeneização do banho (LAI et al., 2008). Uma combinação adequada de fatores operacionais e geométricos nos convertedores leva a menores tempos de mistura (LAI et al., 2008) e conseqüentemente a uma maior taxa de descarburização, menor perda metálica, maior tempo de vida da lança e menor desgaste de refratários (LUOMALA et al., 2004). Neste contexto, vários estudos têm sido realizados via modelagem física e matemática buscando a otimização das condições operacionais desses reatores.

A metodologia mais utilizada para determinação do tempo de mistura em modelos físicos com água para simular o comportamento do banho e ar para simular os gases é através da injeção de um traçador e medição da condutividade do líquido em função do tempo. Luomala et al. (2004), Singh et al. (2007), Lai et al. (2008), Gabriel (2009), Gasparini (2011) entre outros pesquisadores fizeram determinações de tempo de mistura usando essa metodologia.

Segundo Murthy e Elliot (1992), o tempo de mistura pode ser definido como sendo o tempo necessário para se atingir o grau desejado de homogeneidade em todas as partes do banho. O grau de homogeneidade desejado é expresso em função do grau de mistura, 'Y' (Equação 3.1), que é a medida da extensão da mistura no banho (DANKWARTS, 1981 apud MURTHY e ELLIOT, 1992).

$$Y = 1 - I_s \quad (3.1)$$

Onde I_s é a intensidade de segregação do elemento traçador, podendo ser expresso pela Equação 3.2:

$$I_s = \frac{C_\infty - C(t)}{C_\infty - C_0} \quad (3.2)$$

Onde C_∞ e C_0 são as concentrações final e inicial médias e uniformes, respectivamente. $C(t)$ é a concentração uniforme de traçador em qualquer porção infinitesimal (relativamente ao

volume total, mas grande o bastante quando comparado ao tamanho do condutivímetro do banho no instante t (MURTHY e ELLIOT, 1992).

O banho é dito estar completamente homogêneo quando $Y = 1$ em qualquer ponto do volume. No entanto, não é possível alcançar mistura completa (em nível molecular) dentro de intervalos de tempo praticáveis e convém, portanto, arbitrar-se um valor de 'Y' para se considerar a mistura de traçador completa, como por exemplo, 0,95. Dessa forma, a comparação dos tempos de mistura em diferentes condições na literatura só é possível para trabalhos nos quais se tem o mesmo valor de 'Y' (MURTHY e ELLIOT, 1992).

Murthy e Elliot (1992) fizeram medições do tempo de mistura com o intuito de avaliar as diferenças entre os perfis de condutividade devido à posição dos condutivímetros e ponto de injeção de traçador e demonstrar o equívoco de outros pesquisadores em comparar seus resultados de tempos de mistura com outros da literatura sem a devida avaliação do grau de mistura 'Y' considerado. A Figura 3.1 mostra um esquema da montagem utilizada por esses pesquisadores.

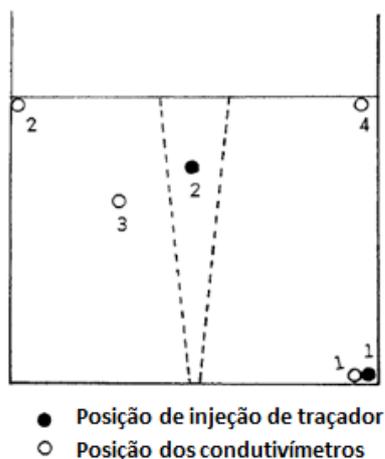


Figura 3.1 - Esquema dos testes realizados por Murthy e Elliot (1992).

A Figura 3.2 mostra algumas das curvas obtidas por Murthy e Elliot (1992), destacando a diferença no perfil de condutividade medidos em função da posição de injeção de traçador bem como a localização do condutivímetro.

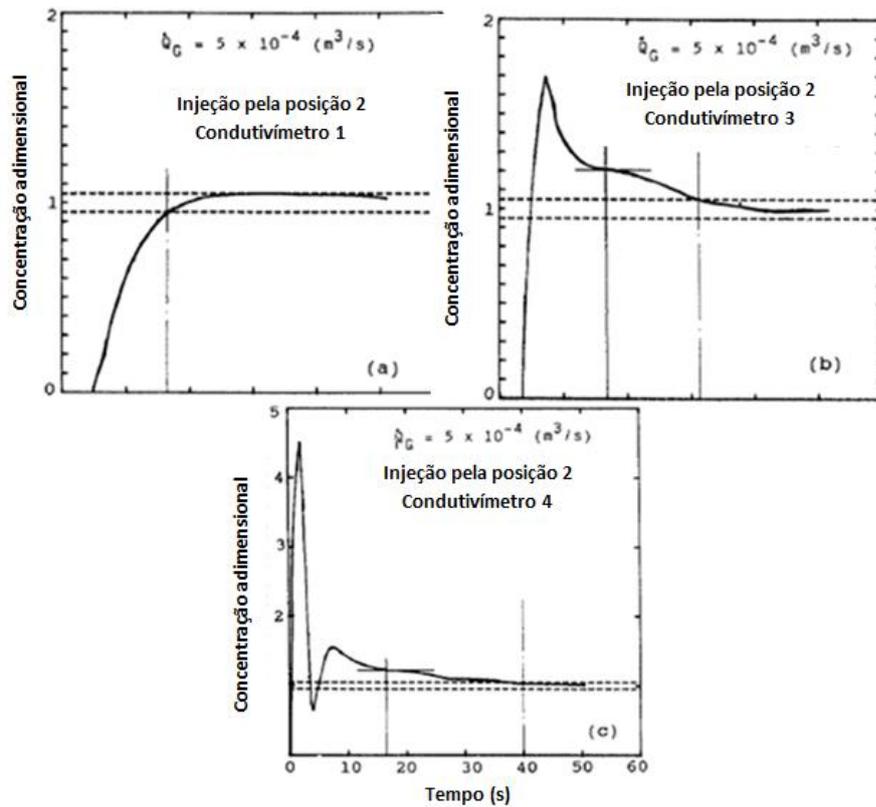


Figura 3.2 - Concentração adimensional x tempo para uma vazão de gás de $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ em um banho com diâmetro de 0,63m e altura de 0,58m (MURTHY e ELLIOT, 1992).

Gasparini (2011) realizou vários testes para medição de tempo de mistura por essa mesma metodologia analisando a influência da inclinação das ventaneiras, ângulo de torção dos bicos da lança (0° , 10° e 20°), distância lança-banho (12cm, 15cm e 18cm), vazão pela lança (145L/min e 180L/min) e vazão pelas ventaneiras (10L/min, 20L/min e 30L/min). A Figura 3.3 ilustra a vista lateral das inclinações da ventaneiras conforme esse estudo: a condição (a) corresponde ao posicionamento das ventaneiras normal ao fundo do modelo, na condição (b) a inclinação é de 60° relativamente ao fundo do modelo e na condição (c) tem-se uma inclinação de 60° na direção das paredes do modelo.

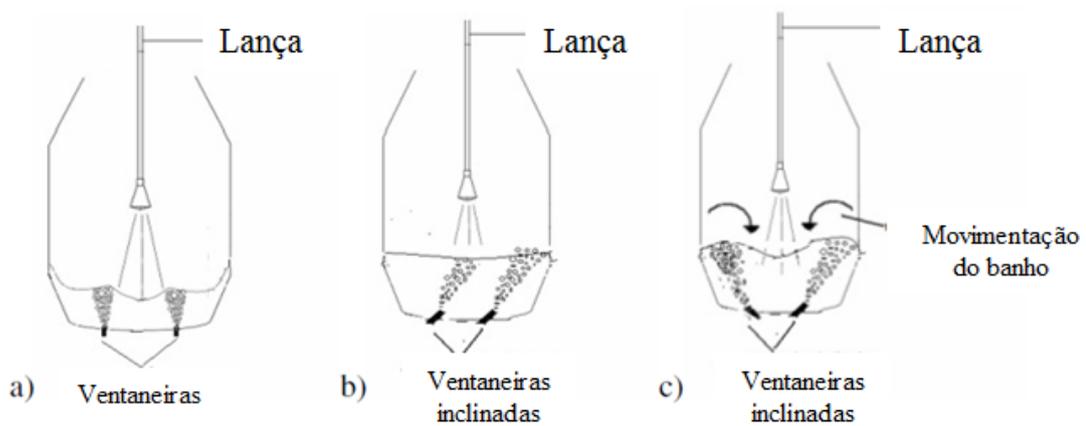


Figura 3.3 - Vista lateral das diferentes inclinações das ventaneiras: a) 90° em relação ao fundo do modelo; b) 60° em relação ao fundo do modelo; c) 60° em relação às paredes do modelo (GASPARINI, 2011; GABRIEL, 2009).

O padrão de distribuição de ventaneiras nesse estudo foi mantido constante, sendo um total de quatro distribuídas conforme a Figura 3.4. O bico da lança utilizada por Gasparini (2011) possui três furos torcidos entre si e inclinados em relação à vertical de um ângulo de aproximadamente 15° (Figura 3.5).

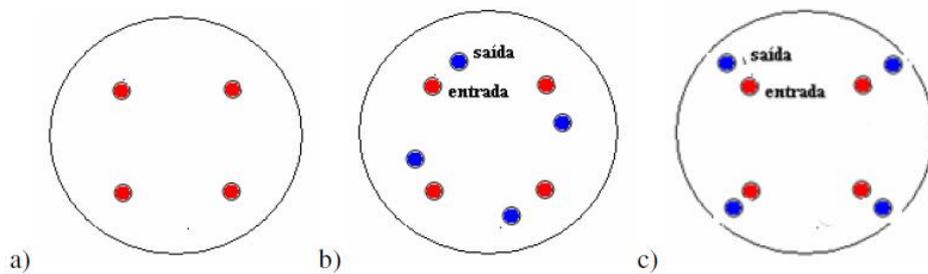


Figura 3.4 - Vista de topo da distribuição de ventaneiras e diferentes inclinações, sendo a) P1; b) P2; c) P3.

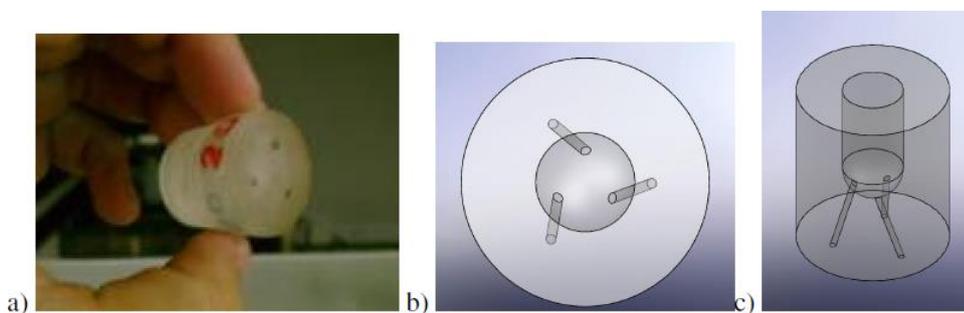


Figura 3.5 - a) Bico da lança utilizado nos testes de Gasparini (2011) e Gabriel (2009); b) esquema da vista de topo do bico torcido; c) vista lateral.

Gasparini (2011) verificou que a inclinação das ventaneiras não apresenta significativa influência sobre o tempo de mistura para nenhuma das combinações dos parâmetros operacionais. Observou também que o aumento da vazão de ar pelas ventaneiras, pela lança e diminuição da distância lança-banho contribuem para a redução do tempo de mistura.

A partir de uma análise DOE (pelo *software* Minitab) mostrada na Figura 3.6 dos dados referentes à posição normal das ventaneiras em relação ao fundo do modelo, o autor afirmou que o tempo de mistura é mais fortemente influenciado pela vazão de fundo do que pelos outros parâmetros analisados.

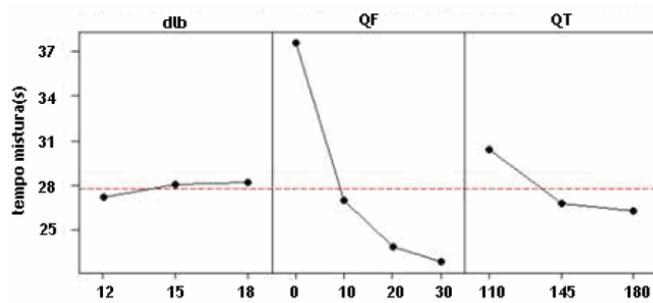


Figura 3.6 - Efeito da variação dos parâmetros operacionais distância lança-banho, vazão pelas ventaneiras e vazão pela lança sobre o tempo de mistura (GASPARINI, 2011) – QF refere-se à vazão de fundo; QT refere-se à vazão pela lança; dlb refere-se à distância lança banho.

A respeito da influência da interação jato-pluma Gasparini (2011) verificou para a inclinação P1 das ventaneiras (normal ao fundo do modelo) uma tendência de melhores tempos de mistura para torção da lança de 0° e 20°(Figura 3.7).

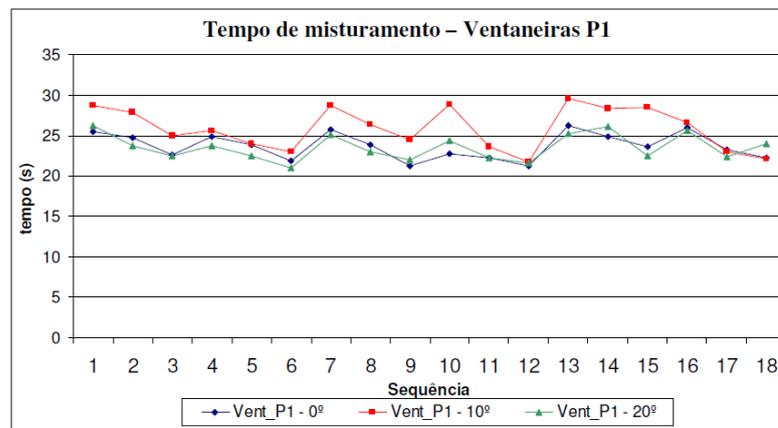


Figura 3.7 - Resultados do tempo de mistura evidenciando torção da lança para ventaneiras na posição P1 (GASPARINI, 2011).

A Tabela 3.1 apresenta a correspondência de configuração e parâmetros relativos aos resultados apresentados nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

Tabela 3.1 – Correspondência de configuração e parâmetros relativos aos resultados apresentados nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
D l b	12	12	12	12	12	12	15	15	15	15	15	15	18	18	18	18	18	18
Q F	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Q T	145	145	145	180	180	180	145	145	145	180	180	180	145	145	145	180	180	180

Fonte: GASPARINI, 2011.

Para a configuração das ventaneiras na posição P2, Gasparini (2011) observou que “há pouca ou nenhuma influência do ângulo de torção sobre o tempo de mistura”. Em algumas combinações o pesquisador afirma haver um pequeno aumento do tempo de mistura para o sistema com torção de 10°, mas isso não ocorreu de forma sistemática. A Figura 3.8 mostra os resultados do tempo de mistura de Gasparini (2011) para a posição P2 das ventaneiras evidenciando a influência do ângulo de torção da lança.

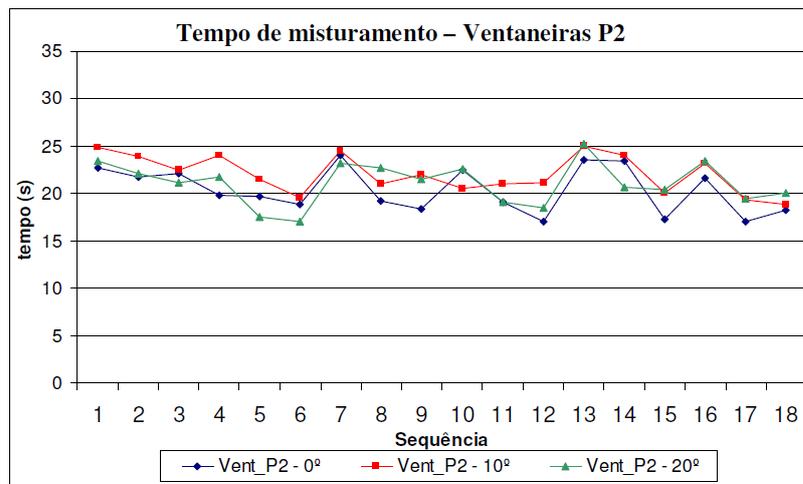


Figura 3.8 - Resultados do tempo de mistura evidenciando torção da lança para ventaneiras na posição P2 (GASPARINI, 2011).

Na posição P3 das ventaneiras, o tempo de mistura é, de modo geral, maior para o sistema com ângulo de torção de 10° relativamente a 0° e 20°, como se pode observar na Figura 3.9. Dessa forma, para esse modelo, o ângulo de torção influi pouco sobre o tempo de mistura relativamente às vazões pela lança e pelo fundo, havendo somente uma tendência para o ângulo de 10° (GASPARINI, 2011).

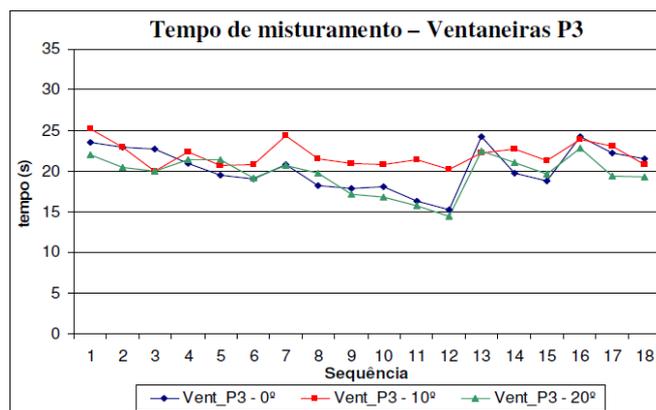


Figura 3.9 - Resultados do tempo de mistura evidenciando torção da lança para ventaneiras na posição P3 (GASPARINI, 2011).

Lai et al. (2008), por outro lado, avaliaram o tempo de mistura para diferentes arranjos de ventaneiras, dividindo-os em simétricos e assimétricos via modelagem física a frio. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram os arranjos estudados.

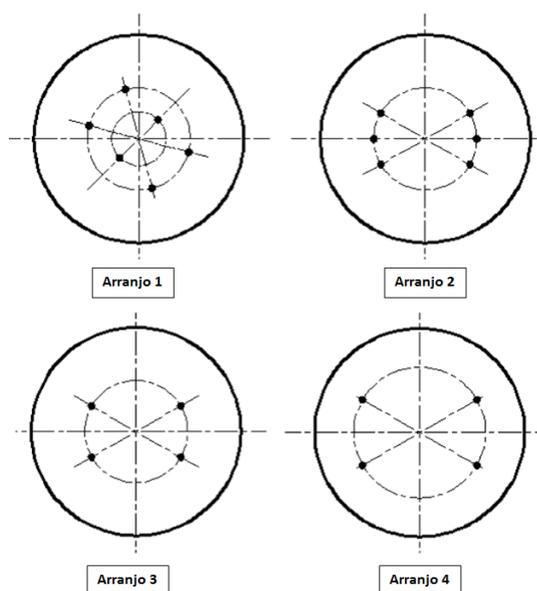


Figura 3.10 - Configurações simétricas de ventaneiras estudadas por Lai et al. (2008).

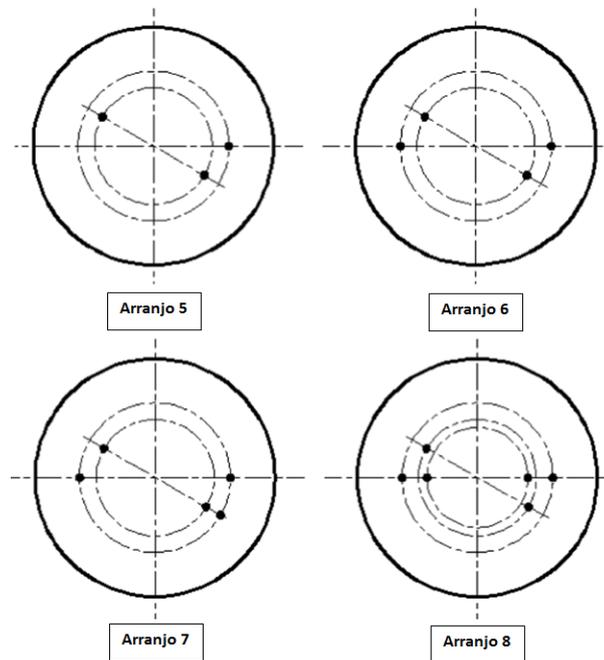


Figura 3.11 - Configurações assimétricas de ventaneiras estudadas por Lai et al. (2008).

Os autores verificaram que, no caso dos arranjos simétricos de ventaneiras, o tempo de mistura diminui com o aumento da vazão pela lança devido ao aumento da agitação do banho, estando todos os valores em uma faixa de 45s a 61s (Figura 3.12). No entanto, nesse tipo de arranjo a vazão pelo fundo adotada não apresenta efeito apreciável sobre o tempo de mistura para a maior parte das distâncias lança-banho avaliadas, como se pode observar na Figura 3.12 devido à interação de algumas plumas com o jato da lança.

No caso dos arranjos assimétricos, Lai et al. (2008) obtiveram tempos de mistura na faixa de 36s a 47s, sendo em todas as condições melhores do que os arranjos simétricos. Na condição de maior vazão de topo (41,0 Nm³/h), observaram que o banho oscila e essa oscilação, tipo “A”, como definido por Kato et al. (1985), deteriora as condições de agitação levando ao prolongamento do tempo de mistura (Figura 3.13).

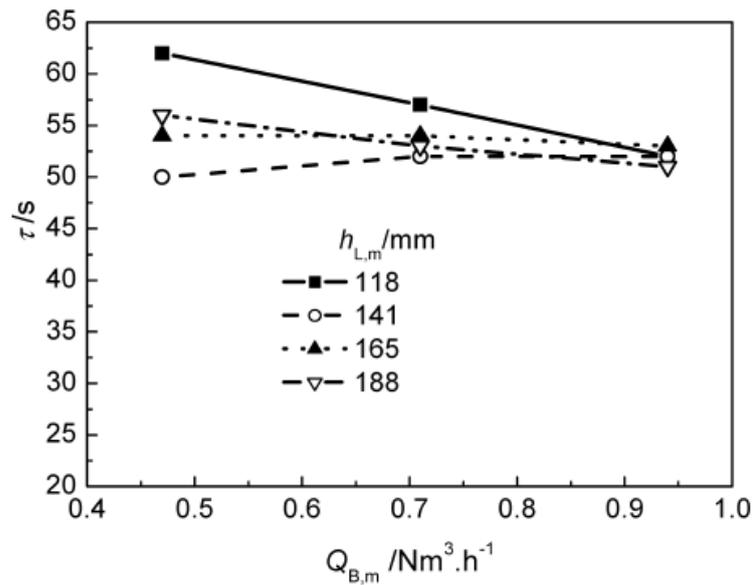


Figura 3.12 - Tempo de mistura em função da vazão de fundo para diferentes distâncias lança-banho no arranjo 1 de ventaneiras (LAI et al., 2008) - $Q_{B,m}$ refere-se à vazão de fundo; T refere-se ao tempo de mistura; $h_{L,m}$ refere-se à distância lança-banho.

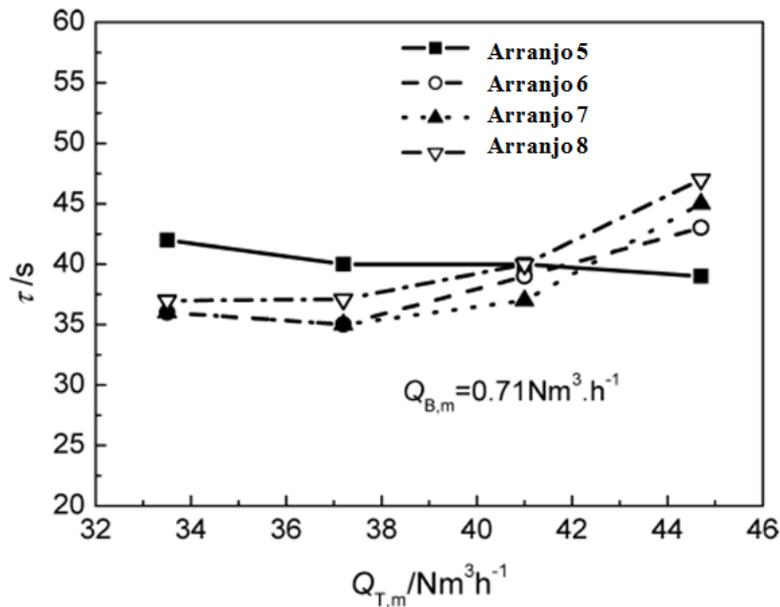


Figura 3.13 - Tempo de mistura em função da vazão de topo para os arranjos assimétricos (LAI et al., 2008) - $Q_{B,m}$ refere-se à vazão de fundo; T refere-se ao tempo de mistura; $Q_{T,m}$ refere-se à vazão pela lança.

A Figura 3.14 mostra que o tempo de mistura com sopro combinado e arranjo “6” de ventaneiras para diferentes distâncias lança-banho diminui com o aumento da vazão de gás pelo fundo para todas as condições avaliadas por Lai et al. (2008). Estes afirmam que os gases

injetados pelo fundo exercem efeito dominante nos convertedores de sopro combinado, uma vez que seu aumento diminui a influência de outros parâmetros como distância lança-banho e vazão pela lança sobre o tempo de mistura mesmo sendo muito menor que a vazão pela lança.

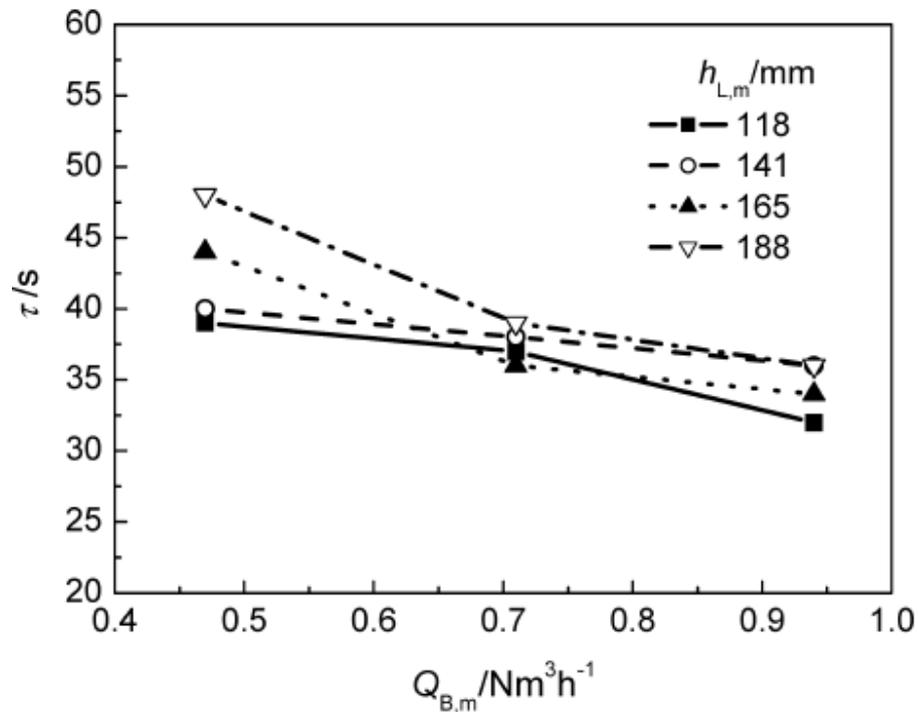


Figura 3.14 - Tempo de mistura em função da vazão de fundo para o arranjo 6 (LAI et al., 2008) - $Q_{B,m}$ refere-se à vazão de fundo; T refere-se ao tempo de mistura; $h_{L,m}$ refere-se à distância lança-banho

Luomala et al. (2004) avaliaram a influência da vazão de gás soprada sobre o tempo de mistura para um arranjos com três, quatro e cinco ventaneiras (Figura 3.15) e também observaram que o aumento da vazão de fundo diminui esse parâmetro ao passo que introduz mais energia cinética e energia de fluatibilidade ao gás injetado (Figura 3.16). O menor tempo obtido nos testes foi no arranjo de três ventaneiras, o que contraria outros estudos que apontam para diminuição do tempo de mistura com o aumento do número de ventaneiras. Luomala et al. (2004) recorreram à explicação de Das et al. (1989) para justificar essa anomalia: segundo os últimos, o aumento do número de ventaneiras pode piorar a homogeneização até um valor crítico a partir do qual passa a melhorá-la, quando ocorre sobreposição de plumas individuais.

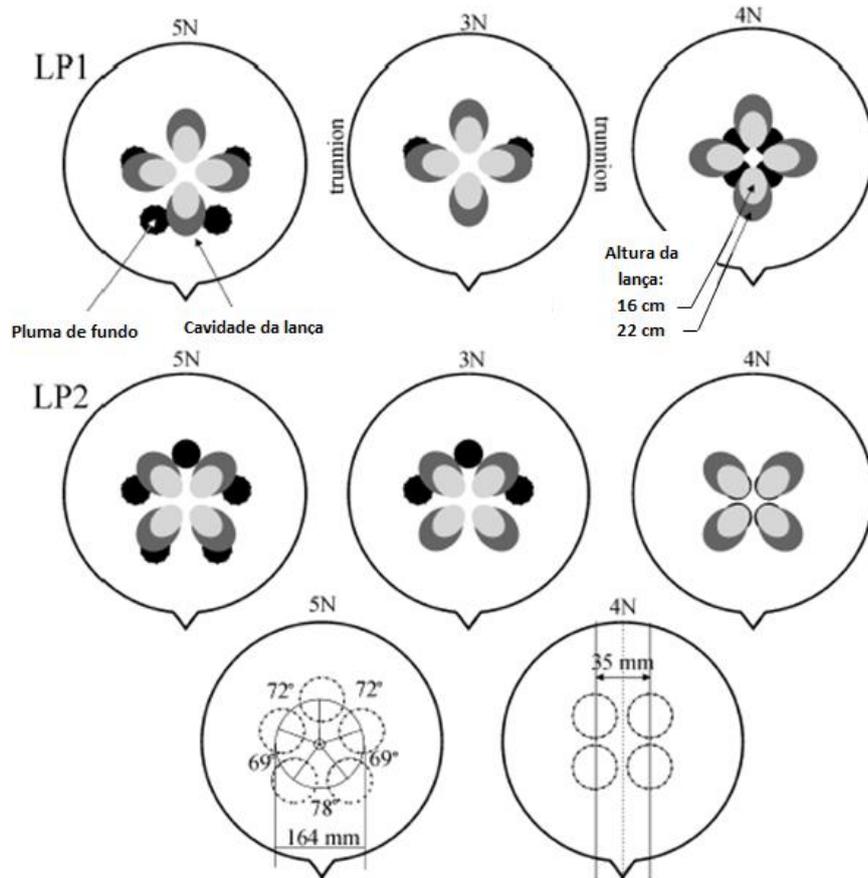


Figura 3.15 - Posições da lanca e configurações de sopro pelo fundo (LUOMALA et al., 2004) (LP1 e LP2 referem-se às posições de incidência do jato da lanca; 3N, 4N e 5N referem-se ao número de ventaneiras).

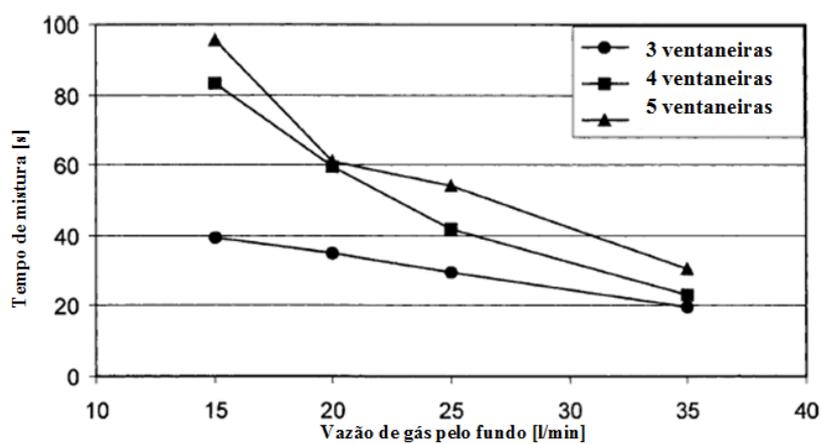


Figura 3.16 - Tempo de mistura medido como função da vazão de gás pelo fundo (LUOMALA et al., 2004).

Outra observação desses pesquisadores que deve ser ressaltada é a ocorrência de menor tempo de mistura em testes sem o sopro combinado, dispondo somente da vazão pelo fundo, como ilustra a Figura 3.17.

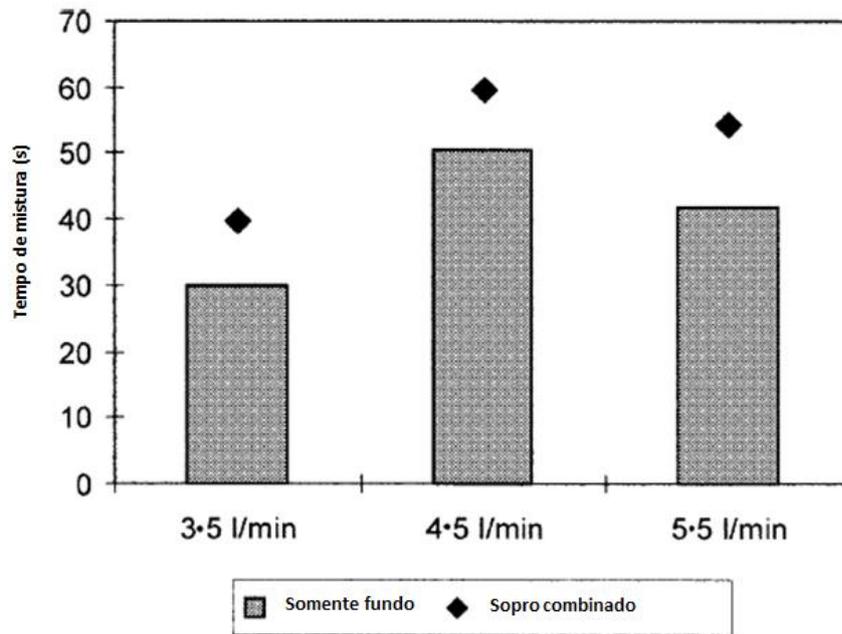


Figura 3.17 - Tempo de mistura para sopro combinado e somente pelo fundo (LUOMALA et al., 2004).

Acredita-se que melhores condições de mistura levam a melhor homogeneização da temperatura e da composição química do banho, melhorando a velocidade das reações ao facilitar o contato de reagentes e aumentar o carregamento dos produtos para longe do local de reação (SINGH et al., 2007). Ao melhorar a cinética das reações, a formação de gases (CO e CO₂) é favorecida, implicando em maior taxa de descarburização e menor tempo de sopro (SANTOS, 2018).

No entanto, o aumento da agitação provoca elevação da taxa de projeção de metal e escória para fora do reator (*spitting*), agarramento de material na boca do forno (*skulling*) e o transbordamento da emulsão (*splashing*), diminuindo o rendimento metálico e aumentando riscos operacionais e ambientais (SANTOS, 2018). Além disso, o ajuste de parâmetros operacionais e geométricos considerando somente a otimização do tempo de mistura pode levar ao aumento indesejável do desgaste do revestimento refratário.

Dessa forma, a implementação de modificações operacionais no refino primário baseadas somente na otimização do tempo de mistura podem ter uma série de efeitos indesejáveis,

devendo, portanto ser acompanhadas de uma análise do efeito dos mesmos parâmetros sobre a taxa de projeção.

3.2 Taxa de projeção

De modo geral, considera-se que a projeção de metal e escória nos convertedores de sopro combinado tem efeitos negativos na produtividade do reator, aumenta o desgaste de refratário e eleva as perdas metálicas. Por outro lado, o aumento da área interfacial entre o gás e o líquido proporcionado pela formação de gotículas favorece reações de descarburização durante o sopro (FABRITIUS et al., 2002; SANTOS, 2018).

Para avaliar a influência de fatores operacionais e geométricos, como vazão de gás inerte pelas ventaneiras, vazão de oxigênio pela lança, distância lança-banho, formato do bico da lança, posição relativa entre os furos do bico e as ventaneiras, entre outros fatores, sobre a taxa de projeção, estudos via modelagem física são realizados.

Higuchi e Tago (2003) analisaram diferentes lanças com furos torcidos em diferentes ângulos comparando-os entre e si com uma lança normal (Figura 3.18).

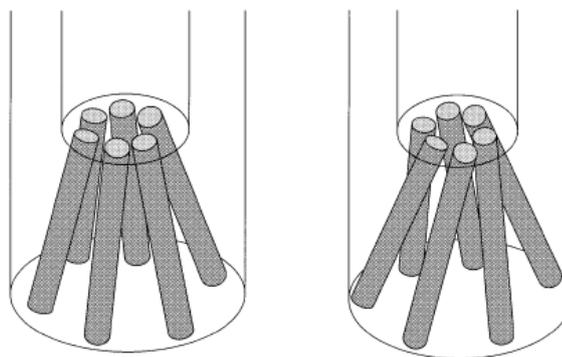


Figura 3.18 - Lança normal (à esquerda) e lança com furos torcidos (à direita) (HIGUCHI e TAGO, 2003).

Para medição da projeção, Higuchi e Tago (2003) utilizaram um modelo em acrílico cilíndrico. Água foi utilizada para simular o comportamento do banho e ar injetado por compressores foi utilizado para simular o oxigênio da lança. A taxa de projeção foi medida a partir da variação da massa de absorventes de algodão posicionados na parte superior do

modelo em função do molhamento pelas gotículas de água ejetadas. A Figura 3.19 apresenta um esquema do aparato experimental utilizado por Higuchi e Tago (2003).

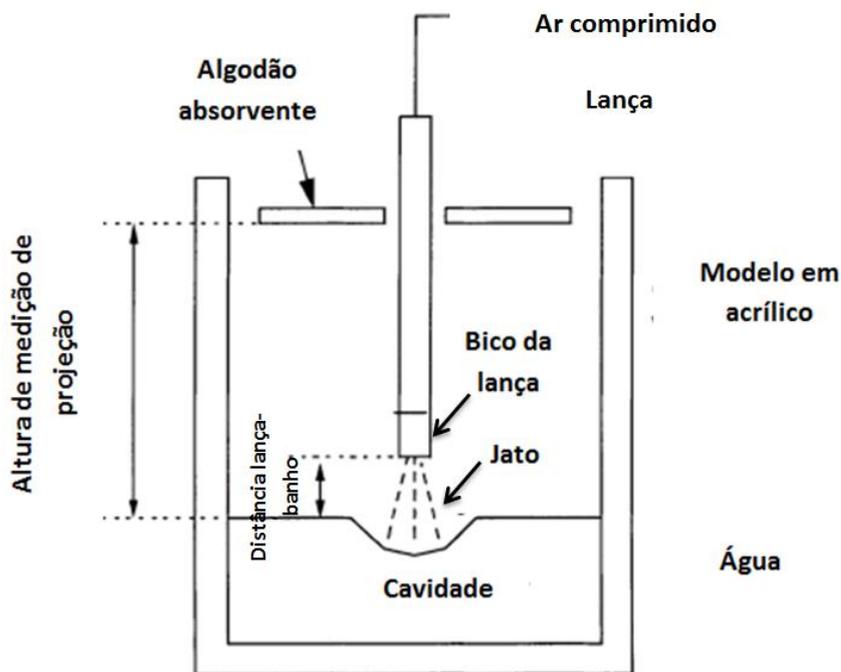


Figura 3.19 - Aparato experimental utilizado por Higuchi e Tago (2003).

Higuchi e Tago (2003) observaram que a torção dos bicos pode suprimir a taxa de projeção e afirmam que isso pode ser parcialmente atribuído à modificação dos pontos de maior pressão de incidência do jato. Sugere-se que o fluxo tangencial induzido pelas lanças de bico torcido muda a direção de ejeção de gotículas. Os ângulos avaliados foram 0° , $5,7^\circ$, $11,4^\circ$, $22,7^\circ$, $33,9^\circ$ e $66,4^\circ$. A melhor condição obtida foi para a condição de $11,4^\circ$.

Gasparini (2011) realizou testes para medição da taxa de projeção em dois modelos de acrílico em escala 1:10 utilizando água para simular o aço líquido e ar proveniente de compressores para simular os gases soprados pela lança e por quatro ventaneiras no fundo. Os ensaios de projeção foram feitos utilizando-se um feltro preso em um suporte que, por sua vez, encontrava-se pendurado em uma balança para medir a variação do peso devido à projeção de gotas do banho, semelhante à metodologia utilizada por Higuchi e Tago (2003). Os testes foram divididos em duas etapas: uma com o modelo de maior altura lateral (37 cm), posicionando o feltro a uma distância maior do banho de modo a simular a projeção para fora do vaso; outra, com o modelo de menor altura lateral (24 cm), posicionando o feltro a uma distância mais próxima do banho de modo a simular a projeção na parede do vaso. O modelo

curto foi também utilizado para se obter melhor coeficiente de ajuste da curva para as condições de menor projeção. A Figura 3.20 apresenta o aparato experimental utilizado por Gasparini (2011).

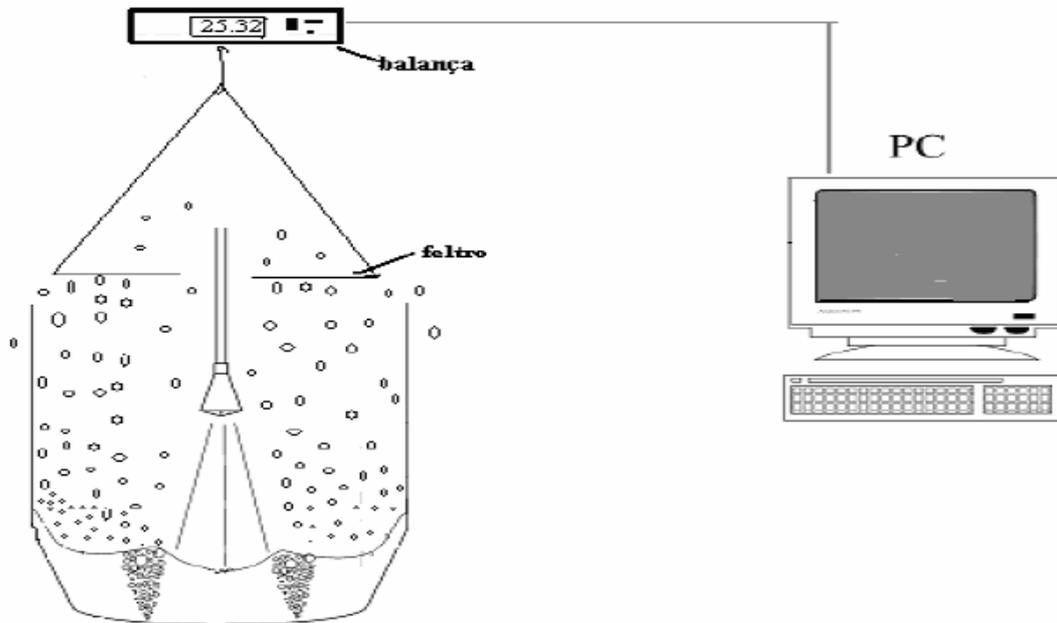


Figura 3.20 - Aparato experimental utilizado por Gasparini (2011) nos testes de projeção.

A Figura 3.21 mostra uma curva típica obtida nos testes de projeção por essa metodologia.

Gasparini (2011) avaliou a projeção para três valores de distância lança-banho (12 cm, 15 cm e 18 cm), vazões pelo fundo de 0L/min, 10L/min, 20L/min e 30L/min e vazões de topo 145 L/min e 180L/min e observou que o aumento da vazão pela lança, diminuição da distância lança banho e diminuição da vazão de fundo levam ao aumento da taxa de projeção. Dentre esses fatores, Gasparini (2011) afirma que a vazão de topo é o fator de maior influência e a vazão de fundo, o fator de menor influência.

O ângulo de torção da lança também tem certo efeito sobre a taxa de projeção e a melhor configuração de inclinação para as ventaneiras obtida nesse estudo foi na posição P1 (normal ao fundo do vaso). A Figura 3.22 mostra os resultados dos testes de projeção em função da condição operacional (GASPARINI, 2011).

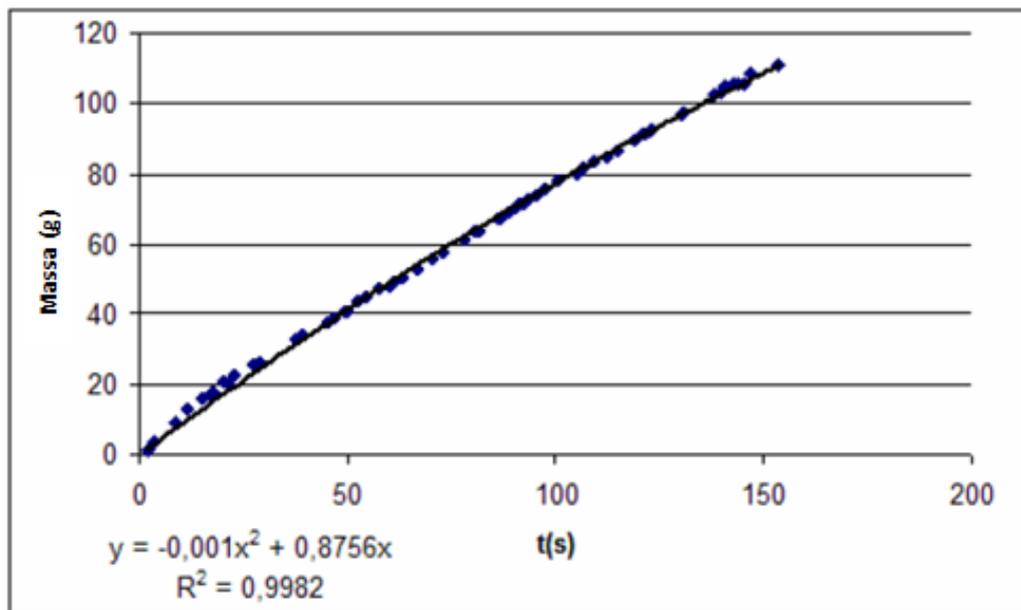
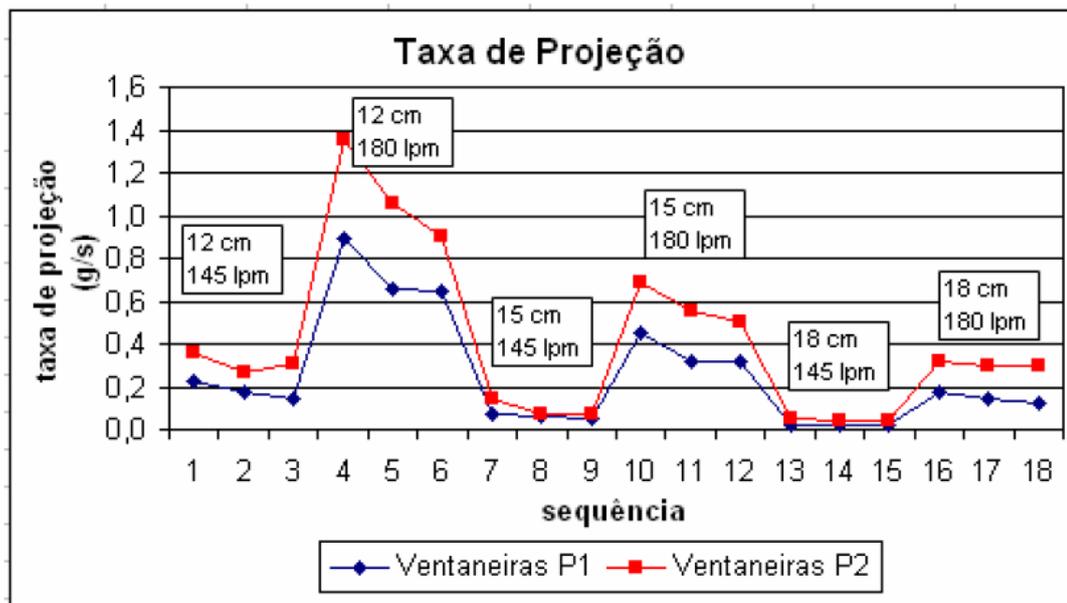


Figura 3.21 - Variação da massa do feltro em função do tempo de sopro (GASPARINI, 2011).



#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Dib	12	12	12	12	12	12	15	15	15	15	15	15	18	18	18	18	18	18
QF	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
QT	145	145	145	180	180	180	145	145	145	180	180	180	145	145	145	180	180	180

Figura 3.22 - Resultados dos testes de projeção com indicação das condições operacionais (GASPARINI, 2011).

Onde SS é a vazão pela lança, DLB é a distância lança-banho, SI é a vazão pelas ventaneiras e d é o diâmetro do orifício da lança.

Santos (2018) afirmou que os fatores de maior influência na taxa de projeção nesse modelo são a vazão pela lança e a distância lança-banho, mas verificou influência também do diâmetro dos furos da lança: menor diâmetro implica em aumento da energia cinética do gás e conseqüentemente aumento da projeção. O ângulo de torção da lança em relação às ventaneiras não provocou variação significativa nas taxas de projeção em relação aos demais parâmetros analisados, não aparecendo, portanto, na regressão linear.

Fabritius et al. (2002) avaliaram o efeito do arranjo de ventaneiras de fundo e altura da lança sobre projeções deletérias aos processo de refino em convertedores de sopro combinado no período inicial de sopro através de um modelo físico em escala 1:9. Os pesquisadores utilizaram uma lança com cinco furos e seis arranjos distintos de ventaneiras. A Figura 3.24 mostra o aparato experimental de Fabritius et al. (2002) e a Figura 3.25 esquematiza os arranjos de ventaneiras e a interação da cavidade da lança com o a superfície do banho.

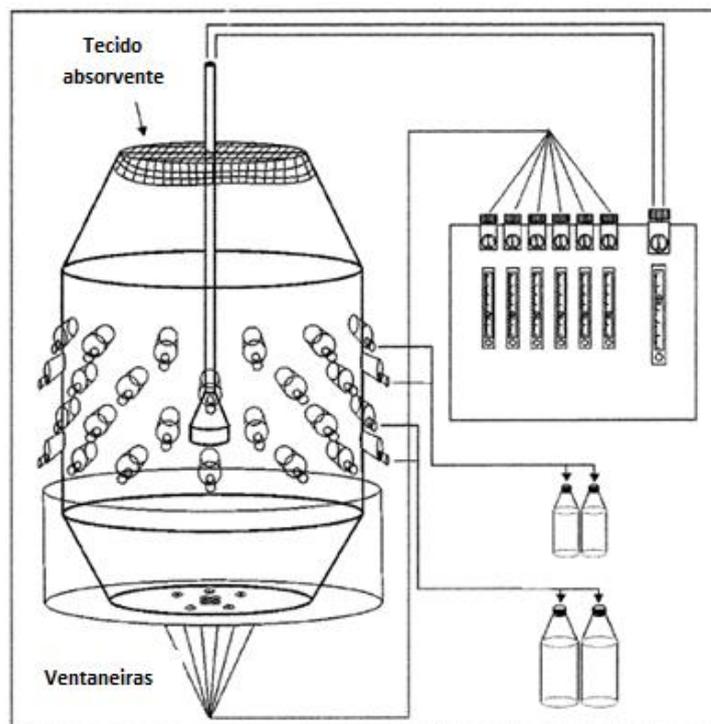


Figura 3.24 - Aparato experimental (FABRITIUS et al., 2002).

Segundo Fabritius et al. (2002), a introdução do sopro pelo fundo, o aumento do número de ventaneiras, acompanhado do conseqüente aumento da vazão de gás pelo fundo e o aumento

da distância lança-banho (até 0,20m), provocam aumento das projeções nas paredes. Para a distância de 0,22m, as projeções são próximas das obtidas a 0,20m ou suavemente inferiores. A Figura 3.26 ilustra o total de projeção nas paredes do modelo analisado por esses pesquisadores.

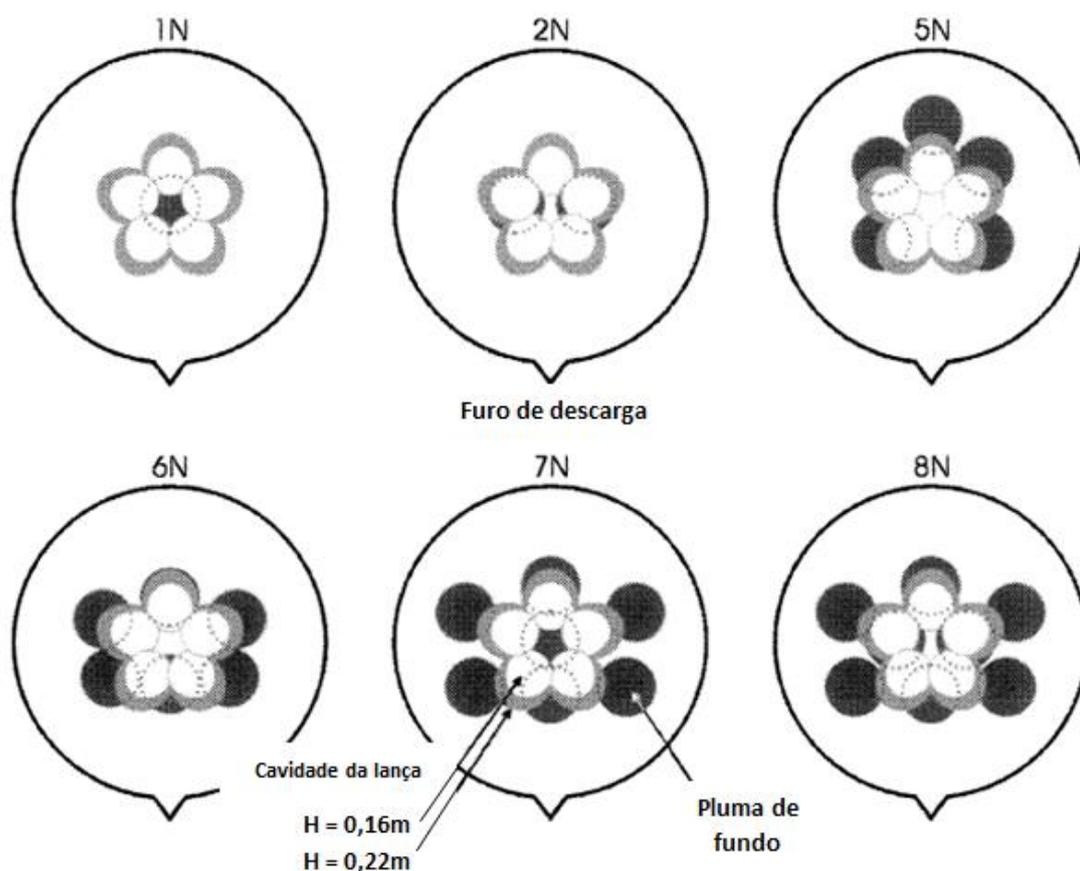


Figura 3.25 - Arranjo de ventaneiras no fundo e interação com as cavidades da lança na superfície do banho (FABRITIUS et al., 2002).

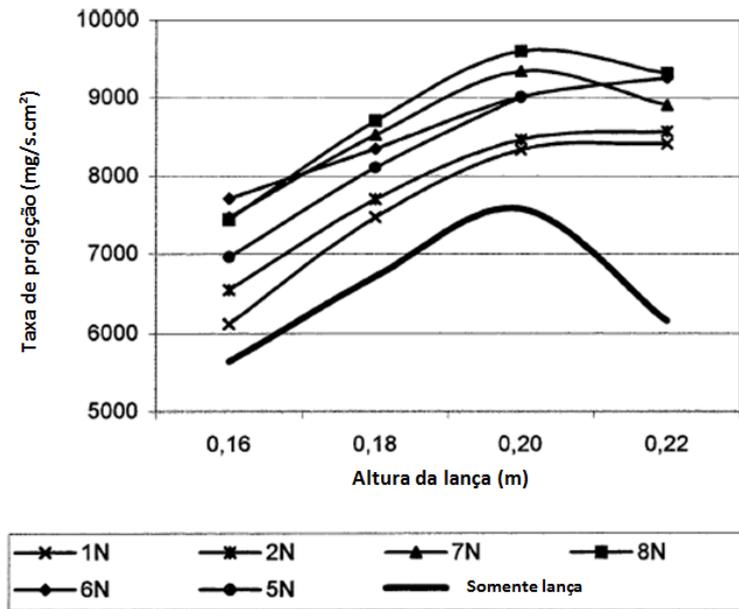


Figura 3.26 - Projeção nas paredes do modelo para diferentes arranjos de ventaneiras em função da distância lança-banho/altura da lança (FABRITIUS et al., 2002).

Ao confrontar os valores de projeção com o grau de sobreposição de pluma/jato, Fabritius et al. (2002) encontraram uma correlação clara, como se pode observar na Figura 3.27. Nesse estudo, afirma-se ainda que maiores distâncias lança-banho (sopro “mole”) e o uso da vazão pelo fundo favorecem a geração de gotas.

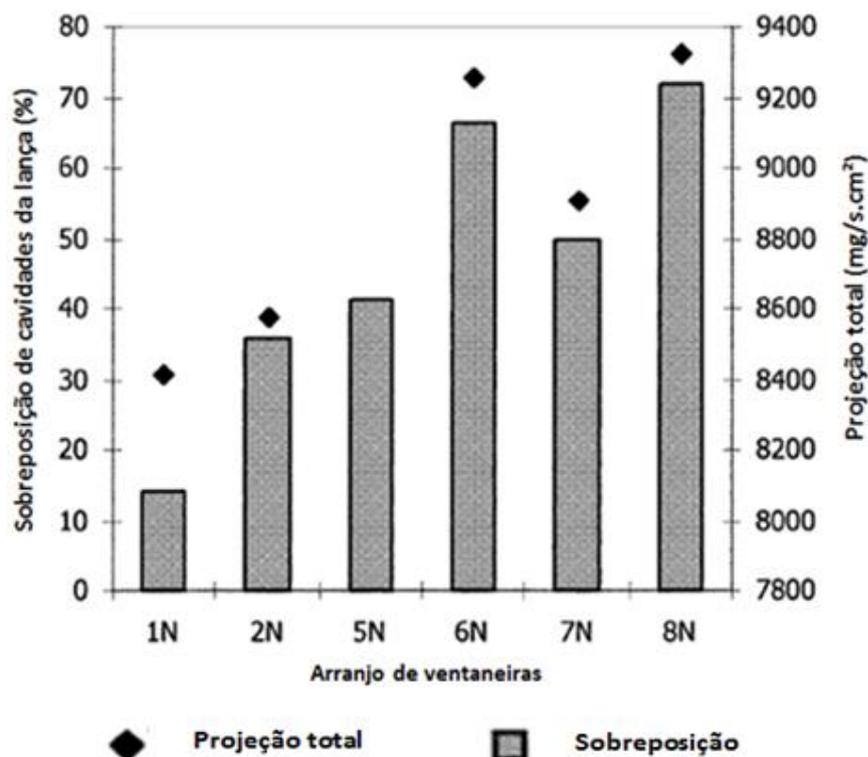


Figura 3.27 - Total de projeção e grau de sobreposição das cavidades das lança e plumas para distância lança-banho (h) de 0,22m (FABRITIUS et al., 2002).

A respeito das projeções para cima no reator (*skulling*), Fabritius et al. (2002) afirmam que os arranjos com ventaneiras centralizadas no modelo (1N e 2N) favorecem essas ejeções. A explicação para isso é atribuída à interação entre as plumas e as cavidades provocadas pelo jato da lança (Figura 3.28) que modifica a forma da cavidade e conseqüentemente a direção de ejeção (o ângulo β é maior que α). Para os arranjos mais externos às cavidades da lança (5N, 6N, 7N e 8N) a taxa de projeção é inferior para todas as distâncias lança-banho com exceção da altura de 0,22m. Nenhum fato relevante é explorado para explicar essa última diferença.

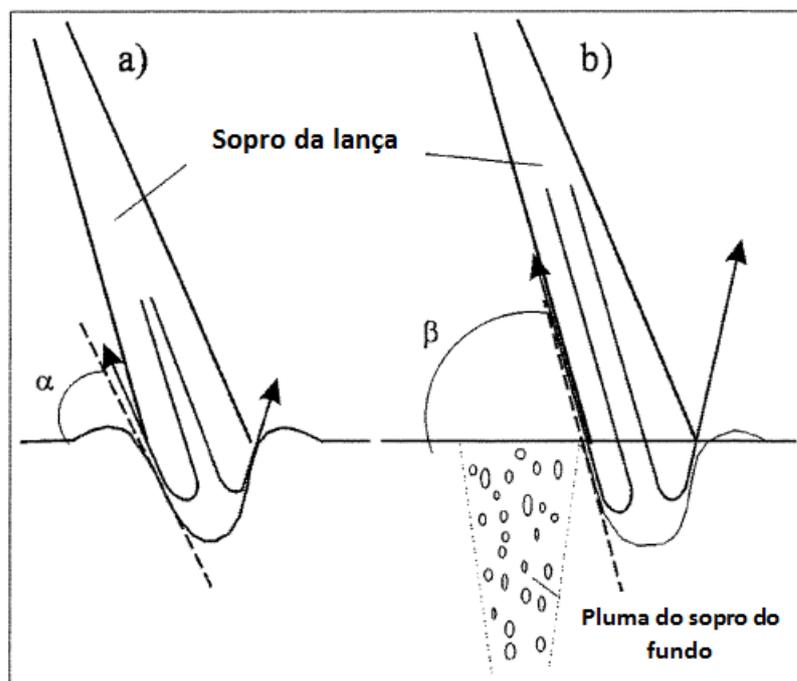


Figura 3.28 – Figura esquemática da direção de projeção sem (a) e com interação entre o jato da lança e a pluma (a) (FABRITIUS et al., 2002).

Na Figura 3.29 são apresentados os resultados de projeção para fora do modelo nos experimentos de Fabritius et al. (2002). Esses resultados indicam que essas projeções (*skulling*) são mais elevadas em condições de sopro com a lança mais próxima do banho (sopro “duro”). No entanto, ressalta-se que durante a descarbonização com esse padrão de sopro a escória emulsifica e atua como um filtro (FABRITIUS et al., 2002).

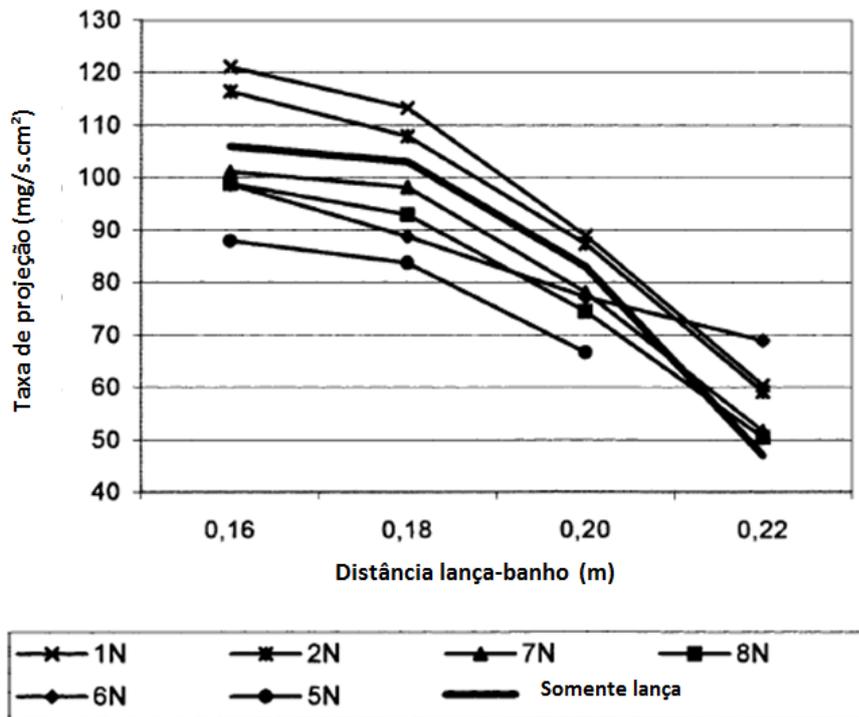


Figura 3.29 - Taxa de projeção na parte superior do modelo para diferentes arranjos de ventaneiras em função da distância lança-banho (FABRITIUS et al., 2002).

Em nenhum desses estudos foi utilizada uma terceira fase para simular a presença da escória e o seu comportamento em emulsão.

3.3 Emulsão

A escória tem sido considerada atualmente um componente essencial em processos de redução e fabricação de aço por estar diretamente em contato com o banho metálico, refratários e equipamentos (LUZ et al., 2018). Em diversos desses processos a prisão de bolhas de gás injetado ou formado por reações químicas leva a um processo de espumação da escória (*slag foaming*).

As espumas de escória podem ter diferentes morfologias, com células gasosas dentro de uma ampla faixa de tamanho e que apresentam, portanto, diferentes graus de estabilidade. A classificação pode ser feita em duas categorias: espumas com bolhas esféricas, ou *kugelschaum*, e espumas com bolhas poliédricas, ou *polyederschaum* (ZHANG e FRUEHAN, 1995b). Segundo Zhang e Fruehan (1995b), as primeiras consistem normalmente em bolhas

esféricas relativamente pequenas, semelhantes à espuma de cerveja, enquanto o segundo tipo é normalmente composto por células gasosas poliédricas separadas por filmes líquidos bem finos, como espuma de sabão.

Segundo Khozukov et al. (2012), o revestimento dos eletrodos nos fornos elétricos a arco em escória espumante melhora consideravelmente o aproveitamento energético do arco elétrico, o que torna esse fenômeno crítico à produtividade do reator. Matsuura et al. (2008) ressaltam a melhor eficiência na proteção do revestimento refratário.

No caso dos BOFs, a emulsão e espumação da escória são desejáveis até certo ponto devido ao favorecimento do contato metal-escória melhorando a cinética das reações de refino, bem como isolamento térmico do banho. No entanto, esse fenômeno pode levar ao transbordo de material pela parte superior do reator implicando em riscos de operação e perdas metálicas, promove formação de cascão no bico da lança e está associada a projeções para fora e nas paredes do reator.

Ogawa et al. (1993) descrevem o fenômeno de emulsão a partir de três etapas: formação de bolhas de monóxido de carbono na interface metal/escória (1), conforme as Equações 3.4 e 3.5, ascensão das bolhas na camada de escória e sua acumulação na superfície livre (2) e coalescência de bolhas na emulsão acompanhada da ruptura dos filmes na superfície da camada de escória, que tende a destruir a espuma (3).



Alguns estudos sobre emulsão existentes na literatura (ITO e FRUEHAN, 1989a; ITO e FRUEHAN, 1989b; ZHANG e FRUEHAN, 1995a; ZHANG e FRUEHAN, 1995b; ZHANG e FRUEHAN, 1995c; KIM et al., 2001) utilizam de um índice de emulsão (Σ), como definido por Bikerman (1973 apud LUZ et al., 2018)(Equação 3.6), para avaliação da emulsificação de escórias.

$$\Sigma = \frac{\Delta h}{u} \quad (3.6)$$

Onde $\Delta h = h - h_0$ é o aumento de altura do sistema gás/líquido, h_0 é a altura inicial de líquido sem emulsão e u é a velocidade superficial do gás injetado.

De modo geral, esses estudos sugerem vários parâmetros que influenciam na formação e estabilidade da emulsão, como densidade, viscosidade da escória, tensão interfacial, presença ou não de partículas sólidas e tamanho de bolha do gás injetado.

Ito e Fruehan (1989a) avaliaram um índice de emulsão adaptado dos modelos aquosos para escórias reais $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ em temperaturas na faixa de 1250°C a 1400°C variando a basicidade da escória, presença de partículas de segunda fase e adições de enxofre, fósforo, fluoreto de cálcio e óxido de magnésio a partir do modelo ilustrado na Figura 3.30.

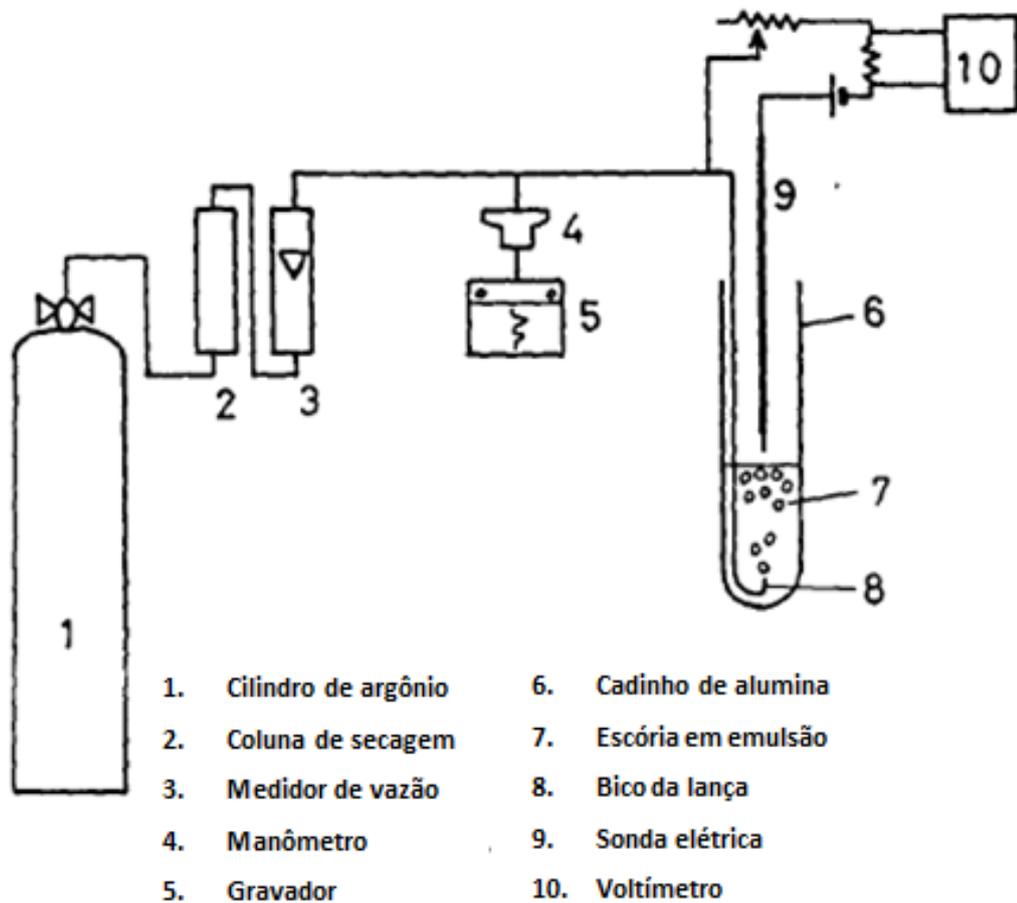


Figura 3.30 - Esquema da montagem dos testes de emulsão de Ito e Fruehan (1989a). Um forno de resistência elétrica foi utilizado para estabelecer condição isotérmica de ensaio.

A escória de CaO , SiO_2 e FeO foi preparada em um cadinho de alumina e emulsificada a partir da injeção de argônio através de um tubo de aço inoxidável de 2,1mm de diâmetro a 1573K . A posição da superfície da escória foi detectada por uma sonda elétrica de aço inoxidável e o tamanho médio das bolhas foi calculado a partir da frequência de formação e da vazão de gás. A frequência de formação de bolhas pôde ser determinada a partir de um transdutor de pressão conectado ao ponto de injeção de gás. Os pesquisadores

desconsideraram a oscilação no topo da espuma na medição da altura máxima atingida pela mesma, tendo obtido reprodutibilidade nos índices de emulsão por esse valor. A Figura 3.31 ilustra uma emulsão.

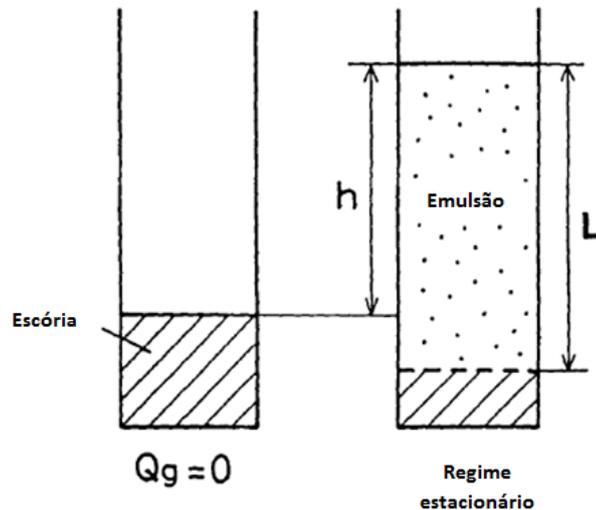


Figura 3.31 - Ilustração da emulsão (ITO e FRUEHAN, 1989a). Q_g é a vazão de gás.

A Figura 3.32a mostra a relação entre altura de emulsão (h) e a vazão de gás (Q_g) para cadinhos de diferentes diâmetros. Pode-se observar aumento da altura de emulsão com o aumento da vazão de gás e diminuição do diâmetro do cadinho. A Figura 3.32b mostra a dependência da altura de emulsão com a velocidade superficial do gás. A linearidade observada indica validade do índice de emulsão para esse estudo (ITO e FRUEHAN, 1989a).

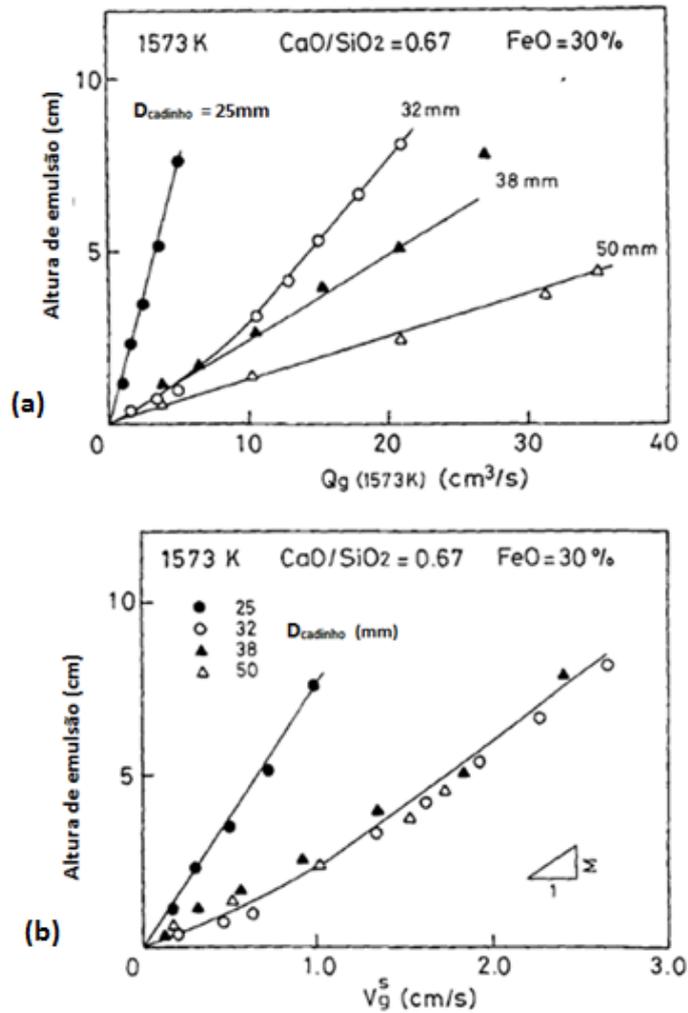


Figura 3.32 - (a) Relação entre altura de emulsão e vazão de gás para diferentes diâmetros de cadinho; (b) Relação entre altura de emulsão e velocidade superficial do gás para diferentes diâmetros de cadinho (ITO e FRUEHAN, 1989a).

Ito e Fruehan (1989a) foram além do índice de emulsão e propuseram o parâmetro “vida de emulsão” (*foam life* - τ). Os pesquisadores afirmam que uma escória ideal (com baixa drenagem de fluido nos filmes e fração de vazios constante teria índice de emulsão igual à vida de emulsão e esses parâmetros podem ser entendidos como o tempo de retenção de bolhas dentro da escória. A relação de linearidade que valida a vida de emulsão é obtida em um gráfico $\tau \times \ln(h/h_0)$ na medição do decaimento da espuma ao interromper a passagem de gás. Nesse caso, h_0 é a altura máxima de emulsão que decai para h após certo intervalo de tempo.

Segundo Ito e Fruehan (1989a), tanto o índice de emulsão quanto a vida de emulsão diminuem com o aumento da basicidade, uma vez que escórias mais básicas têm maior tensão interfacial e menor viscosidade, características desfavoráveis à estabilidade da espuma.

A partir da adição de partículas de $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e CaO , com diâmetros variando entre $30\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$, à escória, Ito e Fruehan (1989a) avaliaram o efeito de partículas de segunda fase sobre os parâmetros supracitados e verificaram que a presença dessas partículas aumenta a viscosidade e conseqüentemente a estabilidade da emulsão, tendo efeito mais expressivo do que o aumento da basicidade pela adição de CaO .

Das adições de fósforo, enxofre, fluoreto de cálcio e óxido de magnésio os pesquisadores observaram que a tensão interfacial sozinha não tem efeito expressivo sobre a emulsão (adição de S e P não tiveram influência considerável sobre o índice de emulsão), CaF_2 diminui a viscosidade da escória, diminuindo portanto o índice Σ e o MgO aumenta a estabilidade da espuma provavelmente por estar presente na forma de precipitados que incrementam a viscosidade efetiva. De modo análogo, a diminuição da viscosidade pelo aumento da temperatura também leva à diminuição do índice de emulsão.

Na continuação desse estudo, Ito e Fruehan (1989b) fizeram análises dimensionais para prever, a partir dos resultados do estudo anterior, o comportamento de escórias em processos de fabricação de aço em convertedores e fornos elétricos a arco. A Equação obtida (3.7) sugere que, dentre os parâmetros analisados, a viscosidade é o mais relevante na determinação do índice de emulsão (Σ).

$$\Sigma = 5,7 \times 10^2 \frac{\mu}{\sqrt{\gamma\rho}} \quad (3.7)$$

Onde μ é viscosidade, γ é tensão interfacial e ρ é densidade da escória.

Jiang e Fruehan (1991) fizeram estudos semelhantes aos de Ito e Fruehan (1989a) para escórias de fundição ($\text{CaO}\text{-SiO}_2\text{-FeO}$ e $\text{CaO}\text{-SiO}_2\text{-MgO}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$) a 1773K e obtiveram dependência semelhante do índice de emulsão com viscosidade e densidade da escória e tensão interfacial à obtida por Ito e Fruehan (1989b). Os pesquisadores verificaram também que o aumento da viscosidade favorece a emulsão até um valor crítico a partir do qual passa a desestabilizar a espuma. Isso foi constatado devido à variação do índice de emulsão com o teor de FeO , cuja presença na escória diminui a viscosidade. A Equação 3.8 mostra a relação obtida nesse estudo a partir de análise dimensional.

$$\Sigma = 115 \frac{\mu}{\sqrt{\gamma\rho}} \quad (3.8)$$

Onde μ é viscosidade, γ é tensão interfacial e ρ é densidade da escória.

A Figura 3.33 mostra os aparatos experimentais utilizados por Jiang e Fruehan (1991), sendo o primeiro em escala menor que o segundo para validar os índices de emulsão obtidos.

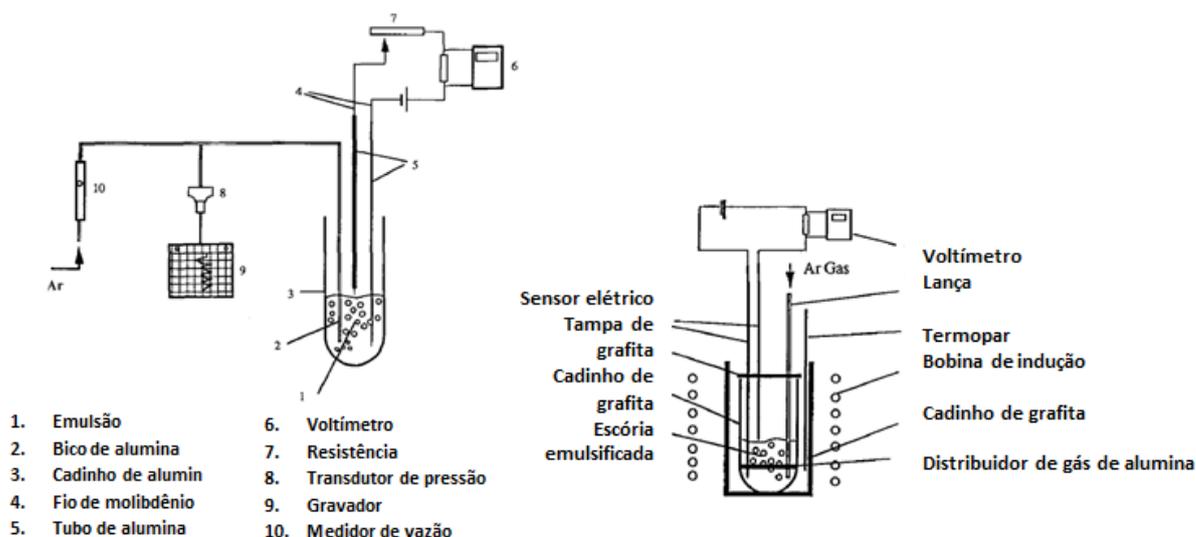


Figura 3.33 - Esquema do aparato experimental utilizado por Jiang e Fruehan (1991).

Stadler et al. (2006) fizeram testes usando água e diferentes soluções aquosas para avaliar a importância relativa dos parâmetros relacionados à emulsão, como viscosidade, tensão interfacial, tamanho de bolha e presença de partículas sólidas. As soluções utilizadas e suas respectivas propriedades físicas (viscosidade, tensão interfacial e densidade) são apresentadas na Tabela 3.3 e a montagem experimental, na Figura 3.34.

Tabela 3.3 - Propriedades físicas das soluções aquosas utilizadas por Stadler et al. (2006) para análise da formação de emulsão.

Índice	Solução	μ (mPa s)	σ (mN/m)	ρ (kg/m ³)
1	Água	0.89	72.75	998
2	10% etanol	1.32	37.70	982
3	40% etanol	2.35	31.89	935
4	60% etanol	1.15	27.56	891
5	10% propanotriol	3.18	69.13	1022
6	40% propanotriol	8.82	66.06	1154
7	60% propanotriol	1.92	71.69	1118
8	MIBC 1	5.98	71.95	1235
9	MIBC 2	58.50	76.09	1353
10	Etanol	0.89	64.81	998
11	Saturada MgSO ₄	0.89	73.09	998
12	Saturada Amido	1.07	22.75	789
13		7.80	68.27	1290
14		2.19	66.68	1000
15				

Fonte: STADLER et al. 2006.

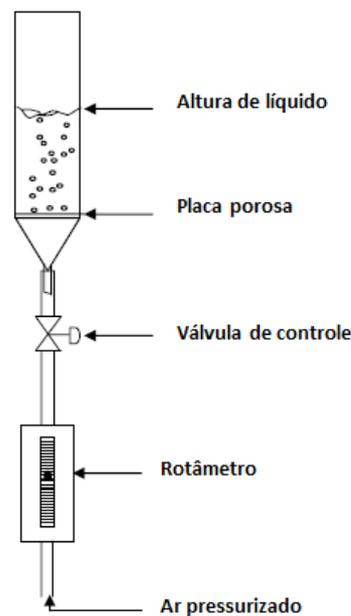


Figura 3.34 - Aparato experimental para análise da influência de parâmetros relacionados à emulsão (STADLER et al., 2006).

Os pesquisadores verificaram que a viscosidade foi o parâmetro de maior importância, a presença de partículas sólidas pode estabilizar a emulsão e aumentar seu volume e, de modo geral, as condições com bolhas menores foram mais estáveis.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se um modelo em acrílico de um reator BOF construído em escala 1:15 bipartido (Figura 4.1), operado em similaridade dinâmica com um reator industrial de capacidade de 320 toneladas de aço líquido, provido de 6 ventaneiras do tipo agulha (0,2 mm de diâmetro) distribuídas conforme a Figura 4.2. A lança de oxigênio possui seis orifícios, cada qual com um ângulo de 18° em relação à vertical e igualmente espaçados (Figura 4.3).

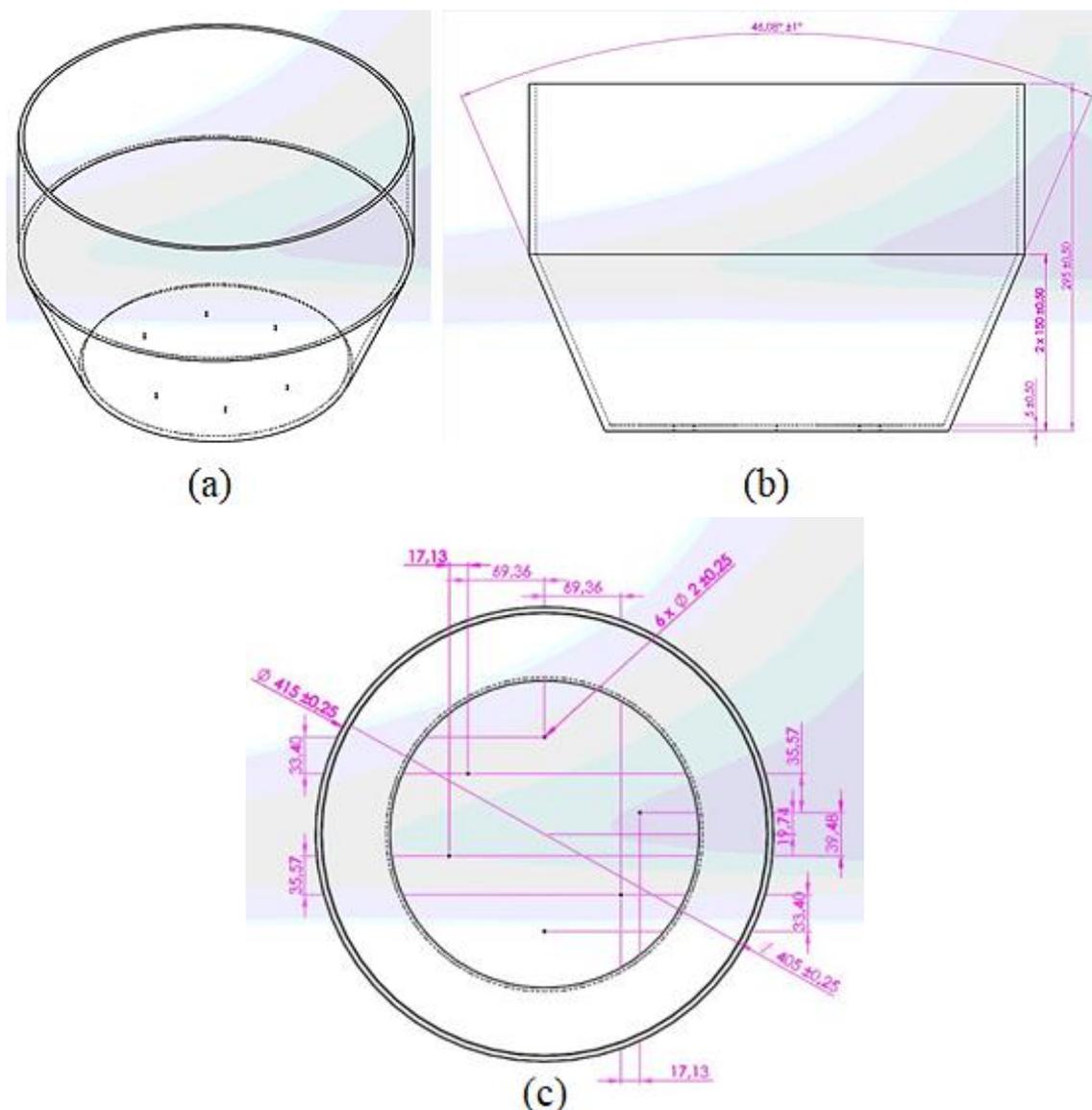


Figura 4.1 - Desenho do modelo bipartido utilizado: (a) Vista isométrica; (b) Vista frontal; (c) Vista superior. Dimensões em milímetros.

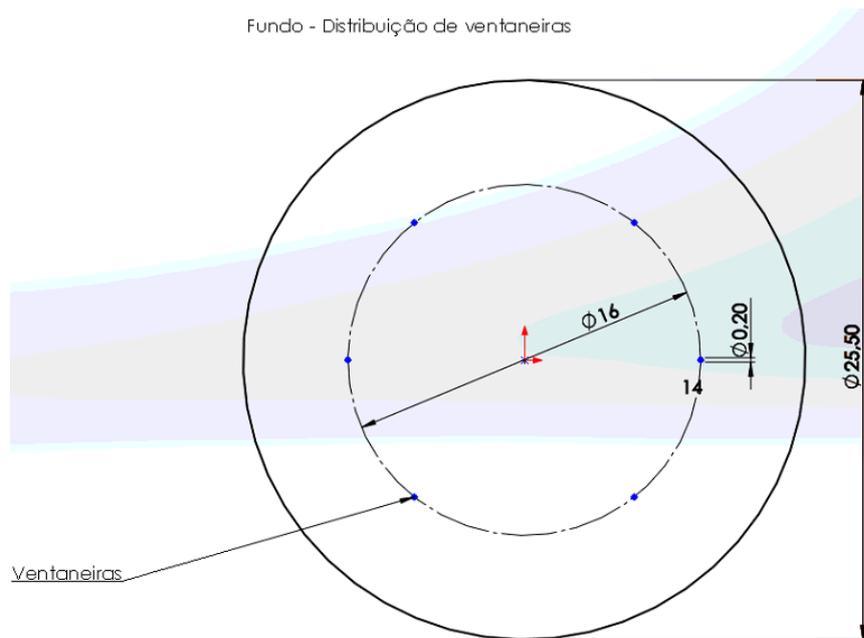


Figura 4.2 - Fundo do modelo em acrílico e distribuição de ventaneiras. Dimensões em milímetros

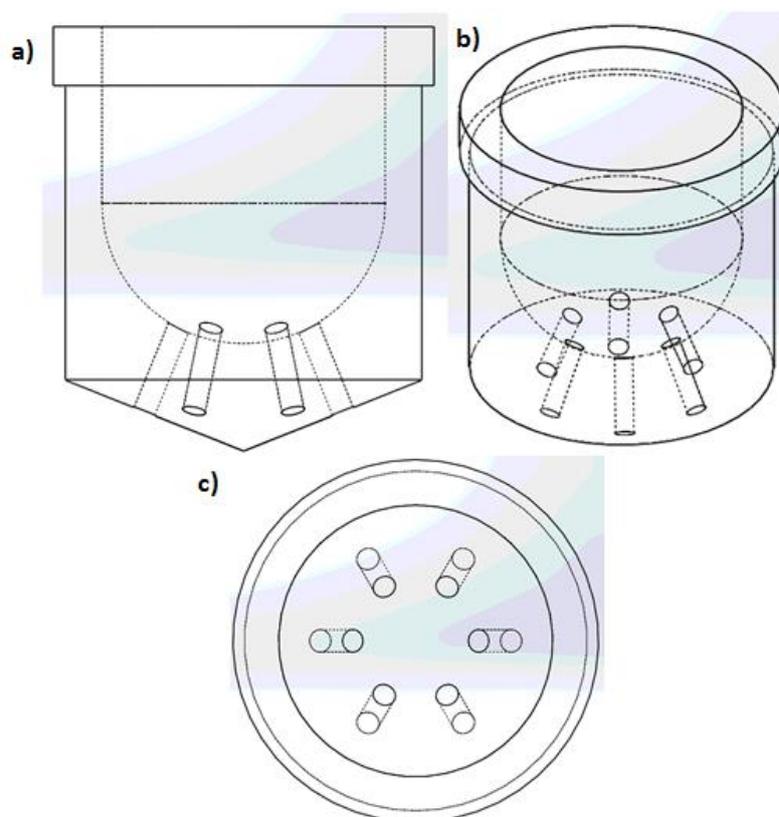


Figura 4.3 - Desenhos do bico da lança: a) Vista frontal; b) Vista trimétrica; c) Vista superior.

Utilizou-se água para simular o comportamento do aço líquido e ar injetado através da lança e das ventaneiras no fundo simulando o oxigênio e o gás inerte.

A partir desse modelo foram realizados testes para determinação do tempo de mistura, taxa de projeção e formação de emulsão. Os parâmetros avaliados foram:

- Ângulo de rotação da lança em relação às ventaneiras, conforme Figura 4.4;
- Vazão pelo fundo;
- Número de ventaneiras;
- Vazão pela lança.

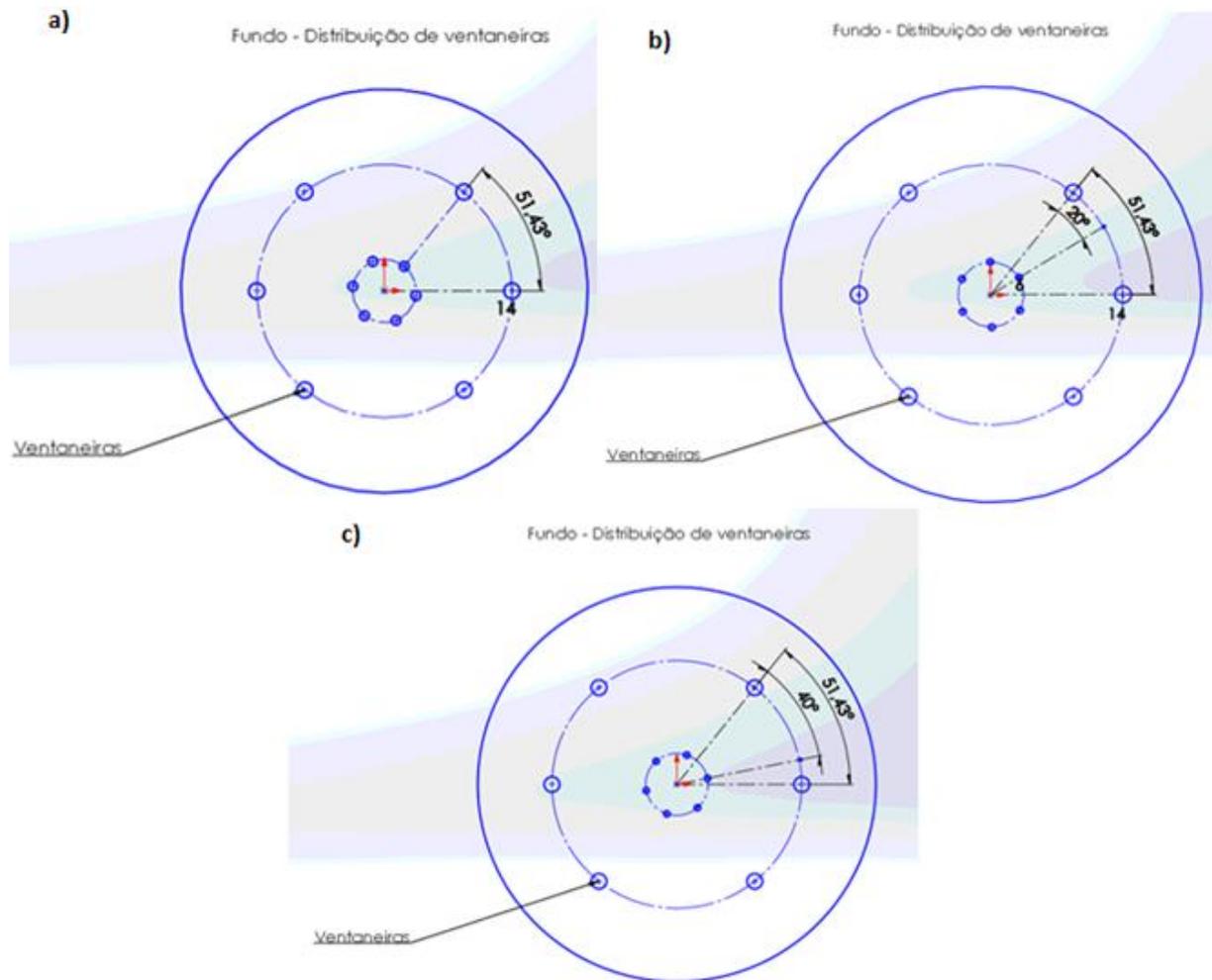


Figura 4.4 - Esquema da posição relativa entre bicos da lança e ventaneiras.

As condições de similaridade foram asseguradas com base nos adimensionais apresentados na Tabela 4.1, conforme apresentado por Gasparini (2011).

Tabela 4.1 - Grupos adimensionais considerados para modelagem

Interação entre o jato e o banho metálico	Weber	$\frac{\rho_g u^2}{[\rho g \sigma]^{1/2}}$
Interação entre jatos, e jato - escória	Momento	$\frac{\rho_g u^2 d_l^2}{\rho g d_{lb}^3}$
Inércia do gás soprado e peso do líquido	Froude	$\frac{\rho_g u^2}{\rho g H}$
Inércia do gás injetado e peso do líquido	Froude	$\frac{\rho_g v^2}{\rho g H}$
Taxa específica de aporte de energia	ϵ	$\frac{Q_F R T}{22,4 m} \left[\ln 1 + \frac{\rho g H}{P_a} \right]$

Onde: ρ_g e ρ - massa específica do gás e do líquido (kg/m^3) respectivamente; u = velocidade do gás soprado (m/s); σ = tensão interfacial líquido/gás (N/m); d_{lb} = distância lança/banho (m); H = altura do banho (m); d_l = diâmetro do furo da lança (m); g = aceleração da gravidade (m/s^2); v = velocidade do gás injetado (m/s); ϵ = taxa de aporte de energia (W/kg); Q_F = vazão de gás injetado (N L/s); R = constante dos gases (J/Kmol); T = temperatura absoluta (K); m = massa de líquido (kg); P_a = pressão ambiente (Pa).

4.1 Tempo de mistura

A Figura 4.5 mostra um esquema do aparato experimental utilizado nos testes de tempo de mistura. Fixou-se a distância lança-banho em 20 cm.

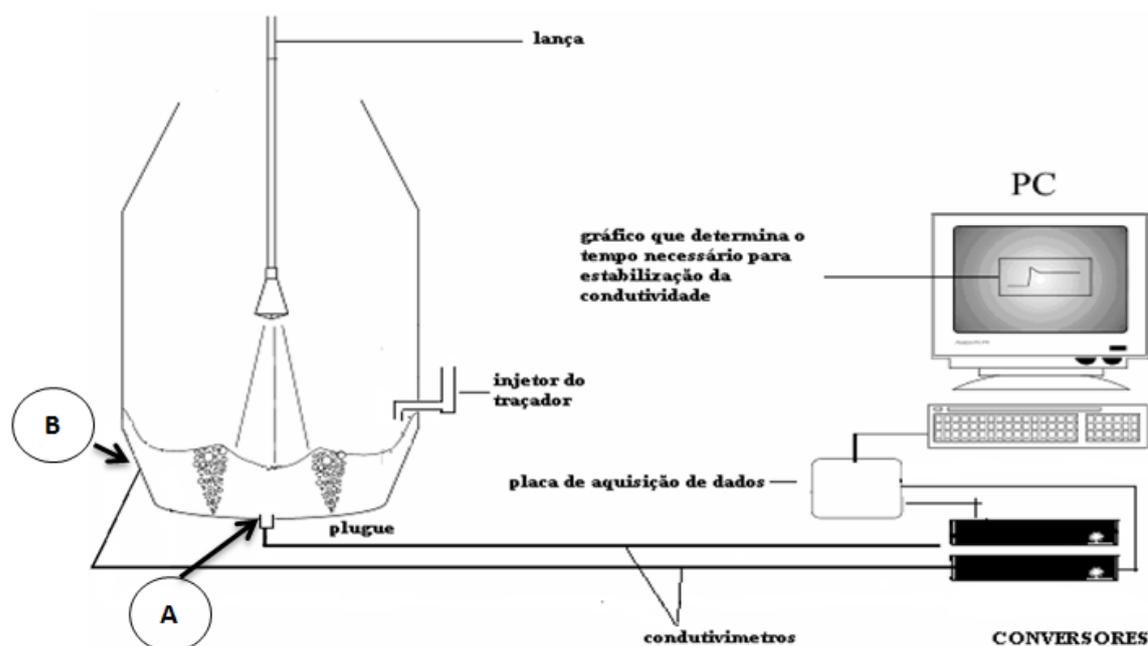


Figura 4.5 - Esquema da montagem para os testes de tempo de mistura.

A determinação do tempo de mistura foi feita a partir de medições da condutividade da água após a injeção de um traçador. Utilizou-se 2 ml de solução saturada de KCl em cada teste. A medição de condutividade foi realizada utilizando-se dois condutivímetros acoplados no modelo: um no centro da base (A) e outro na parede (B) a 8,5 cm da base, conforme esquematizado na Figura 4.5. A Figura 4.6 ilustra uma curva típica de condutividade em função do tempo obtida nesse teste.

Inicialmente o programa computa a condutividade de fundo que, no caso, é a condutividade da água antes da injeção do traçador. O operador adiciona o traçador ao banho pelo sistema de injeção no mesmo instante em que dá o comando de fim de leitura de condutividade de fundo e início de mistura. Ao fim do teste, o programa gera uma curva como a ilustrada na Figura 4.6. O critério de conclusão da mistura foi arbitrado entre 0,95 e 1,05 da concentração nominal de traçador. Este método é similar ao utilizado por Luomala et al. (2004), Gabriel (2009) e Gasparini (2011). As condições operacionais analisadas são apresentadas na Tabela 4.2.

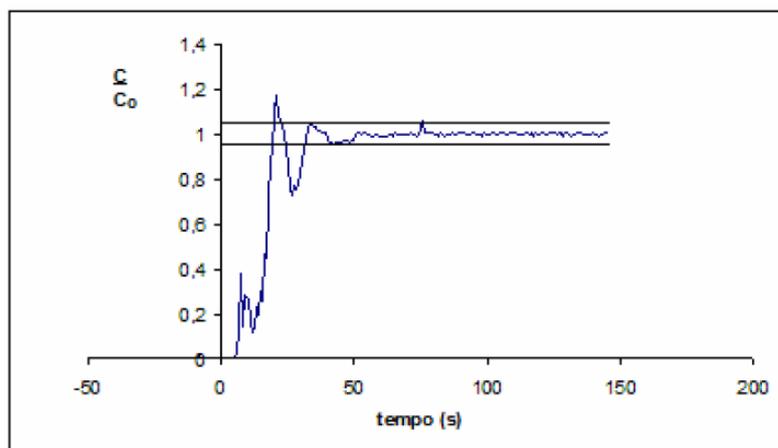


Figura 4.6 - Curva típica de dispersão de um traçador (GASPARINI, 2011).

Tabela 4.2 - Variáveis analisadas nos testes de tempo de mistura

	Condição de Operação		
Vazão pelo fundo (L/min)	10	20	30
Vazão pela lança (L/min)	110	150	175
Rotação da lança	0°	20°	40°

Considerou-se 0° o ângulo para o qual um orifício da lança se encontra alinhado com uma ventaneira no fundo do modelo. A rotação da lança modifica o modo de interação do gás que sai da mesma e a pluma proveniente das ventaneiras.

Além dessas variáveis, na rotação de 0° analisou-se ainda o tempo de mistura para arranjos de 6 e 12 ventaneiras (Figura 4.7) totalizando 36 configurações, conforme apresentado no esquema da Figura 4.8, com um número mínimo de 10 réplicas por cada. O tempo de mistura por configuração é determinado a partir da média dos testes para cada posição (A e B). Deve-se ressaltar que a distribuição de 12 ventaneiras deste trabalho é a mesma do modelo estudado por Santos (2018), que avaliou a influência de diversos fatores geométricos e operacionais, como vazão pela lança, vazão pelo fundo, diâmetro dos furos do bico da lança e distância lança-banho sobre a taxa de projeção.

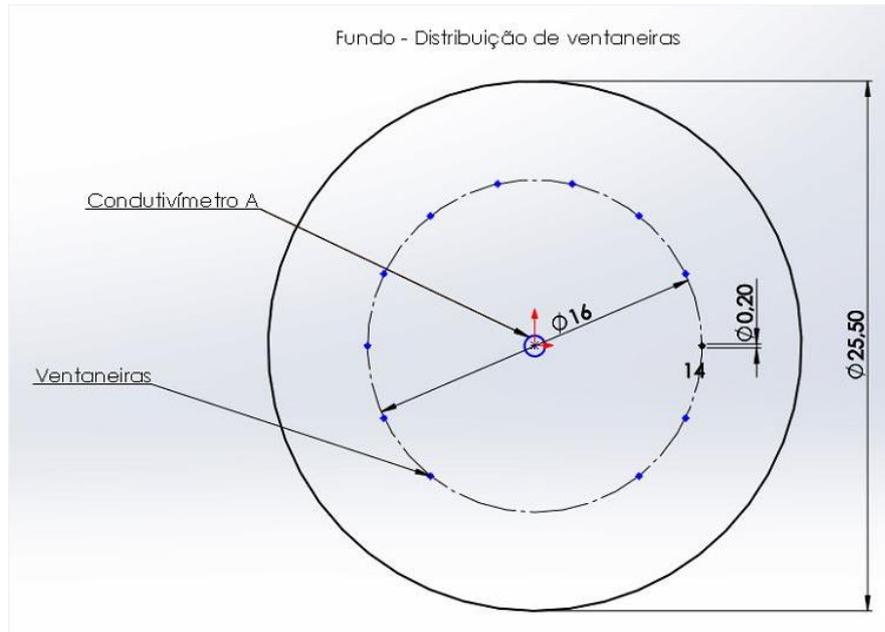


Figura 4.7 - Fundo do modelo e distribuição das 12 ventaneiras

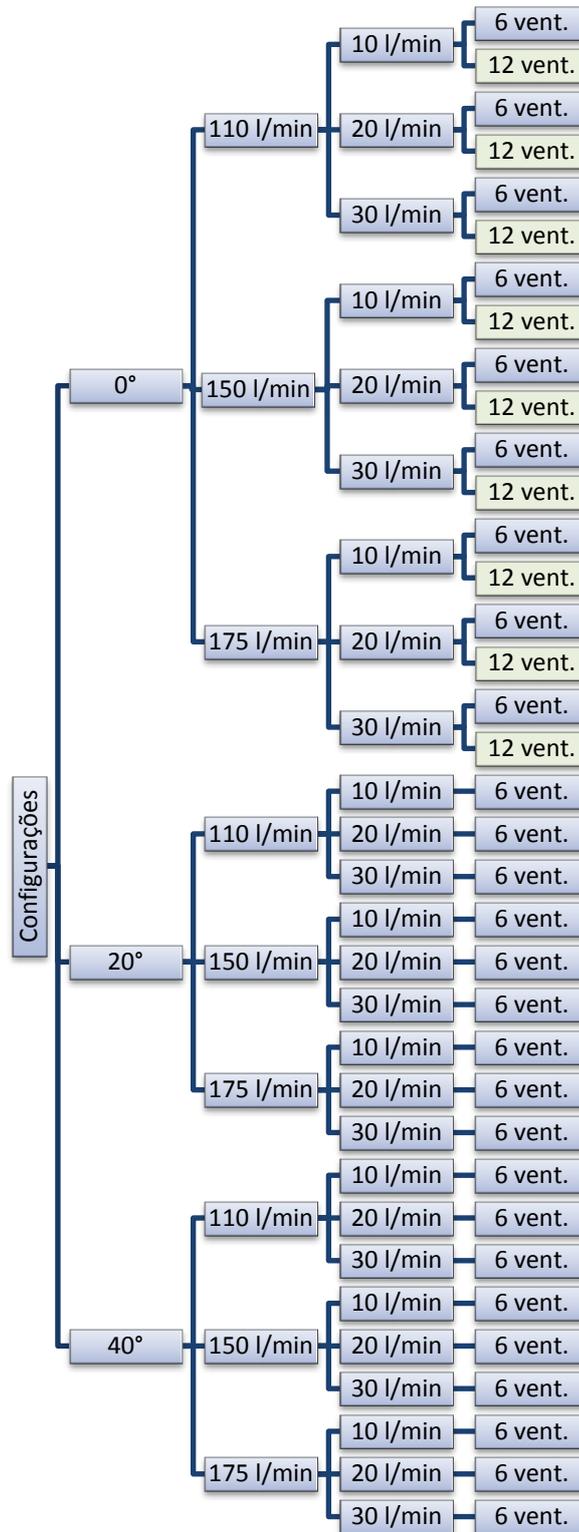


Figura 4.8 - Esquema das configurações analisadas nos testes de tempo de mistura

4.2 Taxa de projeção

A Figura 4.9 mostra o esquema da montagem dos testes para medição de projeção, baseados nas metodologias aplicadas por Gabriel (2009), Gasparini (2011) e Santos (2018). Fixou-se a distância lança banho em 16 cm. A mudança desse parâmetro em relação aos testes para tempo de mistura se deve às baixas taxas de projeção, o que dificulta a aquisição de dados.

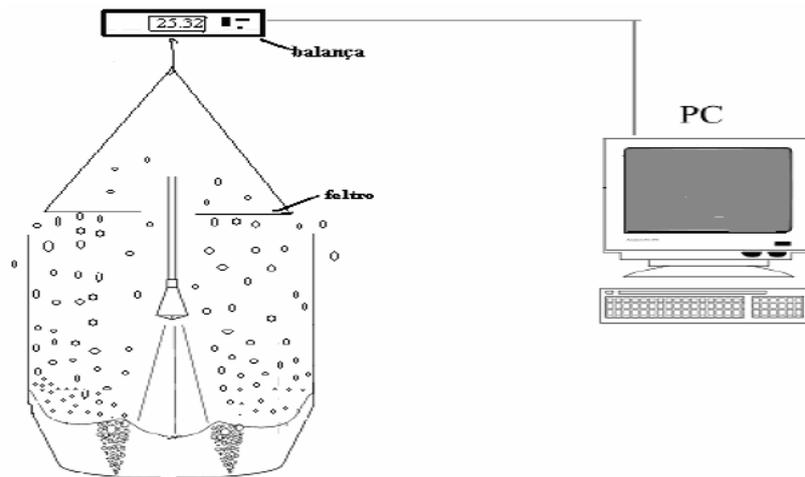


Figura 4.9 - Esquema de montagem dos testes para medição de projeção (GASPARINI, 2011).

Utilizou-se um feltro como o ilustrado na Figura 4.10 pendurado em um gancho acoplado a uma balança. O feltro foi posicionado a uma distância de 15 mm da parede do modelo (Figura 4.11) e balizas de acrílico foram acopladas à parte superior do modelo para restringir o movimento do feltro e facilitar a leitura dos dados pela balança. O posicionamento desse acessório foi de modo que houvesse um esforço horizontal restaurador sobre o suporte do feltro, não afetando assim a leitura da massa (esforço vertical).



Figura 4.10 - Exemplo de feltro utilizado nos testes de projeção.

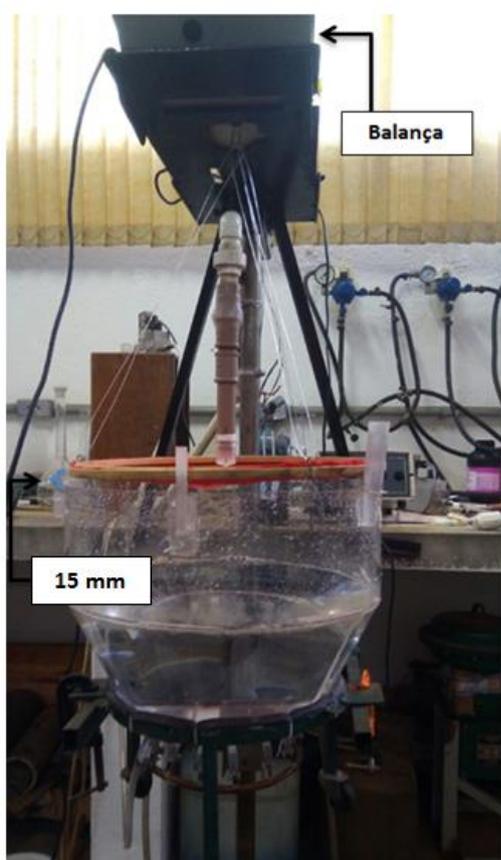


Figura 4.11 - Fotografia da montagem dos testes de projeção.

O procedimento para realização dos testes começa com a introdução da vazão de fundo, que não provoca projeção apreciável sobre o feltro sem a vazão de topo, seguida pela introdução do gás pela lança e imediato comando de início de leitura no programa para registro dos dados da balança. A Figura 4.12 apresenta uma curva típica obtida no teste de projeção.

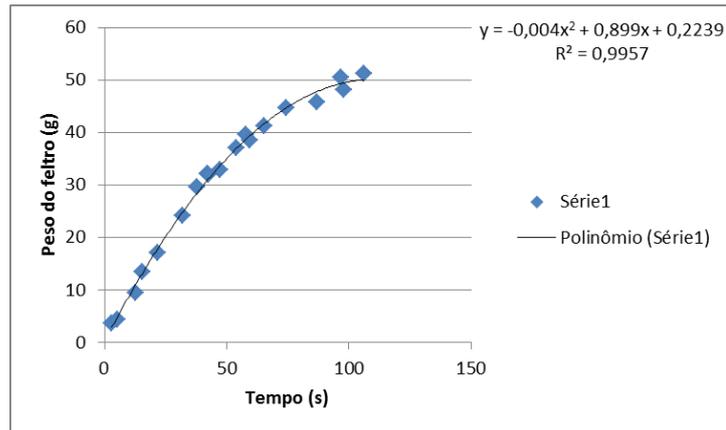


Figura 4.12 - Curva típica do teste de projeção – variação do peso medido x tempo.

As curvas de projeção apresentam inicialmente um perfil linear crescente uma vez que as gotículas projetadas encontram regiões secas do feltro, cujo peso aumenta ao passo que mais gotas projetadas molham o tecido. Esse comportamento se mantém até a saturação do pano que reduz a absorção em relação ao início do teste. Sendo assim, arbitrou-se para determinação das taxas de projeção eliminar a região de saturação das curvas. A taxa de projeção é, então, o coeficiente angular da reta obtida a partir do ajuste linear da região não saturada da curva. A Figura 4.13 apresenta a mesma curva da Figura 4.12 com eliminação dos dados obtidos na saturação do pano.

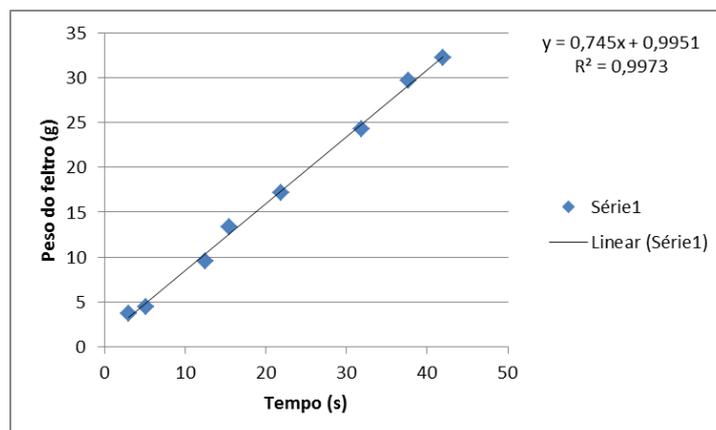


Figura 4.13 - Curva típica de um teste de projeção depois de eliminada a região de saturação do feltro – variação do peso medido x tempo.

As variáveis avaliadas nos testes de projeção foram:

- Vazão pela lança: 150 L/min e 175 L/min;
- Vazão pelo fundo: 10 L/min, 20 L/min e 30 L/min;

- Ângulo de rotação da lança: 0°, 20° e 40°.

Não foram feitos testes de projeção para a vazão de 110L/min na lança, pois as projeções são muito baixas nesse caso. A Figura 4.14 apresenta um esquema detalhado das configurações avaliadas. Para cada uma das configurações foram feitos no mínimo cinco testes e a taxa de projeção foi determinada a partir da média dos valores obtidos.

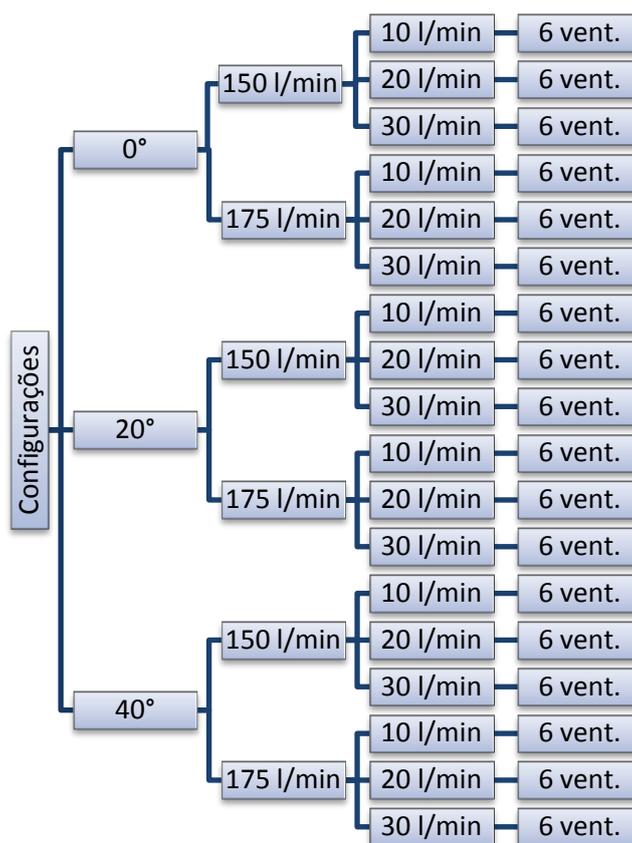


Figura 4.14 - Esquema das configurações analisadas nos testes de projeção.

4.3 Emulsão

Em conformidade com os estudos apresentados na revisão bibliográfica sobre emulsão, testes de bancada foram realizados com o intuito de determinar o valor de viscosidade que fornecesse emulsão estável e cuja variação de altura fosse facilmente mensurável no modelo físico. Considerando-se a importância do tamanho de bolhas, conforme apresentado por Zhang e Fruehan (1995b) e Stadler et al. (2006), misturou-se bicarbonato de sódio no óleo para simular escória e solução de ácido acético (4%) foi utilizada para simular o

comportamento do aço. Com isso, buscou-se simular a formação de emulsão a partir da geração de bolhas de gás em reações *in situ*.

As combinações avaliadas foram:

1. Óleo de motor 10W30;
2. Querosene;
3. Óleo de motor 10W30 com querosene, proporção 1:1;
4. Óleo de motor 10W30 com querosene, proporção 3:1.

Utilizou-se um agitador magnético e uma barra magnética para promover o contato entre as fases e evolução da reação apresentada na Equação 4.1:



Ensaio no modelo físico

Para realização dos ensaios no modelo físico foram utilizados:

- Liquidificador para misturar a combinação de óleos, bicarbonato de sódio e anilina azul;
- Recipiente para verter a mistura que simula a escória;
- Dispositivo para minimizar a agitação no contato do óleo com a solução ácida, 4% (Figura 4.15).
- Solução de ácido acético – 4%;
- Óleo de motor 10W30 (marca: Falke): 2L;
- Querosene: 700ml;
- Bicarbonato de sódio: 202,5 g (7,5g para cada 100ml de óleo).

A solução ácida é colocada no modelo com a vazão pelo fundo aberta para preservar a integridade interna das ventaneiras e do anel metálico de distribuição de gás contra corrosão pela solução. Duas câmeras foram posicionadas para filmagem dos testes: uma delas em posição frontal ao modelo a 32 cm de distância e a segunda posicionada acima do mesmo, a uma distância de 85 cm do fundo da bacia.



Figura 4.15 - Preparação do teste de emulsão: (a) Vista superior; (b) Vista frontal.

Todos os ensaios foram feitos com distância lança-banho 16 cm e rotação da lança de 0°. As condições avaliadas são apresentadas no esquema da Figura 4.16.

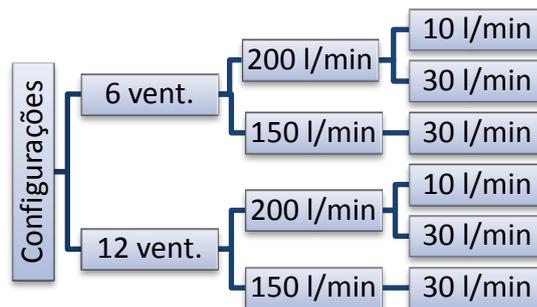


Figura 4.15 - Plano de testes de emulsão.

Medições da camada de espuma foram feitas para comparar as diferentes condições analisadas. Na avaliação da altura máxima atingida pela espuma, considerou-se a espessura total (H_{max} , Figura 4.17) como parâmetro de comparação. Na relação da variação da camada de espuma com o tempo considerou-se somente a parte superior do modelo (parte cilíndrica).

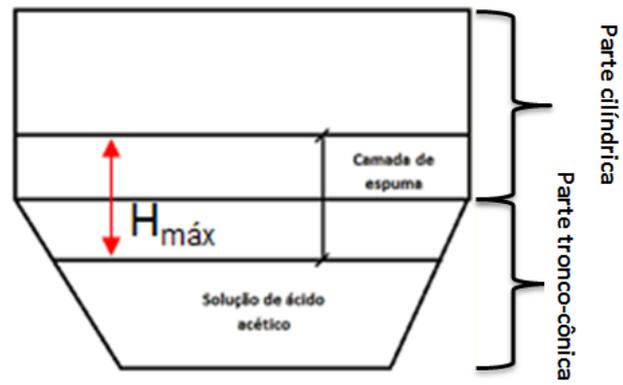


Figura 4.16 - Esboço do modelo destacando a espessura da camada de espuma (parâmetro $H_{m\acute{a}x}$) medida.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parte dos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa foi divulgada em “MISTURA, PROJEÇÃO E EMULSIFICAÇÃO EM UM REATOR DE SOPRO COMBINADO: UMA AVALIAÇÃO VIA MODELAGEM FÍSICA PARA 6 E 12 VENTANEIRAS”, de Pedro Henrique Silva et al, apresentado no 49º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, ABM Week, 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil. DOI 10.5151/1982-9345-32044

Resumo: “Para explorar as vantagens do sopro combinado, deve-se otimizar os parâmetros operacionais e geométricos de modo a se obter menores tempos de mistura, altas taxas de descarbonação e menor tempo de sopro. No entanto, deve-se levar em consideração as taxas de projeção de aço e escória na parede refratária do convertedor (splashing) e para fora do mesmo (spitting), assim como a formação de emulsão. Neste trabalho, foram avaliados aspectos operacionais e geométricos através de modelagem física a frio em um modelo 1:15. Verificou-se que o fator de maior influência sobre o tempo de mistura é a vazão pelo fundo, enquanto a taxa de projeção é mais fortemente afetada por vazão pela lança e distância lança-banho. A altura máxima de emulsão apresentou variação significativa em função da vazão pelo fundo, mas também foi dependente, em menor grau, da vazão de sopro”.

5.1 Tempo de Mistura

○ Influência da rotação da lança:

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam o tempo de mistura obtido a partir das medições de condutividade nas posições A e B em função da configuração de vazão pela lança e pelo fundo utilizadas, conforme a Tabela 5.1. Evidencia-se a influência do ângulo de rotação da lança.

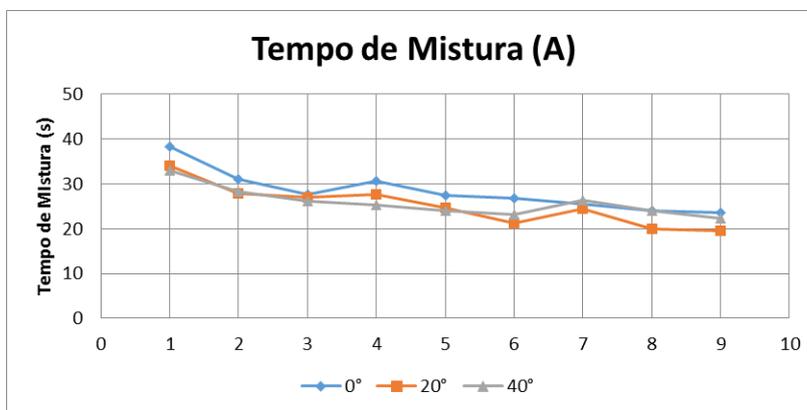


Figura 5.1 - Tempo de mistura (A) em função de configuração de operação evidenciando a influência do ângulo de rotação da lança, 6 ventaneiras.

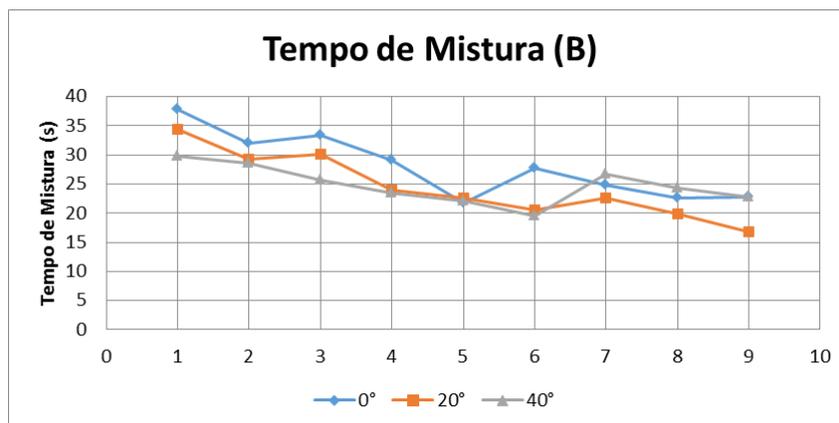


Figura 5.2 - Tempo de mistura (B) em função da configuração de operação evidenciando a influência do ângulo de rotação da lança, 6 ventaneiras.

Tabela 5.1 - Configuração de teste, 6 ventaneiras

Vazão pela lança (L/min)	110			150			175		
Vazão pelo fundo (L/min)	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rotação da lança (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo de mistura (A)(s)	38,22	31,01	27,53	30,56	27,42	26,75	25,53	23,93	23,66
Tempo de mistura (B)(s)	37,81	32,00	33,43	29,01	21,75	27,67	24,75	22,67	22,76
Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rotação da lança (°)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Tempo de mistura (A)(s)	34,00	27,88	27,08	27,71	24,71	21,32	24,51	20,03	19,45
Tempo de mistura (B)(s)	34,41	29,30	30,13	23,95	22,56	20,59	22,68	19,93	16,75
Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rotação da lança (°)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Tempo de mistura (A)(s)	32,94	28,18	26,23	25,22	23,92	23,23	26,39	24,00	22,35
Tempo de mistura (B)(s)	29,82	28,65	25,75	23,42	22,02	19,46	26,63	24,29	22,84

Observa-se que os tempos de mistura foram menores para as configurações com rotação de 20° e 40° da lança e vazões de 110 L/min e 150 L/min. Essa tendência não se mantém nas configurações com vazão de 175 L/min, o que pode ser atribuído ao aumento da vazão de topo, que resulta em maior intensidade de interação com as plumas provenientes das ventaneira do fundo atrapalhando as condições de homogeneização.

○ **Influência da vazão de topo**

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram o tempo de mistura nas diversas condições de operação evidenciando a vazão pela lança. A Tabela 5.2 apresenta as configurações correspondentes.

Percebe-se que de modo geral o aumento da vazão de topo, ao promover maior agitação do banho, causa diminuição do tempo de mistura. Isso foi observado por Gasparini (2011) e Lai et al. (2008). Essa tendência se reverte na condição de rotação 40° com a intensificação da interação entre os jatos da lança e as plumas em relação à rotação de 20°.

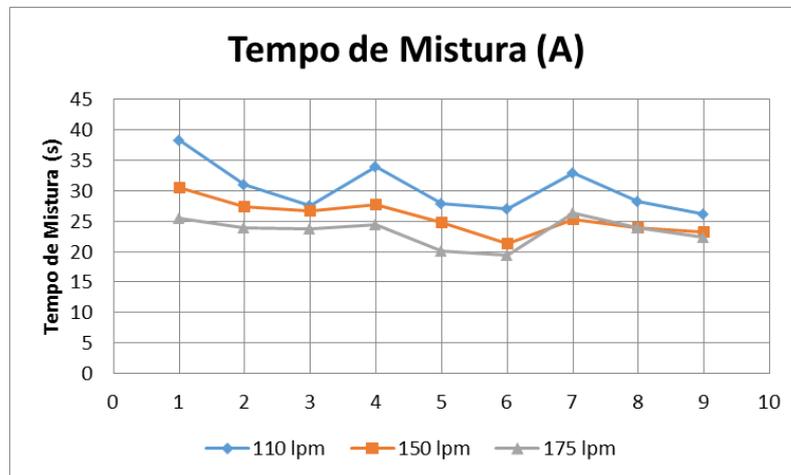


Figura 5.3 - Tempo de mistura (A) em função de condição de operação evidenciado a vazão pela lança, 6 ventaneiras.

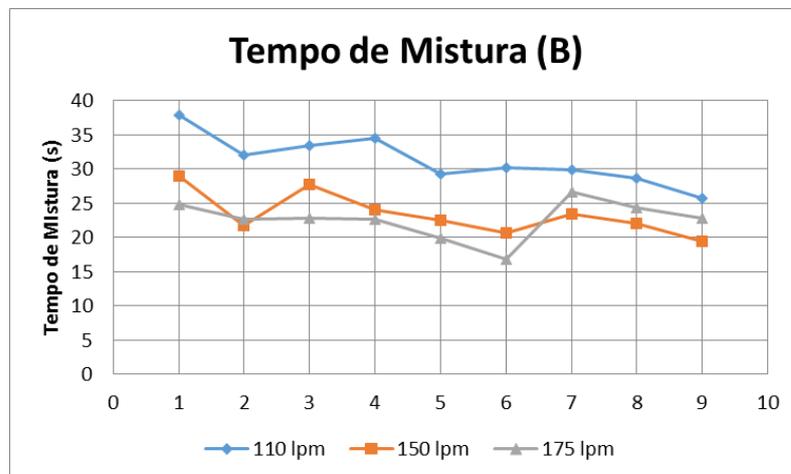


Figura 5.4 - Tempo de mistura (B) em função de condição de operação evidenciando a vazão pela lança, 6 ventaneiras.

Tabela 5.2 - Configuração de teste, 6 ventaneiras.

Rotação da lança (°)	0			20			40		
Vazão pelo fundo (L/min)	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vazão pela lança (L/min)	110	110	110	110	110	110	110	110	110
Tempo de mistura (A)(s)	38,22	31,01	27,53	34,00	27,88	27,08	32,94	28,18	26,23
Tempo de mistura (B)(s)	37,81	32,00	33,43	34,41	29,30	30,13	29,82	28,65	25,75
Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vazão pela lança (L/min)	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Tempo de mistura (A)(s)	30,56	27,42	26,75	27,71	24,71	21,32	25,22	23,92	23,23
Tempo de mistura (B)(s)	29,01	21,75	27,67	23,95	22,56	20,59	23,42	22,02	19,46
Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vazão pela lança (L/min)	175	175	175	175	175	175	175	175	175
Tempo de mistura (A)(s)	25,53	23,93	23,66	24,51	20,03	19,45	26,39	24,00	22,35
Tempo de mistura (B)(s)	24,75	22,67	22,76	22,68	19,93	16,75	26,63	24,29	22,84

○ **Influência da vazão pelo fundo**

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram o tempo de mistura em função da configuração do teste com destaque para as vazões de fundo. A Tabela 5.3 apresenta as configurações correspondentes.

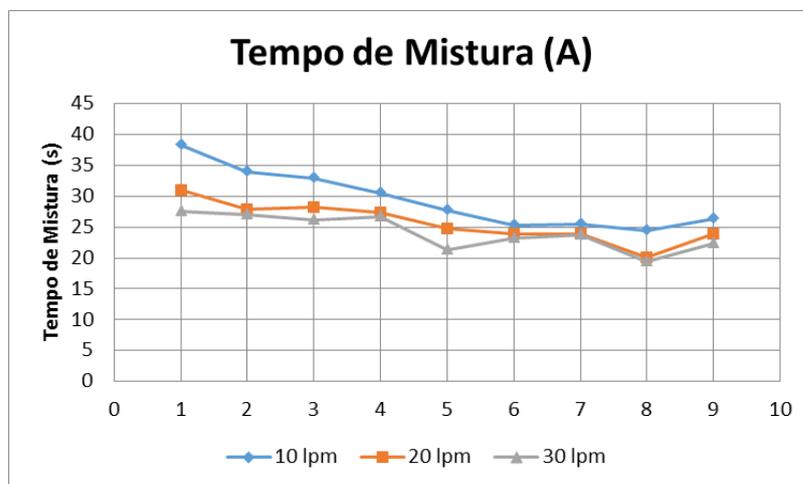


Figura 5.5 - Tempo de mistura (A) em função da condição de operação evidenciando a vazão pelo fundo, 6 ventaneiras.

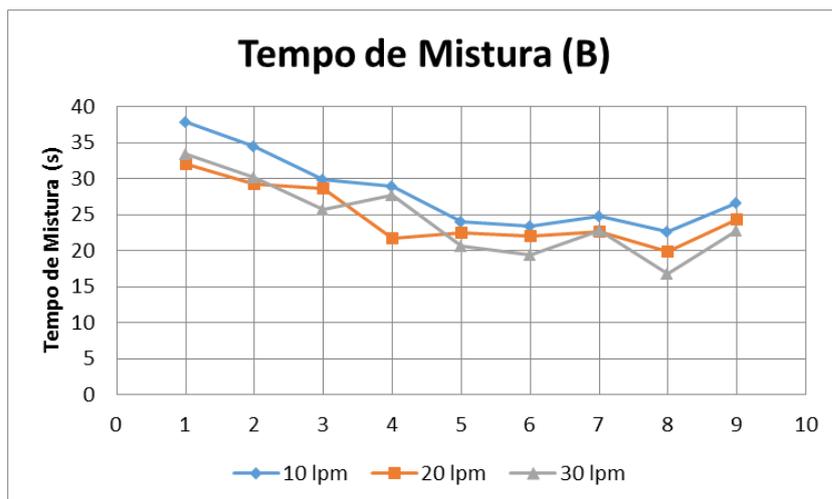


Figura 5.6 - Tempo de mistura (B) em função da condição de operação evidenciando a vazão pelo fundo, 6 ventaneiras.

Tabela 5.3 - Configurações de teste, 6 ventaneiras.

Vazão pela lança (L/min)	110			150			175		
Rotação da lança (°)	0	20	40	0	20	40	0	20	40
Configuração	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vazão pelo fundo (L/min)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tempo de mistura (A)(s)	38,22	34,00	32,94	30,56	27,71	25,22	25,53	24,51	26,39
Tempo de mistura (B)(s)	37,81	34,41	29,82	29,01	23,95	23,42	24,75	22,68	26,63
Configuração	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vazão pelo fundo (L/min)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Tempo de mistura (A)(s)	31,01	27,88	28,18	27,42	24,71	23,92	23,93	20,03	24,00
Tempo de mistura (B)(s)	32,00	29,30	28,65	21,75	22,56	22,02	22,67	19,93	24,29
Configuração	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vazão pelo fundo (L/min)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Tempo de mistura (A)(s)	27,53	27,08	26,23	26,75	21,32	23,23	23,66	19,45	22,35
Tempo de mistura (B)(s)	33,43	30,13	25,75	27,67	20,59	19,46	22,76	16,75	22,84

Percebe-se uma tendência geral de diminuição do tempo de mistura com o aumento da vazão pelas ventaneiras. Vários outros estudos reportam resultados semelhantes (GASPARINI, 2011; GABRIEL, 2009; LAI et al., 2008; SINGH et al., 2007; LUOMALA et al., 2004). Entretanto, ressalta-se novamente a interferência do gás injetado pela lança no padrão de agitação do banho ao interagir com as plumas, como pode ser observado nas condições 6 (150

L/min, 40°) e 7 a 9 (175L/min, 0°, 20° e 40°). No primeiro caso tem-se uma vazão relativamente alta com um padrão de jatos incidindo quase diretamente sobre as plumas. Nos outros, tem-se uma vazão tão alta que o padrão de interação jato-pluma é considerável independentemente da posição relativa entre direção de jato e direção de ascensão de bolhas.

- **Influência do número de ventaneiras**

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram a influência do número de ventaneiras sobre o tempo de mistura as configurações conforme a Tabela 5.4. Todos esses testes foram feitos com rotação da lança de 0°.

Observa-se que de modo geral o comportamento é semelhante para as vazões mais altas (150 L/min e 175 L/min), sendo ligeiramente melhor para o arranjo com seis ventaneiras. Acredita-se que isso seja devido à maior energia cinética do gás injetado, uma vez que se têm vazões iguais e uma área total menor de entrada do fluido no caso do arranjo com menos ventaneiras. Para vazão da lança de 110 L/min, obtiveram-se tempos de mistura consideravelmente menores no arranjo de doze ventaneiras, o que foi inesperado, tendo em vista o menor aporte de energia ao sistema. No entanto, Luomala et al. (2004) reportaram resultados semelhantes ao observarem menor tempo de mistura em condições sem sopro combinado e com menor número de ventaneiras. Isso reforça a ideia de que o modo de interação entre o jato e as plumas é relevante no que diz respeito à homogeneização do banho.

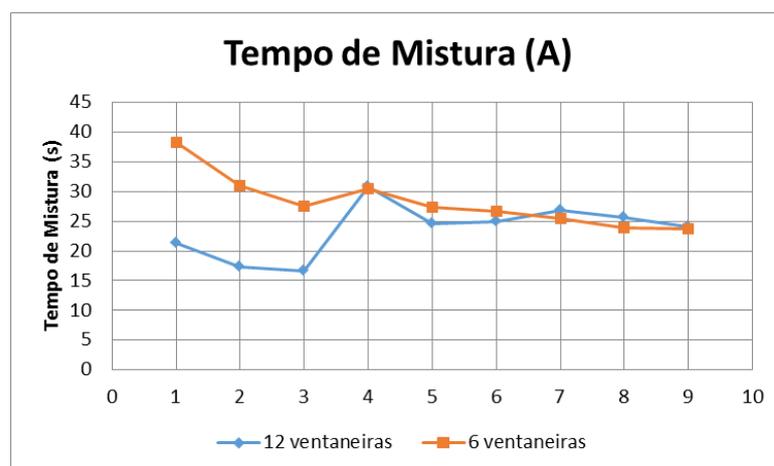


Figura 5.7 – Tempo de mistura (A) em função da condição de operação evidenciando influência do número de ventaneiras.

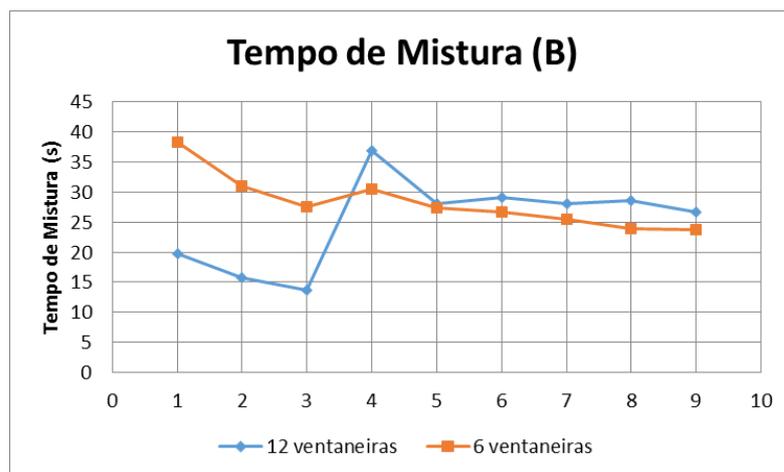


Figura 5.8 - Tempo de mistura (B) em função de condição de operação evidenciando a influência do número de ventaneiras.

Tabela 5.4 – Configurações de teste

Rotação da lança (°)	0								
	110			150			175		
Vazão pela lança (L/min)	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Vazão pelo fundo (L/min)	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Número de ventaneiras	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Tempo de mistura (A)(s)	21,37	17,35	16,70	30,84	24,62	24,99	26,83	25,61	24,08
Tempo de mistura (B)(s)	19,77	15,82	13,75	36,95	28,11	29,05	28,11	28,52	26,64
Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Número de ventaneiras	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Tempo de mistura (A)(s)	38,22	31,01	27,53	30,56	27,42	26,75	25,53	23,93	23,66
Tempo de mistura (B)(s)	37,81	32,00	33,43	29,01	21,75	27,67	24,75	22,67	22,76

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam gráficos de efeito principal e interação para tempo de mistura, que ilustram resumidamente o que foi discutido.

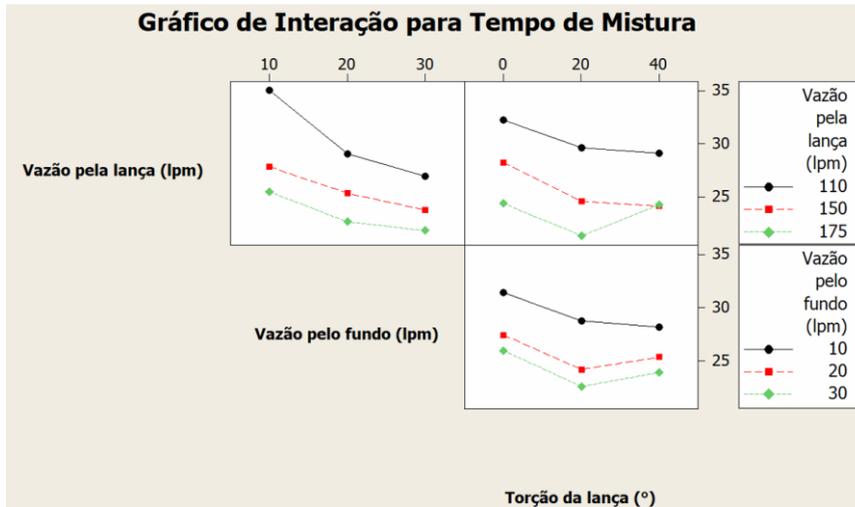


Figura 5.9 - Gráficos de interação para tempo de mistura, 6 ventaneiras.

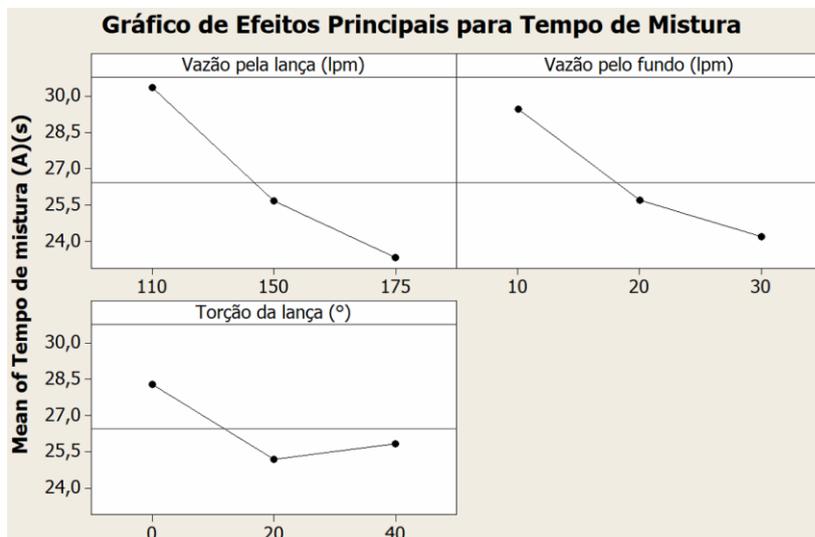


Figura 5.10 - Gráficos de efeitos principais para tempo de mistura, 6 ventaneiras..

Regressão linear

A partir dos valores médios obtidos de tempo de mistura no modelo físico com 6 ventaneiras. realizaram-se duas regressões lineares pelo *software* Minitab com o método *stepwise* ($\alpha = 0,15$) e obtiveram-se as Equações 5.1 e 5.2, correspondentes aos intervalos de 0° e 20° de rotação e 20° e 40° , respectivamente:

$$\text{Tempo Médio (A)} = 52 - 0,2895 \times Vf - 0,1236 \times Vt - 0,1551 \times Tl \dots (5.1)$$

$$R^2_{adj} = 88,61\%$$

$$\text{Tempo Médio (A)} = 45,74 - 0,2593 \times Vf - 0,1037 \times Vt \dots (5.2)$$

$$R^2_{adj} = 84,37\%$$

Onde Vf é a vazão pelo fundo, Vt é a vazão pela lança e Tl é o ângulo de rotação da lança.

A regressão linear foi dividida em duas etapas devido à modificação de tendência observada ao compararem-se as diferenças entre os tempos de mistura para 0° e 20° e 20° e 40°, sugerindo um perfil não linear de influência de 0° a 40°.

5.2 Taxa de Projeção

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam os valores médios obtidos de taxa de projeção em função do ângulo de rotação da lança. A Figura 5.11 ressalta a vazão pelo topo enquanto a Figura 5.12 ressalta a vazão pelo fundo.

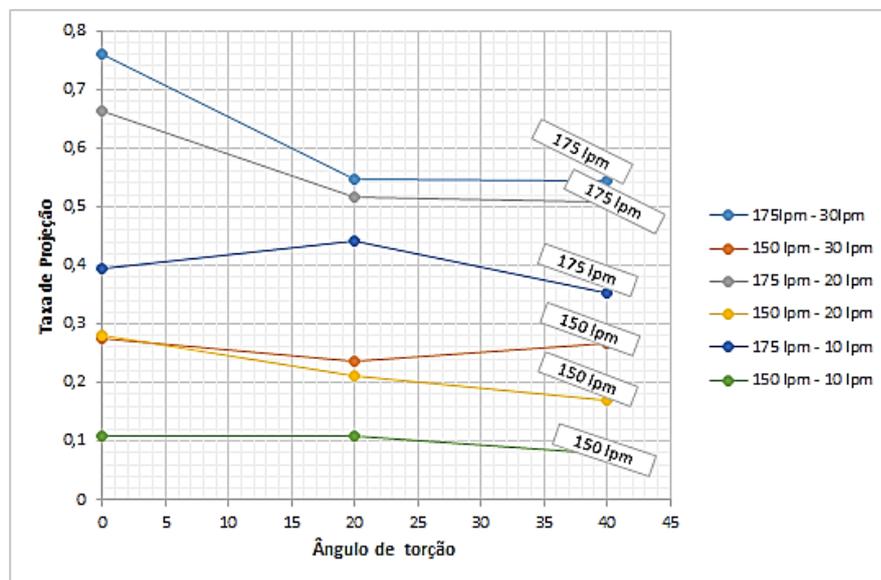


Figura 5.11 - Taxa de projeção média em função do ângulo de rotação da lança destacando vazão pelo topo, 6 ventaneiras.

Analisando-se a influência de vazão de topo, vazão de fundo e rotação, percebe-se que a primeira tem maior influência em relação à segunda e à terceira. Pode-se observar que as maiores taxas de projeção ocorrem nas condições com as maiores combinações de vazão de topo e de fundo, sendo a primeira de maior influência. Uma análise de DOE feita em Minitab permite confirmar essa hipótese (Figura 5.13 e Figura 5.14). Nota-se que para as vazões de 175 L/min – 30 L/min e 175 L/min – 20 L/min a rotação da lança proporcionou diminuição notável na taxa de projeção enquanto para as vazões de 150 L/min – 30 L/min e 150 L/min – 20 L/min o fenômeno ocorre de modo mais sutil. Nas condições de vazão de 10 L/min pelo fundo, a interação jato-pluma é notavelmente menor e, portanto, não apresenta grande influência sobre a taxa de projeção.

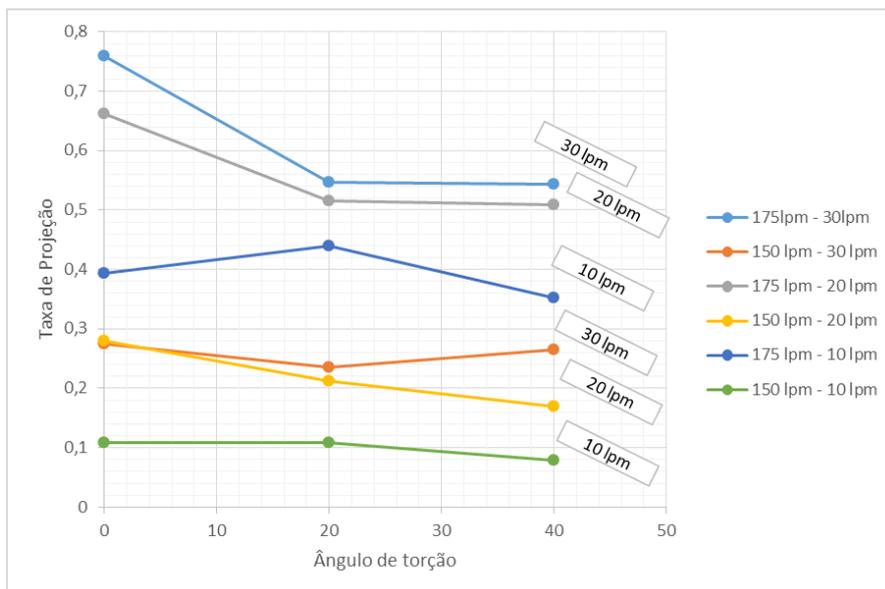


Figura 5.12 - Taxa de projeção média em função do ângulo de rotação da lança destacando vazão pelo fundo, 6 ventaneiras.

Neste estudo, existe diferença significativa ao rotacionar a lança, diferentemente do estudo de Santos (2008), com doze ventaneiras, devido ao menor número de plumas, que intensifica a influência da interação dessas com o jato. A Figura 5.13 mostra gráficos de efeitos principais para taxa de projeção, mostrando que, apesar de menos que os outros fatores, a rotação da lança teve influência. A Figura 5.14 resume as informações apresentadas em um gráfico de interações.

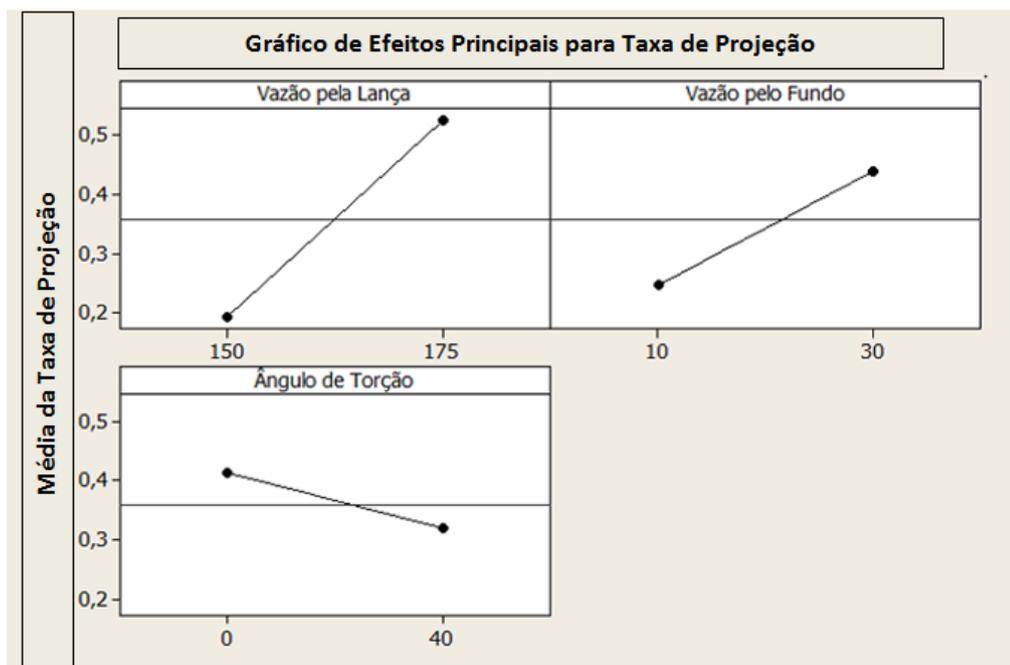


Figura 5.13 - Gráfico de efeitos principais para taxa de projeção, 6 ventaneiras.

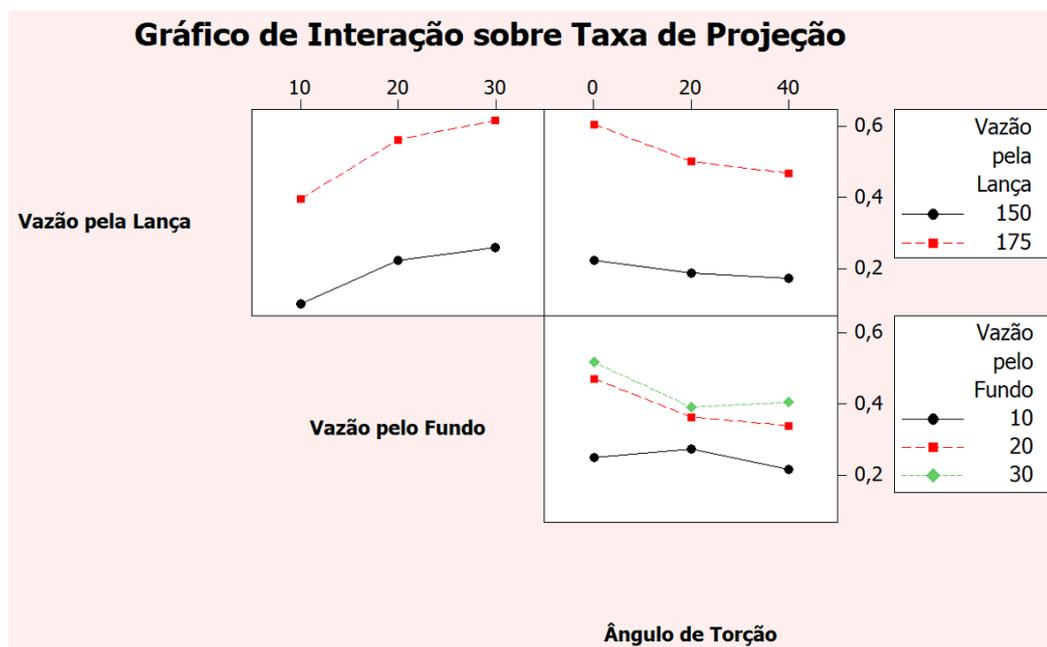


Figura 5.14 - Gráfico de interação sobre taxa de projeção, 6 ventaneiras.

Regressão Linear

A partir das médias obtidas nas diferentes condições analisadas, fez-se uma regressão linear pelo *software* Minitab, com o método *stepwise* ($\alpha = 0,15$). Obteve-se a Equação 5.3:

$$\text{Taxa de projeção} = -1,94 + 0,0133 x Vt + 0,00955 x Vf - 0,00233 x Tl$$

$$R^2_{adj} = 92,1\% \dots (5.3)$$

Onde Vt é a vazão pela lança; Vf é a vazão pelo fundo e Tl é o ângulo de torção da lança.

5.3 Emulsão

A Figura 5.15 apresenta ilustrações dos testes de bancada com querosene e óleo de motor 10W30, 1:1 (a), querosene (b) e óleo de motor 10W30 e querosene, 3:1 (c).

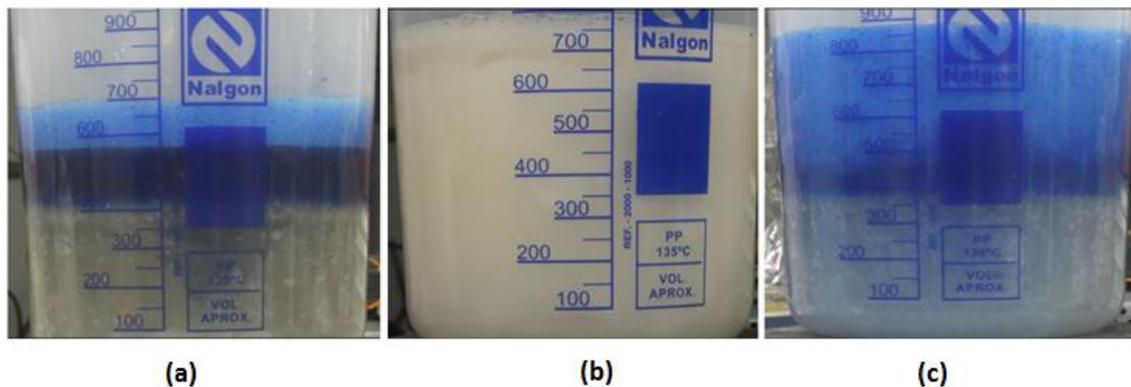


Figura 5.15 - Ilustrações dos ensaios de bancada visando otimização das características do óleo para simular emulsão - (a) Óleo de motor 10W30 e querosene, proporção 1:1; (b) Querosene; (c) Óleo de motor e querosene, proporção 3:1.

Notou-se que o óleo de motor puro forma espuma estável, mas a viscosidade é relativamente elevada, o que dificulta a subida da emulsão e a medição de uma variação de altura. A configuração com querosene puro apresentou formação de espuma descontrolada levando ao transbordo do béquer, indicando viscosidade demasiado baixa. Os testes seguintes foram com misturas de óleo de motor 10W30 e querosene nas proporções 1:1 (Figura 5.15a) e 3:1 (Figura 5.15c). Na proporção 1:1, observou-se o estabelecimento de três fases bem definidas e separadas com a formação de bolhas na interface óleo/solução ácida e rápida travessia das mesmas pela camada de óleo. Optou-se pela última configuração (proporção 3:1), que apresentou variação apreciável de altura de espuma e estabilidade da emulsão.

Medições de viscosidade, densidade e tensão interfacial são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 5.5 – Medições de viscosidade, densidade e tensões interfaciais.

Viscosidade do óleo	31,9 mPa.s
Densidade do óleo	0,85 kg/m ³
Tensão interfacial óleo/solução de ácido acético (4%)	17,69 dina/cm
Tensão interfacial solução de ácido acético (4%)/ar	42,09 dina/cm
Tensão interfacial óleo/ar	24,35 dina/cm

A Figura 5.16 apresenta imagens capturadas das filmagens dos testes de emulsão para 6 e 12 ventaneiras (a e b, respectivamente) com vazões de 200 L/min pela lança e 30 L/min pelas ventaneiras. Considera-se o tempo “0s” o instante em que se inicia o sopro pela lança que possibilita o crescimento efetivo da camada de emulsão. Destaca-se que a formação de emulsão só foi observada na presença de bicarbonato de sódio no óleo, evidenciando que a formação de gás *in situ* é necessária para a evolução do processo no modelo físico.

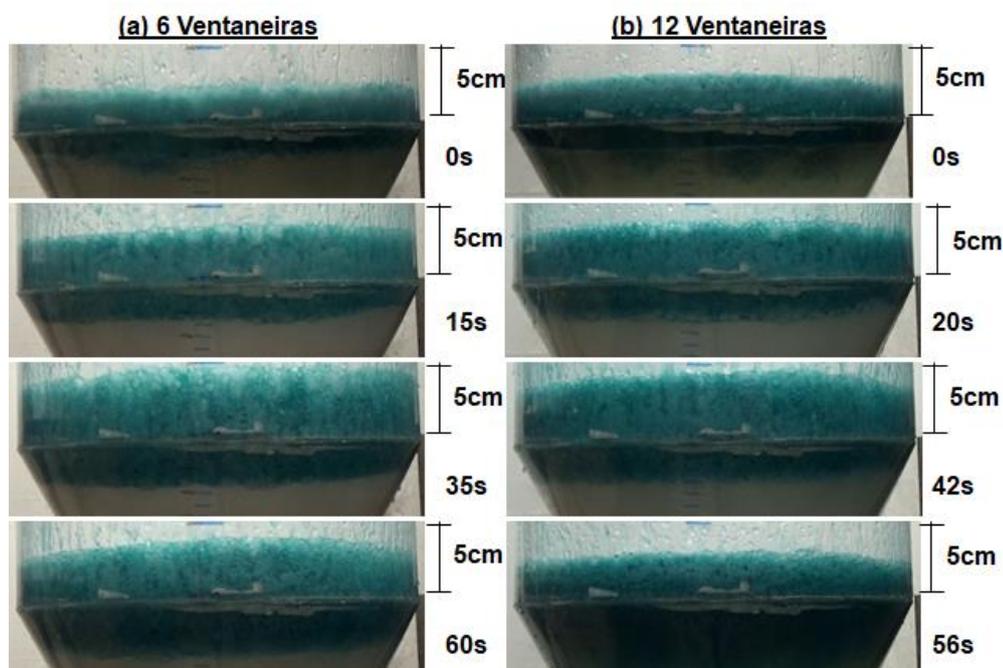


Figura 5.16 - Emulsão para (a) 6 ventaneiras, 200L/min pela lança e 30L/min pelas ventaneiras e (b) 12 ventaneiras, 200L/min pela lança e 30L/min pelas ventaneiras.

A Tabela 5.6 apresenta as configurações analisadas e as medições de altura da camada de espuma correspondente. Ressalta-se que a medição de *hmax sup* corresponde à altura na parte cilíndrica do modelo e *hmax inf* corresponde à espessura da camada de espuma na região tronco-cônica no instante da medição da altura máxima superior (*hmax sup*). O parâmetro *hmax* é a soma de *hmax sup* e *hmax inf*.

Tabela 5.6 - Configurações e medições de altura máxima.

Sequência	1	2	3	1	2	3
Vazão pela lança (L/min)	200	150	200	200	150	200
Vazão pelo fundo (L/min)	30	30	10	30	30	10
N ventaneiras	12	12	12	6	6	6
hmax sup (cm)	4,625	3,816	3,58	5,26	4,32	3,55
hmax inf (cm)	3,17	2,83	1,4	3,33	2,71	2,27
hmax (cm)	7,795	6,646	4,98	8,59	7,03	5,82

Nota-se que a altura máxima de espuma atingida apresentou pouca diferença entre as duas configurações de ventaneiras, como se pode observar também na Figura 5.17. No entanto, a diferença é significativa quando se altera as vazões de gás. Relacionando-se esses dados com os dados obtidos nos testes de projeção, percebe-se que combinações que resultam em maior interação entre jato da lança e plumas intensificam a ejeção de gotículas. Em conformidade com isso, a maior altura atingida foi em uma configuração de maior taxa de projeção (vazão de 200L/min pela lança e 30L/min pelo fundo). Nessa condição de maior projeção, gotas da solução ácida encontram com mais facilidade partículas de bicarbonato no óleo tornando mais intensa a formação de espuma.

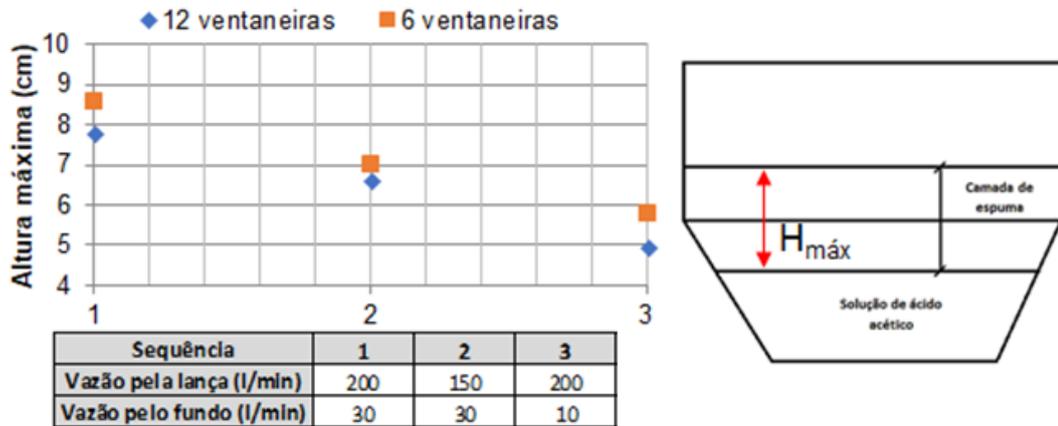


Figura 5.17 - Espessura máxima da camada de espuma em função de condições operacionais (vazões pela lança e pelo fundo) para 6 e 12 ventaneiras.

Analisando-se com mais detalhe a influência das vazões pelo fundo e pela lança, nota-se que a altura máxima atingida parece ser mais sensível à primeira do que à última. Para doze ventaneiras, tem-se:

$$\text{Sensibilidade à vazão pela lança (12 vent.)} = \frac{4,625 - 3,816}{200 - 150} = \underline{0,01618}$$

$$\text{Sensibilidade à vazão de fundo (12 vent.)} = \frac{4,625 - 3,58}{30 - 10} = \underline{0,05225}$$

Para seis ventaneiras, tem-se:

$$\text{Sensibilidade à vazão pela lança (6 vent.)} = \frac{5,26 - 4,32}{200 - 150} = \underline{0,0188}$$

$$\text{Sensibilidade à vazão de fundo (6 vent.)} = \frac{5,26 - 3,55}{30 - 10} = \underline{0,0855}$$

Esses valores sugerem que a vazão pelas ventaneiras tem maior influência sobre a formação de emulsão do que a vazão pela lança. Comparando-se os arranjos de ventaneiras, nota-se que a influência da vazão pela lança é consideravelmente maior no arranjo de 6 do que no arranjo de 12 ventaneiras, uma vez que a interação jato/pluma é maior no primeiro.

A partir das filmagens de evolução da camada de espuma, construíram-se curvas relacionando a espessura da camada de espuma na parte superior do modelo (cilíndrica) com o tempo. Pode-se observar que para a configuração de 6 ventaneiras, o crescimento da camada é ligeiramente mais rápido do que para 12 ventaneiras (Figura 5.17).

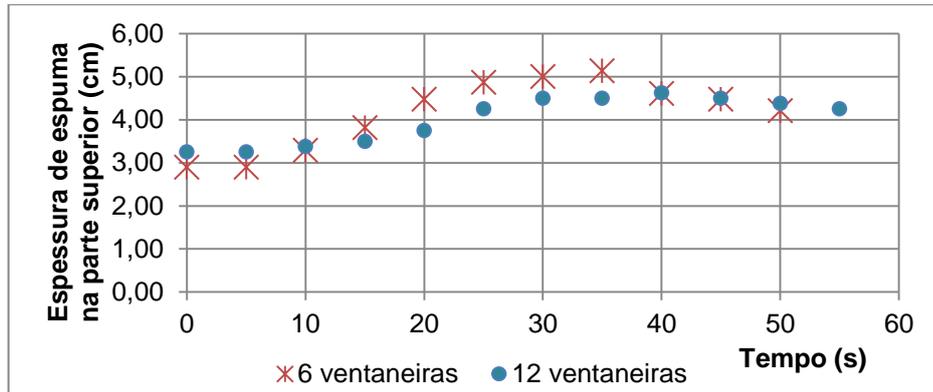


Figura 5.18 - Espessura da camada de espuma na parte superior (cilíndrica) do modelo em função do tempo para 6 e 12 ventaneiras com vazões pela lança e pelo fundo fixas em 200 L/min e 30 L/min respectivamente.

Em todas as configurações analisadas foi observado o fenômeno de emulsão reversa: após atingir a altura máxima de espuma e decaimento da mesma, o óleo mistura em sua totalidade com a solução de ácido acético ocupando todo o modelo. Isso provavelmente se deve à pequena diferença de densidade entre as fases ($\rho_{\text{óleo}} = 0,8$ e $\rho_{\text{solução}} = 1,0$).

6 CONCLUSÃO

Sobre o tempo de mistura, pode-se afirmar:

- Todos os fatores analisados (vazões pelo fundo e pela lança, rotação da lança e número de ventaneiras) tiveram alguma influência sobre o tempo de mistura;
- De modo geral, o aumento das vazões melhorou as condições de homogeneização;
- O tempo de mistura é mais sensível a variações na vazão pelo fundo;
- A rotação da lança para configurações de menor interação entre jato/pluma favorecem a homogeneização do banho;
- O arranjo de seis ventaneiras apresentou desempenho ligeiramente melhor do que o arranjo de doze ventaneiras para todas as configurações, exceto para a vazão mais baixa na lança (110L/min).

Sobre a taxa de projeção, pode-se afirmar:

- A vazão pela lança é o fator de maior influência;
- A interação jato/pluma mostrou-se relevante, como observado na análise DOE feita pelo *software* Minitab;
- As maiores projeções foram observadas nas condições de maior vazão e rotação da lança de 0°.

Sobre os testes de emulsão, pode-se afirmar:

- A geração de gás *in situ* via reação química é fundamental para formação de emulsão no modelo físico;
- As vazões apresentam influência sobre a altura máxima atingida pela espuma, sendo a maior sensibilidade em relação à vazão pelo fundo;
- O número de ventaneiras influenciou pouco na altura máxima, mas esta foi atingida mais rapidamente com o arranjo de seis ventaneiras;
- A viscosidade foi o fator mais importante na determinação da combinação de óleos utilizada nos testes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DANCKWARTS, P. V. *Insights into Chemical Engineering*. Oxford: Pergamon Press, 1981. 268p.
- DAS, A. K.; CHATTERJEE, A.; RAY, H. S. **ISIJ International**, 29 (1989), p.284.
- FABRITIUS, T.M.J.; LUOMALA, M. J.; VIRTANEN, E. O.; TENKKU, H.; FABRITIUS, T. L. J.; SIIVOLA, T.P; HÄRKKI, J. J. Effect of Bottom Nozzle Arrangement on Splashing and Spitting in Combined Blowing Converter. **ISIJ International**, v. 42, n. 8, p. 861-867, 2002.
- GABRIEL, W. V. Efeito da Inclinação dos Bicos das Ventaneiras no Comportamento do Banho em Convertedores de Sopro Combinado. 2009. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- GASPARINI, V. M. Simulação a Frio de um Reator de Sopro Combinado. 2011. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.
- HIGUCHI, Y.; TAGO, Y.; Effect of Nozzle Twisted Lance on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process. **ISIJ International**, v. 43, n. 9, p. 1440-1414, 2003.
- ITO, K.; FRUEHAN, R. J. Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags: Part. I. Foaming Parameters and Experimental Results. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v.20B, p. 509-514, 1989.
- ITO, K.; FRUEHAN, R. J. Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags: Part. II. Dimensional Analysis and Foaming in Iron and Steelmaking Processes. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v.20B, p. 515-521, 1989.
- J. Bikerman, *Foams*, Springer, New York, USA, 1973, p. 80-160 apud LUZ et al., 2018.
- JIANG, R.; FRUEHAN, R. J. Slag Foaming in Bath Smelting. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v.22B, p. 483-489, 1991.
- KATO, Y.; NAKANISH, K.; NOZAKI, T.; SUZUKI, K.; EMI, T. Wave Motion of Metal Bath in Bottom Blowing Converter. **Transactions ISIJ**, v. 25, p. 459-466, 1985.

KIM, H. S.; MIN, D. J.; PARK, J. H. Foaming Behaviour of CaO- SiO₂-FeO-MgO_{satd}-X (X=Al₂O₃, MnO, P₂O₅ and CaF₂) Slags at High Temperatures. **ISIJ International**, v.41, n. 4, p. 317-324, 2001.

KHOZUKHOV, A. A.; FEDINA, V. V.; MERKER, E. E. Study of the Foraming of Steelmaking Slag ad Its Effect on the Thermal Performance of an Electrica-Arc Furnace. **Metallurgist**, v. 56, n. 3, p. 42-44, 2012.

LAI, Z.; XIE, Z.; ZHONG, L.; Influence of Bottom Tuyere ConFfiguration on Bath Stirring in a Top and Bottom Combined Blown Converter. **ISIJ International**, v. 48, n. 6, p. 793-798, 2008.

LUOMALA M.J.; FABRITIUS, T.M.J.; HARKKI, J.J. The Effect of Bottom Nozzle ConFfiguration on the Bath Behavior in the BOF. **ISIJ International**, v. 44, n. 5, p. 809-816, 2004.

LUZ, A. P.; MARTINEZ, A. G. T.; LÓPEZ, F.; BONADIA, P.; PANDOLFELLI, V. C. **Slag Foaming Practice in the Steelmaking Process**. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.186>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

MATSUURA, H.; MANNING, C. P.; FORTES, R. A. F. O.; FRUEHAN, R. J. Development of a Descarburization and Slag Formation Model for the Electric Arc Furnace. **ISIJ International**, v. 48, n. 9, p. 1197-1205, 2008.

MURTHY, G. G. K.; ELLIOTT, J. F.; Definition and Determination of Mixing Time in Gas Agitated Liquid Baths. **ISIJ International**, v. 32, n. 2, p. 190-195, 1992.

OGAWA, Y.; HUIN, D.; GAYE, H.; TOKUMITSU, N. Physical Modelo of Slag Foaming. **ISIJ International**, v. 33, n. 1, p. 224-232, 1993.

SANTOS, V. A. S. Efeito de Algumas Condições Operacionais Sobre a Taxa de Projeção de Aço no Convertedor de Sopro Combinado. 2018. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SINGH, V.; KUMAR, J.; BHANU, C.; AJMANI, S. K. e DASH, S. K. Optimisation of the Bottom Tuyeres Configuration for the BOF Vessel Using Physical and Mathematical Modelling. **ISIJ International**, v. 47, n. 11, p. 1605-1612, 2007.

STADLER, S. A. C.; EKSTEEN, J. J.; ALDRICH, C. Physical Modelling of Slag Foaming in Two-phase and Three-phase Systems in the Churn-flow Regime. **Materials Engineering**, v. 19, p. 237-245, 2006.

ZHANG, Y.; FRUEHAN, R. J. Effect of the Bubble Size and Chemical Reactions on Slag Foaming. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v.26B, p. 803-812, 1995a.

ZHANG, Y.; FRUEHAN, R. J. Effect of Carbonaceous Particles on Slag Foaming. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v.26B, p. 815-816, 1995b.

ZHANG, Y.; FRUEHAN, R. J. Effect of Gas Type and Pressure on Slag Foaming. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v.26B, p. 1088-1091, 1995c.