

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

"Avaliação da Permeabilidade da Zona de Gotejamento de um Alto-forno com Foco  
na Análise dos Fenômenos de Retenção e Refluxo"

Autor: Dimas Henrique Barros Andrade

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Maio - 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dimas Henrique Barros Andrade

**AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DA ZONA DE GOTEJAMENTO DE  
UM ALTO-FORNO COM FOCO NA ANÁLISE DOS FENÔMENOS DE  
RETENÇÃO E REFLUXO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Extrativa  
Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos iniciais são dirigidos aos meus pais, Maria de Lourdes e Milton, pelo exemplo de luta, humildade e persistência;

À Luíza pelo carinho, paciência e companheirismo que me ajudaram a superar as dificuldades;

Ao orientador Professor Roberto Parreiras Tavares, por toda a ajuda na graduação e pós-graduação, e pelo exemplo de seriedade, ética e disciplina.

Aos colegas Elton Queibson Moreira Maia e Henrique Guilherme Lucas Bastos pelo apoio e oportunidade de aprendizado e desenvolvimento.

À Gerdau pela oportunidade de crescimento profissional e confiança depositada na realização deste trabalho;

Aos colegas, Alfredo, Victor e Arthur, pela força, companheirismo e ajuda durante o mestrado.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG pela oportunidade.

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 1  |
| 2. OBJETIVOS.....   | 3  |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 4  |
| 3.1 Retenções de Líquidos e Fluxo Anormal de Líquidos e Gases .....   | 4  |
| 3.2 Descrição do Fenômeno de Retenção e Refluxo de Líquidos .....   | 5  |
| 3.3 Modelo Experimental de Escoamento Bifásico em Leito Empacotado.....   | 7  |
| 3.4 Molhabilidade .....   | 10 |
| 3.5 Diagramas de Retenção e Refluxo.....  | 14 |
| 3.6 Limite Real e Limite Teórico de Refluxo .....   | 19 |
| 4. METODOLOGIA .....  | 22 |
| 4.1 Definição do Histórico a Utilizar.....  | 23 |
| 4.2 Análises e Definição das Variáveis Críticas .....   | 27 |
| 4.2.1 Espessura da Zona de Gotejamento.....   | 29 |
| 4.2.2 Fração de Vazios na Zona de Gotejamento .....   | 31 |
| 4.2.3 Diâmetro Médio das Partículas Sólidas.....  | 33 |
| 4.2.4 Velocidade Superficial do Líquido em Leito Vazio .....  | 38 |
| 4.2.5 Tensão Superficial da Escória .....   | 38 |
| 4.3 Coleta de Informações Operacionais para Posicionamento no Diagrama .....  | 39 |
| 4.4 Determinação dos Limites de Operação dos Altos-fornos Considerando o<br>Percentual Real de Retenção e Refluxo ..... | 40 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 41 |
| 5.1 Análise de Coque das Ventaneiras do Alto-forno 1 .....  | 41 |
| 5.2 Diagramas de Retenção e Refluxo para os Altos-Fornos .....  | 44 |
| 5.2.1 Diagramas para Diferentes Medições de Pressões .....  | 46 |
| 5.2.2 Diagramas Comparando Antes e Depois do Ano de 2008 .....  | 52 |
| 5.2.3 Impacto da Molhabilidade Entre Escória e Coque na Intensidade de<br>Irrigação Adimensional .....                  | 54 |
| 5.3 Diagramas de Retenção e Refluxo para o Alto-forno 2.....  | 55 |
| 5.4 Análise de Sensibilidade das Variáveis Críticas .....   | 59 |
| 5.5 Limites para Operação da Retenção e Refluxo para o Alto-forno 1.....  | 63 |
| 6. CONCLUSÕES.....  | 66 |
| 7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS .....  | 68 |

|   |    |
|---|----|
| 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ..... | 69 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....       | 70 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Separação do alto-forno em zonas CASTRO e TAVARES (1998). .....  | 1  |
| Figura 3.1: Impacto do aumento da produtividade nos fluxos ascendentes e descendentes. JFE STEEL CORPORATION (2015) .....  | 5  |
| Figura 3.2: Esboço da Zona de Gotejamento e a coexistência de líquido, gás e coque. JFE STEEL CORPORATION (2015).....  | 6  |
| Figura 3.3: Desenho esquemático do equipamento utilizado para o estudo de retenção e refluxo. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982) .....  | 9  |
| Figura 3.4: Ângulos de contato $\theta$ e molhabilidade. CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BORRACHA.....   | 11 |
| Figura 3.5: Variação do ângulo de contato com o tempo para diferentes tipos de escória. Escórias 1,2 e 3 com Basicidade (CaO/SiO <sub>2</sub> ) de 1,0, 1,3 e 1,6, respectivamente. KANG <i>et al.</i> (2005)..... | 12 |
| Figura 3.6: Variação do ângulo de contato da Escória 2 com o tempo para diferentes tipos de coque. Coque com as características conforme tabela III.3. KANG <i>et al.</i> (2005) .....                             | 13 |
| Figura 3.7: Efeito da basicidade da escória no ângulo de contato (Considerando tempo de interação de 135min com o Coque A e as três basicidades). KANG <i>et al.</i> (2005) .....                                  | 13 |
| Figura 3.8: Efeito do teor de cinzas do coque no ângulo de contato (Considerando tempo de interação de 105min com o a Escória 2). KANG <i>et al.</i> (2005) .....  | 14 |
| Figura 3.9: Dados de várias pesquisas sobre “Flooding” plotadas no diagrama de SHERWOOD. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982) .....   | 15 |
| Figura 3.10: Dados plotados no diagrama de “Flooding” de Mersmann. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982). .....  | 16 |
| Figura 3.11: Proposta de diagrama de “Flooding” de Fukutake para vários níveis de molhabilidade. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982) .....   | 17 |
| Figura 3.12: Comparação do dados observados por MATSU-URA e OHNO (1994) e os resultados no diagrama de “Flooding” proposto por Fukutake.....   | 18 |
| Figura 3.13: Diagrama de “Flooding” proposto por MATSU-URA e OHNO (1994)...  | 19 |
| Figura 3.14: Diagrama de “Flooding” apresentado pela JFE à Gerdau Ouro Branco apresentando o conceito e propondo um limite real. JFE STEEL CORPORATION (2015) .....  | 20 |
| Figura 3.15: Análise de líquidos e finos coletados ao longo do raio do alto-forno. NEGRO <i>et al.</i> (2001) .....  | 21 |
| Figura 4.1: Produção em 2014 e 2015 do alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco.....   | 24 |
| Figura 4.2: Quantidade específica de escória em 2014 e 2015 do alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco .....  | 24 |
| Figura 4.3: Pressão média da rampa do alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco em 2014 e 2015.....   | 25 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.4: Volume médio total de líquidos produzidos no alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco em 2014 e 2015.....   | 25 |
| Figura 4.5: a) Corte transversal do alto-forno #2 identificando os pontos de tomada de pressão. b) Corte transversal do alto-forno #1 identificando os pontos de tomada de pressão..... | 28 |
| Figura 4.6: Zona de coesão em relação às tomadas de pressão do alto-forno 1.....  | 30 |
| Figura 4.7: Relação da fração de vazios do leito ( $\epsilon$ ) com o diâmetro médio ( $D_p$ ). JFE STEEL CORPORATION (2015).....   | 32 |
| Figura 4.8: – CSR do coque com a degradação média do topo até o homem-morto. NEGRO <i>et al.</i> (2001) .....   | 34 |
| Figura 4.9: Permeabilidade no nível das ventaneiras ao longo do raio. NEGRO <i>et al.</i> (2001) .....  | 35 |
| Figura 4.10: Percentual de degradação do coque do topo até a região das ventaneiras de acordo com o volume interno do alto-forno. JFE STEEL CORPORATION (2015). .....                   | 35 |
| Figura 4.11: Rota de abastecimento do coque da usina da Gerdau Ouro Branco. ....  | 36 |
| Figura 4.12: Regressão polinomial de 2º grau da degradação do coque para altos-fornos japoneses. ....   | 37 |
| Figura 4.13: Diagrama ternário para estimar tensão superficial de escória de um sistema $Al_2O_3$ , $SiO$ e $CaO$ . SLAG ATLAS (1981). ....   | 39 |
| Figura 5.1: Preparação para coleta de coque da ventaneira.....  | 41 |
| Figura 5.2: Caixa fechada com coque da ventaneira refrigerada com nitrogênio gasoso. ....   | 42 |
| Figura 5.3: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 1.....   | 45 |
| Figura 5.4: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 2.....   | 45 |
| Figura 5.5: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1.....   | 46 |
| Figura 5.6: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S1 para o alto-forno 1.....   | 47 |
| Figura 5.7: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 1.....   | 47 |
| Figura 5.8: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 com frequência de pressões altas.....  | 48 |
| Figura 5.9: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S1 para o alto-forno 1 com frequência de pressões altas.....  | 49 |
| Figura 5.10: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 1 com frequência de pressões altas.....   | 49 |
| Figura 5.11: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 sem ocorrência de pressão alta. ....  | 50 |
| Figura 5.12: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S1 para o alto-forno 1 sem ocorrência de pressão alta. ....  | 51 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.13: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 1 sem ocorrência de pressão alta. ....                      | 51 |
| Figura 5.14: Histórico da intensidade de irrigação adimensional de MATSU-URA para o alto-forno 1. ....  | 52 |
| Figura 5.15: Histórico do diâmetro harmônico do coque abastecido no alto-forno 1. ....  | 53 |
| Figura 5.16: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 separando antes e após o ano de 2008. ....            | 53 |
| Figura 5.17: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 com ângulo de contato de 75°. ....                    | 54 |
| Figura 5.18: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 com ângulo de contato de 120°. ....                   | 55 |
| Figura 5.19: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S1 para o alto-forno 2. ....   | 56 |
| Figura 5.20: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S3 para o alto-forno 2. ....   | 56 |
| Figura 5.21: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 2. ....   | 57 |
| Figura 5.22: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S1 para o alto-forno 2 com frequência de pressões altas. ....                | 58 |
| Figura 5.23: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S3 para o alto-forno 2 com frequência de pressões altas. ....                | 58 |
| Figura 5.24: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 2 com frequência de pressões altas. ....                    | 59 |
| Figura 5.25: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 utilizando fração de vazios fixa em 0,50. ....        | 62 |
| Figura 5.26: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 utilizando fração de vazios fixa em 0,40. ....        | 62 |
| Figura 5.27: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 utilizando fração de vazios fixa em 0,33. ....        | 63 |
| Figura 5.28: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 sem ocorrência de pressão alta após ano de 2008. .... | 64 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela III.1 – Comparação dos números adimensionais de processo de alto-forno com os realizados nos experimentos. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982) ..... | 10 |
| Tabela III.2 - Composição Química das Amostras de Escória a 1600°C (% em massa). KANG <i>et al.</i> (2005).....                                     | 11 |
| Tabela III.3 - Composição Química das Amostras de Coque (% de Carbono e % de Cinza). KANG <i>et al.</i> (2005).....                                 | 12 |
| Tabela IV.1 - Dados de projeto dos altos-fornos da Gerdau Ouro Branco .....   | 22 |
| Tabela IV.2 - Aquisição de dados dos altos-fornos da Gerdau Ouro Branco .....   | 26 |
| Tabela IV.3: Regressões e cálculos de degradação para diferentes tamanhos de altos-fornos.....  | 37 |
| Tabela V.1: Análises granulométricas dos coques coletados nas ventaneiras do alto-forno 1 .....   | 42 |
| Tabela V.2: Diâmetros harmônicos do coque carregado, do coque das ventaneiras e as suas respectivas degradações. ....                               | 43 |
| Tabela V.3: Faixas mínimas e máximas das variáveis críticas do histórico dos altos-fornos.....  | 44 |
| Tabela V.4: Limites reais de retenção e refluxo para queda de pressão do alto-forno 1.50  |    |
| Tabela V.5: Faixas consideradas na análise de sensibilidade para os altos-fornos. ....  | 60 |
| Tabela V.6: Resultados da análise de sensibilidade das variáveis críticas para os altos-fornos.....   | 61 |
| Tabela V.7: Limites da queda de pressão entre sopro e nível B2 para diferentes intensidades de irrigação adimensional.....                          | 64 |

## SÍMBOLOS

|                      |   |
|----------------------|---|
| JFE                  | - Siderúrgica Japonesa da união da NKK e Kawasaki Steel   |
| NKK                  | - Nihon Kokan Kabushiki (Siderúrgica Japonesa)  |
| FRR                  | - Fenômenos de Retenção e Refluxo   |
| IIA                  | - Intensidade de Irrigação Adimensional de MATSU-URA  |
| PTFE                 | - Politetrafluoretileno   |
| Re                   | - Número de Reynolds (-)  |
| Ga                   | - Número de Galileo (-)   |
| C <sub>p</sub>       | - Número de Capilaridade (-)  |
| N <sub>c</sub>       | - Força Superficial adimensional (-)  |
| Delta P              | - queda de pressão adimensional (-)   |
| a <sub>t</sub>       | - área de superfície total das partículas por unidade de volume (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) |
| V <sub>g</sub>       | - velocidade superficial do gás baseada em coluna vazia (m/s)                                     |
| ρ <sub>g</sub>       | - densidade do gás (kg/m <sup>3</sup> )   |
| η                    | - viscosidade do líquido em centipoise (10 <sup>-3</sup> Pa.s)                                    |
| g                    | - aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )   |
| ε                    | - fração de vazios do leito (-)   |
| ρ <sub>l</sub>       | - densidade do líquido (kg/m <sup>3</sup> )   |
| V <sub>l</sub>       | - velocidade superficial do líquido baseada em coluna vazia (m/s)                                 |
| ΔP <sub>d</sub>      | - queda de pressão através do leito (Pa)  |
| ΔL                   | - altura do leito que é medido o ΔP (m)   |
| μ <sub>l</sub>       | - viscosidade do líquido (Pa.s)   |
| d <sub>p</sub>       | - diâmetro harmônico da partícula (m)   |
| u                    | - velocidade superficial do líquido baseada em coluna vazia (m/s)                                 |
| θ                    | - ângulo de contato do líquido no sólido (-)  |
| σ                    | - tensão superficial do líquido (N/m)   |
| Φ                    | - esfericidade das partículas de coque (-)  |
| CSR                  | - Coke Strength after Reaction  |
| Prod                 | - produção de gusa por segundo (t/s)  |
| SR                   | - massa específica de escória (kg/t de gusa)  |
| A <sub>cadinho</sub> | - área do cadinho do alto-forno (m <sup>2</sup> )   |

## RESUMO

A operação dos altos-fornos tem sido cada vez mais dificultada devido às qualidades químicas e físicas das matérias-primas disponíveis, seja pelo seu empobrecimento com o passar dos anos ou pelo fato de alto custo das que ainda têm qualidade. A qualidade das matérias-primas, principalmente coque e sínter, são primordiais em todas as zonas do reator, porém nesse trabalho o foco é na Zona de Gotejamento.

A qualidade do coque carregado que chega à Zona de Gotejamento, a vazão de líquidos e a vazão dos gases são fatores críticos para definir a permeabilidade dessa região, sendo que todos têm que coexistir naquele local com o mínimo de turbulência possível. Na zona de gotejamento há 3 fluxos naturais para os 3 protagonistas citados acima: o coque é consumido da superfície para o centro e desce, os líquidos ferro-gusa e escória descem e o gás sobe. Sendo que os líquidos e o gás têm que passar em contra fluxo nos espaços vazios entre as partículas de coque.

Diversos estudos já foram realizados sobre a dinâmica de fluidos em leitos empacotados e nessa dissertação foi abordada a similaridade dessas condições com a zona de gotejamento de um alto-forno, para então entender a dinâmica dos líquidos e do sólido nessa região relacionando com fatores operacionais e qualidade de matérias primas. O principal entendimento que foi objetivado é a relação dos volumes de líquidos (nível de produção de ferro gusa e quantidade específica de escória) e qualidade da escória e do coque com instabilidades operacionais, assim foi possível identificar limites ou ajustes necessários quando um ou mais dos protagonistas variarem da condição típica.

O foco do aprofundamento desse conhecimento, quanto ao volume de líquidos e gases, significa maior produtividade para os altos-fornos da Gerdau Ouro Branco, o que gera valor para empresa com a diminuição dos custos fixos ou oportunidade de aumentar volumes de produção caso haja demanda de mercado.

O trabalho foi conduzido a partir da análise dos dados históricos da Gerdau Ouro Branco. Esses dados serviram de base para estimar as variáveis críticas e essas foram utilizadas para posicionar no diagrama de retenção e refluxo de MATSU-URA e OHNO (1994) cada momento das condições operacionais de altos-fornos. O posicionamento no diagrama indicou os limites de operação quando houve instabilidades operacionais e possibilitou quantificar o impacto de cada variável crítica, assim é possível propor ações de ajuste operacional visando uma produção de líquidos maior.

## ABSTRACT

The operation of the blast furnaces has been increasingly hampered due to the chemical and physical qualities of the available raw materials, either because of their impoverishment over the years or because of the high cost of those that still have quality. The quality of the raw materials, mainly coke and sinter, are paramount in all zones of the reactor, but in this work the focus will be on the dripping zone.

The quality of the charged coke that arrives in the dripping zone, the liquid flow and the gas flow are critical factors to define the permeability of this region, all of which have to coexist in that location with the least possible turbulence. In the dripping zone there are 3 natural streams for the 3 protagonists mentioned above: the coke is consumed from the surface to the center and descends, the liquids, hot metal and slag, drip and the gas rises. Wherein liquids and gas have to pass in a countercurrent flow through the voids between the coke particles.

Several studies have already been carried out on fluid dynamics in packaged beds, and in this thesis the similarity of these conditions of the dripping zone of a blast furnace was discussed, in order to understand the dynamics of liquids and solid in this region related to operational factors and raw materials quality. The main understanding was the relationship between total liquid volumes (hot metal production and slag-rate) and slag and coke quality with operational instability, so it was possible to identify the limits or necessary adjustments when one or more of the variables change from the typical condition.

The focus of this knowledge on the volume of liquids and gases means higher productivity for the blast furnaces of Gerdau Ouro Branco, which generates value for the company with the reduction of fixed costs or the opportunity to increase production if there is market demand.

The work was conducted based on the analysis of the historical data of Gerdau Ouro Branco. These data served as a basis for estimating the critical variables and these were used to plot each moment of the blast furnace operational conditions in flooding diagram. The plotting in the diagram indicated limits for operation when there were operational instabilities and it was possible to quantify the impact of each critical variable, so it is possible to propose actions of operational adjustment aiming at a higher liquid production.

## 1. INTRODUÇÃO

Profissionais responsáveis por operação de altos-fornos sabem bem a importância da permeabilidade. O termo permeabilidade pode ser entendido como uma medida da facilidade com que os fluidos passam pelos vazios dos materiais que são carregados pelo topo: coque, sinter, pelota e minério granulado.

O alto-forno é dividido em várias regiões com características e materiais diferentes, em estados físicos e químicos variados. A figura 1.1 mostra essas regiões e seus respectivos nomes.



Figura 1.1: Separação do alto-forno em zonas CASTRO e TAVARES (1998).

A zona de gotejamento é a região onde há o leito de coque, através do qual escoam em sentido descendente metal e escória líquidos provenientes da zona coesiva, e em

sentido ascendente os gases provenientes da região das ventaneiras. O combustível (coque) presente nesta região é continuamente consumido.

A permeabilidade da zona de gotejamento é dependente da qualidade física do combustível, da vazão e da viscosidade dos líquidos e da vazão dos gases. Como os três protagonistas, coque, líquidos e gases necessitam coexistir no mesmo espaço, as alterações nas respectivas características ou em suas quantidades afetam na estabilidade daquela região. Quão estável ou não está, é algo que pode facilitar ou dificultar o processo, mas não só isso, os três protagonistas desempenham um papel muito importante em produtividade, custos de produção e qualidade de produto.

O conceito de “Flooding” (fenômenos de retenção e refluxo) ser um restritivo para a produtividade nos altos-fornos da Gerdau Ouro Branco foi introduzido pela consultoria da JFE, empresa japonesa que veio da fusão da antiga NKK e Kawasaki Steel. Houve a apresentação desse conceito em uma situação onde se tinha dificuldade de alcançar alta produtividade com elevada produção específica de escória, o “Slag-Rate”.

Esse trabalho propõe um maior entendimento dos fenômenos da Zona de Gotejamento e como ela influencia na estabilidade operacional, restringindo ou não as qualidades das matérias primas relacionadas à qualidade do coque e escória, a produção de gusa e o volume específico de escória.

## **2. OBJETIVOS**

Identificar as condições limite reais de retenção e refluxo de líquidos na zona de gotejamento e definir as variáveis críticas para os altos-fornos da Gerdau Ouro Branco, através do posicionamento nos diagramas de MATSU-URA e OHNO (1994).

Avaliar o impacto dessas variáveis críticas, que são diferentes para todos os altos-fornos e não são possíveis de serem medidas durante operação, na intensidade de irrigação adimensional.

Desenvolver um modelo que avalie a interação entre as variáveis críticas e que possibilite alcançar uma produtividade de total de líquidos maior nos altos-fornos.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente trabalho baseia-se em estudos de leitos empacotados com escoamento bifásico, gases e líquidos. Em geral, foram os engenheiros químicos que aprofundaram nessa linha de conhecimento e seus experimentos serviram de base para que outros pesquisadores encontrassem semelhanças entre esses experimentos e o processo de alto-forno.

O fenômeno de retenção e refluxo (FRR), ou “Flooding” em inglês, é o principal conceito que é analisado ao longo da revisão bibliográfica.

#### **3.1 Retenções de Líquidos e Fluxo Anormal de Líquidos e Gases**

Na região chamada de Zona de Gotejamento, que fica exatamente abaixo a Zona de Amolecimento e Fusão, a escória e o ferro-gusa no estado líquido escoam através de um leito de coque metalúrgico em contracorrente com um fluxo gasoso.

A semelhança entre os fluxos nessa região do alto-forno e o fluxo em contracorrente de gás e líquidos em um leito empacotado foi sugerido por alguns engenheiros químicos, a exemplo de ELLIOTT, BUCHANAN e WAGSTAFF (1952)

Uma corrente de engenheiros sugeriu que o refluxo e retenção (“Flooding”) da escória na parte inferior do alto-forno poderia ser uma das causadoras de instabilidades operacionais como engaiolamento e chaminés, e essas ocorrências limitam a produtividade e aumentam o risco de um acidente operacional de maiores proporções.

Ao aumentar a produtividade, inevitavelmente irá ocorrer diferença na condição operacional do alto-forno, por exemplo, o fluxo de gás ascendente, a velocidade da descida de carga, vazão de líquidos para o cadinho e a vazão que tem que ser retirada do mesmo irá aumentar, conforme indicado esquematicamente na figura 3.1.

## Aumento de Produtividade

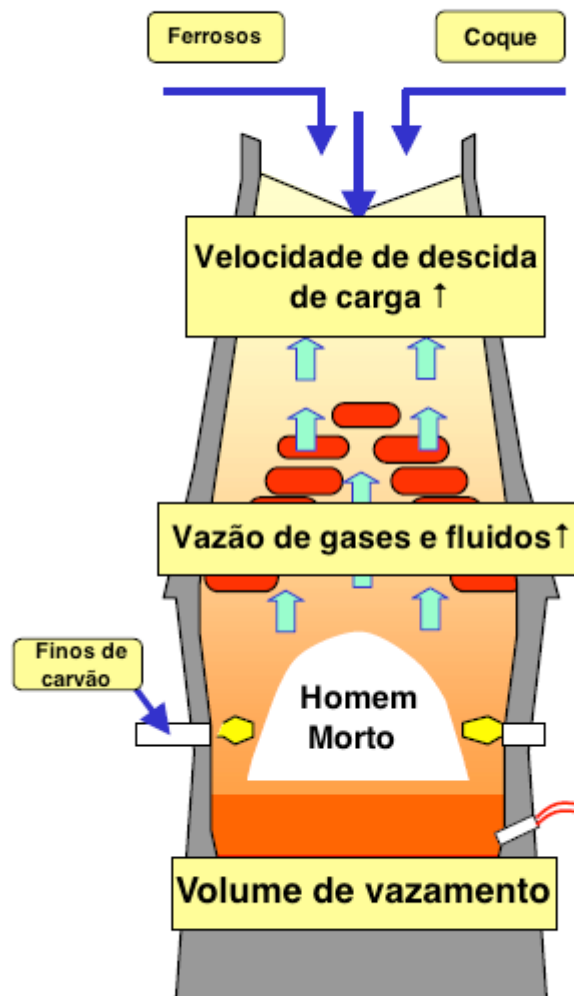


Figura 3.1: Impacto do aumento da produtividade nos fluxos ascendentes e descendentes. JFE STEEL CORPORATION (2015)

### 3.2 Descrição do Fenômeno de Retenção e Refluxo de Líquidos

Como foi dito no item 3.1, o aumento da produtividade leva a um aumento no fluxo gasoso ascendente e um aumento na vazão de líquidos descendente. No geral, nas operações de altos-fornos não se ajusta as características físicas do coque para um aumento ou diminuição de produtividade. Assim, fica claro que se considerar o mesmo leito de partículas sólidas, que terá a mesma fração de vazios, e aumentar o fluxo de gases e líquidos haverá maior competição entre os fluidos por um mesmo espaço. Uma visão microscópica da região é esboçada na Figura 3.2.

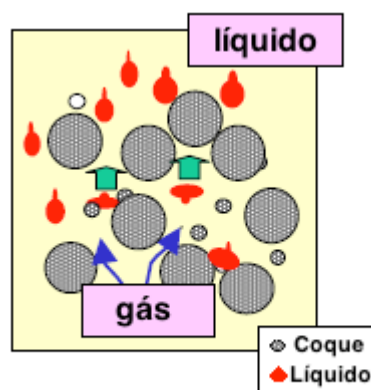


Figura 3.2: Esboço da Zona de Gotejamento e a coexistência de líquido, gás e coque.  
JFE STEEL CORPORATION (2015)

Essa competição pelo mesmo espaço é o fator limitante para um aumento de produtividade, pois em algum momento o fluxo natural será comprometido e causará a impermeabilização do leito, o que em termos de processo de alto-forno significa aumentar a diferença de pressão entre dois pontos e em uma evolução desse fenômeno pode causar engaiolamentos e conseqüentemente arriamentos.

É importante deixar claro que toda vez que se menciona líquidos, no caso do fenômeno “Flooding” em alto-forno, o líquido que é crítico para essa situação é a escória. A escória tem a densidade de 2,5 vezes a 3 vezes menor do que o ferro-gusa líquido e portanto, a força exercida em sentido contrário ao peso para provocar a retenção irá reter preferencialmente a escória ao ferro líquido.

Outra característica desfavorável para a escória nesse fenômeno é a sua fluidez. É sabido que a viscosidade da escória é muito maior do que a do ferro, e conseqüentemente, a fluidez é bem menor, o que prejudica o seu escoamento em um caminho estreito e tortuoso.

Nesse contexto, é importante diferenciar dois fenômenos distintos, o “Flooding” e a Fluidização. O início do “Flooding” pode ser entendido como o fator limitante para o escoamento normal dos líquidos, os líquidos são retidos e/ou vão em sentido contrário ao do escoamento objetivado. Por outro lado, a Fluidização pode ser entendida como um excesso de forças que os gases fazem no leito empacotado, assim suportando a coluna impedindo que a mesma siga seu caminho objetivado. O ideal no processo de alto-forno é que não haja nenhum desses fenômenos, de forma que o contato gás/sólidos seja intenso para que as trocas térmicas e as reações de redução sejam eficientes na região logo acima

da Zona de Amolecimento e Fusão, mas que o fluxo de líquidos seja estável e constante na região logo abaixo dessa zona.

Na investigação dos fenômenos, análises experimentais em temperatura ambiente foram executadas para avaliar diferentes condições e alterando algumas variáveis. No modelo físico apresentado a seguir foram avaliadas a retenção de líquidos, a perda de pressão no leito e fluidização ao alterar variáveis como as velocidades dos líquidos e gases, densidades, viscosidades, tensão superficial, molhabilidade, tamanho das partículas, formato das partículas, etc.

### **3.3 Modelo Experimental de Escoamento Bifásico em Leito Empacotado**

Para evoluir na constatação da semelhança da Zona de Gotejamento de um alto-forno com o escoamento de gases e líquidos em um leito empacotado, foram necessários vários estudos, inclusive via modelos experimentais. Para definir as condições para realizar o experimento foi importante avaliar as semelhanças e diferenças entre os processos químicos base e o processo de alto-forno.

Como semelhanças estão os princípios, escoamento de gases e líquidos em um leito de partículas sólidas.

Como diferenças, pode-se listar algumas principais:

- 1) As interações escória/coque e ferro/coque são interações onde não há molhabilidade dos líquidos no sólido, enquanto em processos químicos, o mais comum são situações onde há molhabilidade. O próximo item, 3.1.3, é para abordar essa característica;
- 2) As velocidades superficiais da escória líquida e ferro líquido são muito baixas em comparação aos processos químicos, no alto-forno elas são da ordem de 0,08mm/s (FUKUTAKE e RAJAKUMAR, 1982). O item 3.2.4 abordará as velocidades superficiais dos líquidos;
- 3) Os leitos são bem diferentes quanto à fração de vazios, o leito de coque apresenta uma fração de vazios bem menor que os processos químicos;
- 4) No alto-forno os líquidos têm uma densidade bem maior do que os sólidos, mais que 2,5 vezes (FUKUTAKE e RAJAKUMAR, 1982). Nos processos químicos típicos, os sólidos apresentam densidade maior do que os líquidos.

FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982) realizaram experimentos em um aparato para simular condições parecidas com o processo de alto-forno, figura 3.3. O equipamento utilizado consistia de uma coluna de vidro de 95mm de diâmetro interno e 650mm comprimento (12). Diferentes colunas foram preparadas em experiências com molhabilidade e sem. Para este último, o interior da parede da coluna foi revestida com uma película de P.T.F.E. (Poly Tetra Fluoro Etileno) para torná-lo não-molhável. A coluna foi suspensa a partir de uma extremidade de uma coluna (2) que foi equilibrada ajustando o contrapeso (4) quando a coluna estava sem líquido. A retenção de líquido foi determinada a partir de medições do aumento no peso da coluna, utilizando uma célula de carga (1).

O líquido foi circulado por uma bomba (21) e o fluxo foi alterado mudando a altura do tanque de abastecimento (6) ou o tamanho dos tubos capilares (9). O líquido foi alimentado na coluna através um distribuidor (11) que tinha dezenove pontos de abastecimento. O líquido deixou o distribuidor (11) em gotas, exceto para as experiências de taxas de escoamento elevadas e alta viscosidade do líquido. O líquido da coluna foi descarregado para um coletor (15) e o fluxo foi medido continuamente utilizando um medidor de fluxo feito especialmente para esse aparato.

O ar foi fornecido através de cinco bicos conectados a uma entrada principal de gás (16). Um diafragma fino (24) na parte inferior serviu como uma vedação ao gás. O ar, depois de passar através da coluna, foi liberado para a atmosfera. O empuxo exercido pelo gás na coluna foi compensado por uma injeção de gás, sob uma pressão igual à da base, na parte superior da coluna por um mecanismo (5), que tinha um diafragma idêntico ao da parte inferior da coluna. Tal compensação permitiu medir a queda de pressão total através da coluna por meio de um medidor de pressão (13).

O início da retenção e do refluxo foi determinado em função do comportamento do líquido na coluna, observado através da parede pelo aspecto de respingos no topo, pela forte inclinação da coluna de peso (2) e pela diferença de pressão com o aumento do fluxo de gás.

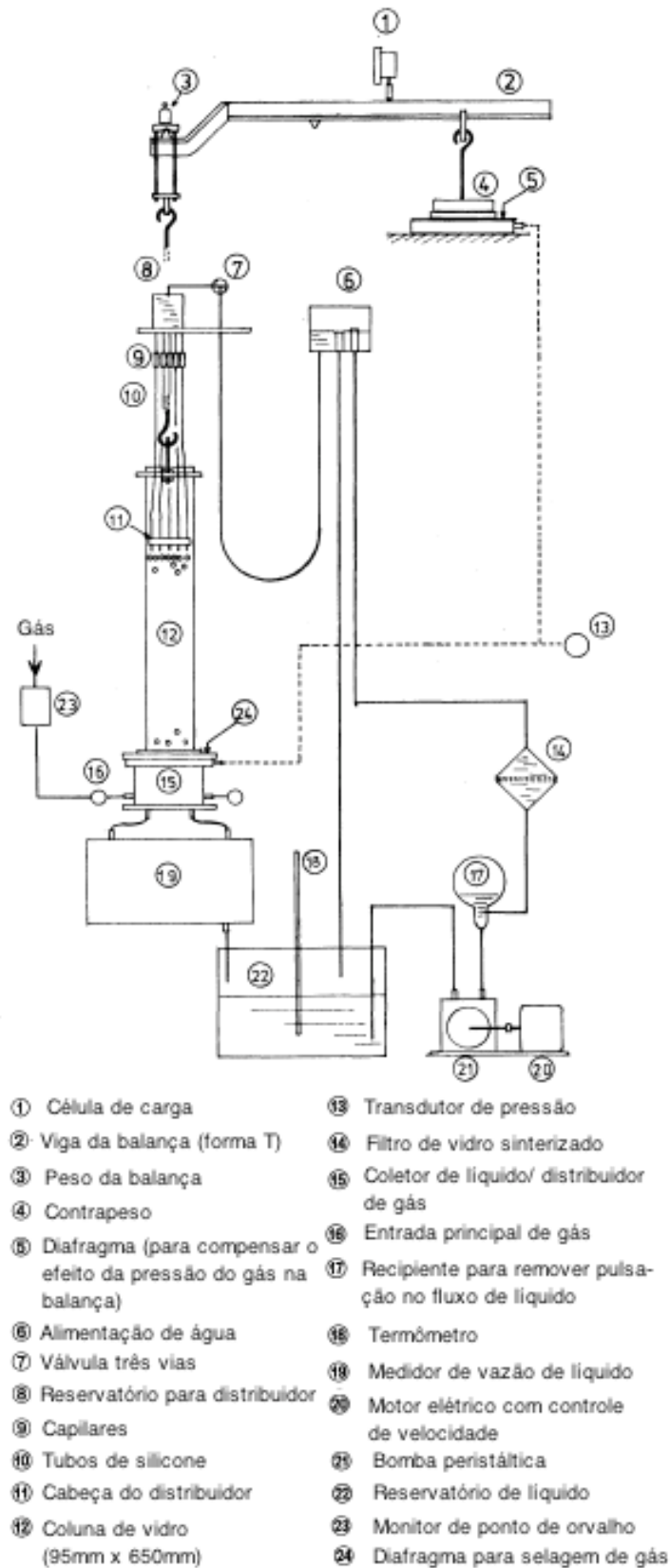


Figura 3.3: Desenho esquemático do equipamento utilizado para o estudo de retenção e refluxo. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982)

As condições dos experimentos foram balizadas utilizando os valores dos números adimensionais (Reynolds, Galileo, Capilaridade, Força Superficial e Perda de Pressão) similares ao do alto-forno, mostrado na tabela III.1.

Tabela III.1 – Comparação dos números adimensionais de processo de alto-forno com os realizados nos experimentos. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982)

| Sistema      | Líquido | Re    | Ga<br>(x10 <sup>4</sup> ) | C <sub>p</sub> | N <sub>c</sub> | Delta P<br>(max) |
|--------------|---------|-------|---------------------------|----------------|----------------|------------------|
| Alto-forno   | Metal   | 2,5   | 23.600                    | 34             | 0,43           | 0,08             |
|              | Escória | 0,017 | 1,0                       | 31             | 0,06-0,74      | 0,2              |
| Experimentos | min     | 0,005 | 0,18                      | 8,6            | 0,59           | –                |
|              | max     | 22    | 3.500                     | 63             | 2,0            | 0,5              |

Em que:

- Re - Número de Reynolds (-)
- Ga - Número de Galileo (-)
- C<sub>p</sub> - Número de Capilaridade (-)
- N<sub>c</sub> - Força Superficial adimensional (-)
- Delta P - queda de pressão (Pa) adimensional (-)

Pode-se ver que os valores dos números adimensionais da escória e do metal de um alto-forno são próximos e geralmente contidos dentro das faixas dos realizados nos experimentos.

### 3.4 Molhabilidade

A molhabilidade é definida como a facilidade de um líquido manter contato superficial com um sólido em um ambiente gasoso. O mais comum é que a molhabilidade de um líquido em um sólido seja avaliada quantitativamente como o ângulo de contato,  $\theta$ , e as forças intermoleculares do gás/líquido/sólido que são as responsáveis por maior ou menor afinidade.

Considera-se que um ângulo  $\theta$  de 180° corresponde à não molhabilidade e o 0° seja completamente molhável, figura 3.4, então pode-se concluir que quanto maior o ângulo menos molhável. Porém, para aplicações práticas 0° é quando o líquido escorre

totalmente na superfície e  $90^\circ$  já pode considerar que o líquido não molha o sólido.

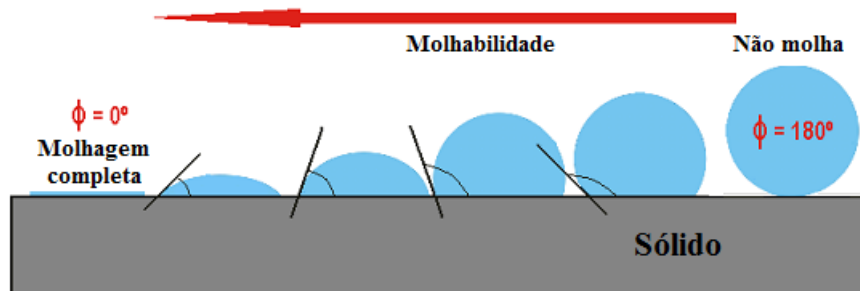


Figura 3.4: Ângulos de contato  $\theta$  e molhabilidade. CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BORRACHA

Essa característica é importante de ser avaliada para o sistema gás/coque/escória e gás/coque/ferro-gusa, pois uma maior molhabilidade dos líquidos significaria maior dificuldade da fluidez dos mesmos, o que poderia facilitar a retenção de líquidos na Zona de Gotejamento.

KANG *et al.* (2005) estudaram a molhabilidade e as reações superficiais do coque/escória para uma certa variedade de situações, e inclusive levaram em consideração o tempo de contato. Uma das situações estudadas é a influência da basicidade da escória de alto-forno na molhabilidade. De acordo com a tabela III.2 e a figura 3.5, fez-se uma variação da basicidade da escória para avaliar a variação do ângulo de contato em função do tempo.

Tabela III.2 - Composição Química das Amostras de Escória a  $1600^\circ\text{C}$  (% em massa). KANG *et al.* (2005)

| Escória<br>Nº | Composição (%) |                  |     |                                |                                | CaO/SiO <sub>2</sub> |
|---------------|----------------|------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|
|               | CaO            | SiO <sub>2</sub> | MgO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                      |
| 1             | 39,0           | 39,4             | 5,6 | 5,9                            | 10,1                           | 1,0                  |
| 2             | 43,8           | 34,6             | 5,6 | 5,9                            | 10,1                           | 1,3                  |
| 3             | 47,8           | 30,6             | 5,6 | 5,9                            | 10,1                           | 1,6                  |

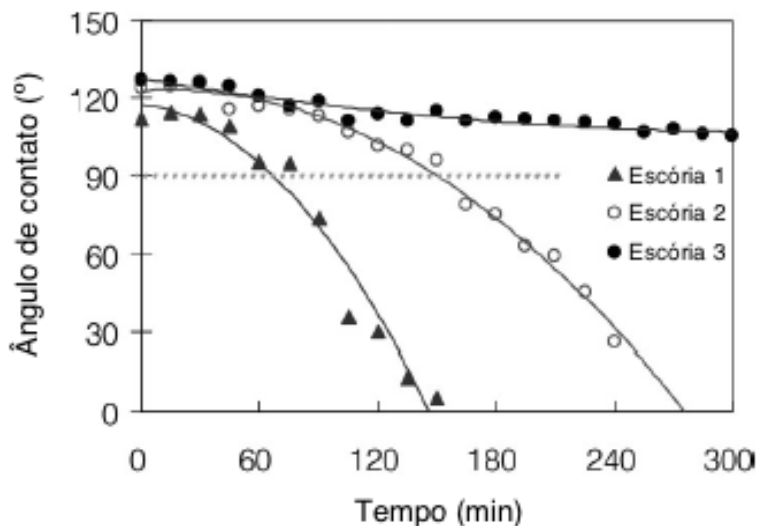


Figura 3.5: Variação do ângulo de contato com o tempo para diferentes tipos de escória. Escórias 1,2 e 3 com Basicidade ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) de 1,0, 1,3 e 1,6, respectivamente. KANG *et al.* (2005)

Menor basicidade da escória faz com que a molhabilidade seja maior para um mesmo tempo.

Outra preocupação do estudo foi avaliar a molhabilidade com o coque nas possíveis condições da Zona de Gotejamento, pois parte do coque é consumido até essa região, o que faz perder massa de carbono e ter um teor de cinzas maior proporcionalmente, sendo que se acredita que o teor de cinzas influencia nas reações superficiais. A tabela III.3 e a figura 3.6 apresentam os resultados dessa avaliação.

Tabela III.3 - Composição Química das Amostras de Coque (% de Carbono e % de Cinza). KANG *et al.* (2005)

| Conteúdo    | Nível de gaseificação do coque |                                       |                                       |                                       |
|-------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|             | Coque A<br>(Coque metalúrgico) | Coque A-20<br>(Perda de massa de 20%) | Coque A-40<br>(Perda de massa de 40%) | Coque A-60<br>(Perda de massa de 60%) |
| Carbono (%) | 88,8                           | 81,2                                  | 75,9                                  | 69,8                                  |
| Cinza (%)   | 11,2                           | 18,8                                  | 24,1                                  | 30,2                                  |

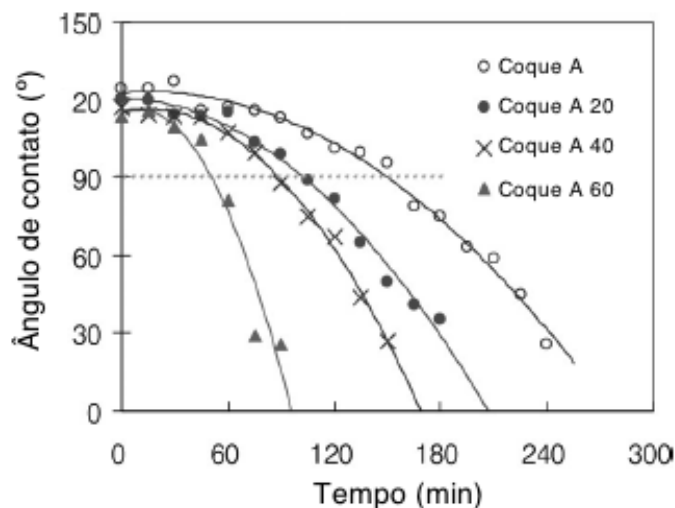


Figura 3.6: Variação do ângulo de contato da Escória 2 com o tempo para diferentes tipos de coque. Coque com as características conforme tabela III.3. KANG *et al.* (2005)

Nota-se que variando o nível de gaseificação do coque e a basicidade da escória, o ângulo de contato só é menor do que  $90^\circ$  para tempos superiores a 60 minutos, e é muito improvável que uma grande parte da escória produzida fique parada em contato com uma superfície de coque por todo esse tempo. Mesmo que haja relação do ângulo de contato com a basicidade da escória, figura 3.7, e com o teor de cinza do coque, figura 3.8, concluiu-se que não há molhabilidade da escória no coque no interior do alto-forno, pois para todos os casos o tempo de contato tem que ser muito grande para isto ocorrer.

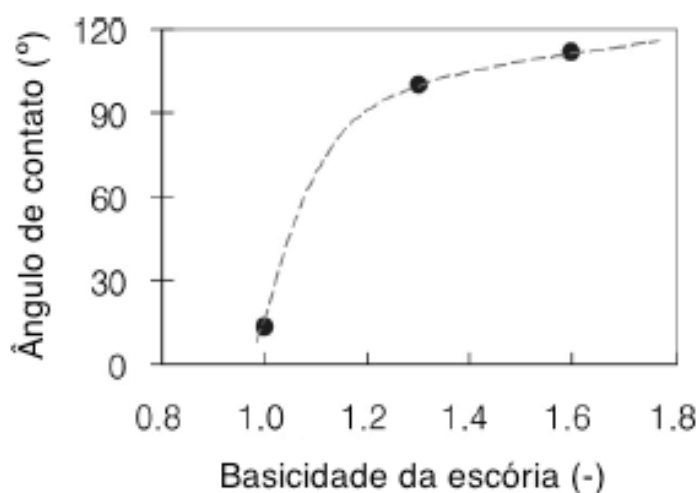


Figura 3.7: Efeito da basicidade da escória no ângulo de contato (Considerando tempo de interação de 135min com o Coque A e as três basicidades). KANG *et al.* (2005)

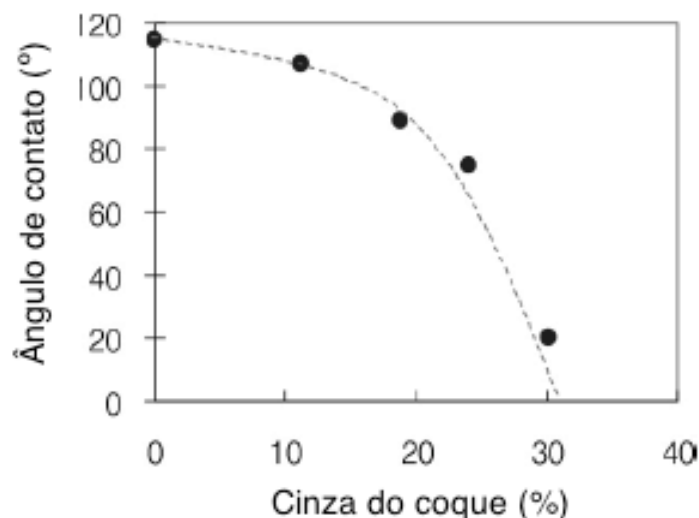


Figura 3.8: Efeito do teor de cinzas do coque no ângulo de contato (Considerando tempo de interação de 105min com o a Escória 2). KANG *et al.* (2005)

As escórias de altos-fornos a coque brasileiros têm basicidade comum entre 1,10 e 1,25. Já a cinza do coque é comum entre 8 a 12%. Ambas as faixas indicam ângulos de contato entre 75 e 120° nas figuras 3.7 e 3.8.

### 3.5 Diagramas de Retenção e Refluxo

Em uma sequência cronológica, primeiro ELLIOTT, BUCHANAN e WAGSTAFF (1952) levantaram a semelhança entre o processo do alto-forno e o fluxo de gás e líquidos em um leito empacotado, inclusive sugeriram que o refluxo e retenção dos líquidos poderia ser um fator crítico para causar uma operação instável até atingir uma situação mais extrema que chegaria a provocar engaiolamentos.

Em um segundo momento, vários pesquisadores começaram a avaliar as condições do processo de alto-forno nos diagramas de “Flooding” propostos por SHERWOOD, SHIPLEY e HOLLOWAY (1938). Foram, então, desenvolvidos estudos para analisar os efeitos das variáveis como molhabilidade, densidade dos líquidos, viscosidade, etc.

O diagrama apresentado na figura 3.9 representa o momento em que ocorre o refluxo de líquido nos experimentos, acima da curva há refluxo e abaixo não. No eixo das ordenadas ficam os fatores do meio em questão, enquanto no eixo das abscissas, os fatores

dos fluidos protagonistas. Na figura 3.9, vê-se graficamente os resultados de vários estudos experimentais, todos eles plotados no diagrama de SHERWOOD, SHIPLEY e HOLLOWAY (1938).

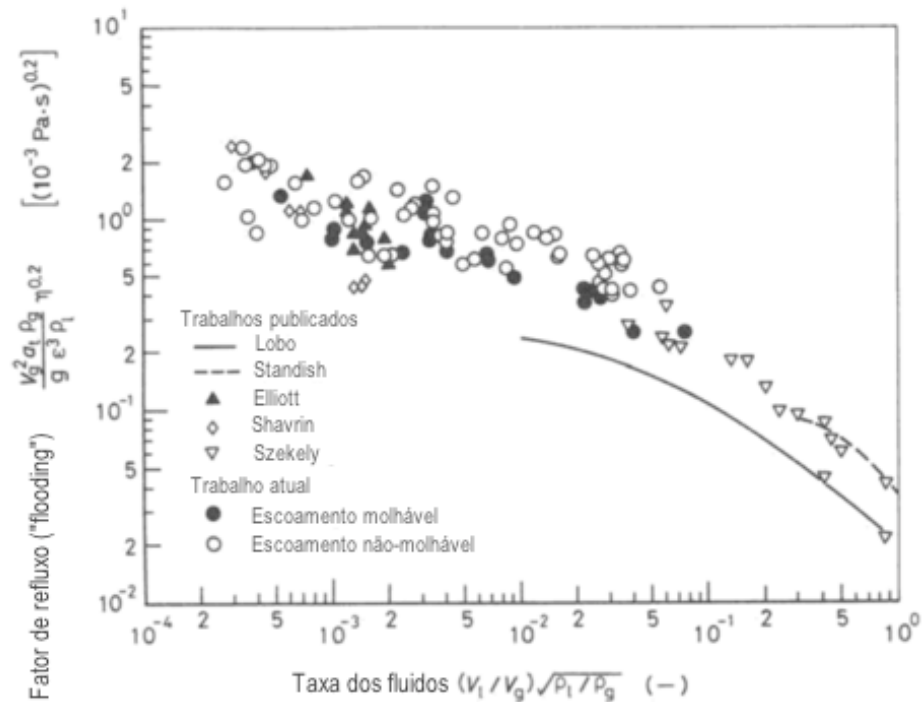


Figura 3.9: Dados de várias pesquisas sobre “Flooding” plotadas no diagrama de SHERWOOD, FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982)

Em que:

- $a_t$  - área de superfície total das partículas por unidade de volume ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ );
- $V_g$  - velocidade superficial do gás baseada em coluna vazia ( $\text{m/s}$ );
- $\rho_g$  - densidade do gás ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $\eta$  - viscosidade do líquido em centipoise ( $10^{-3} \text{ Pa.s}$ );
- $g$  - aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ );
- $\epsilon$  - fração de vazios do leito (-);
- $\rho_l$  - densidade do líquido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $V_l$  - velocidade superficial do líquido baseada em coluna vazia ( $\text{m/s}$ ).

MERSMANN (1954) introduziu o conceito de perda de pressão adimensional, no eixo das ordenadas, e a intensidade de irrigação adimensional, no eixo das abscissas.

Principalmente, pelo fato de levar em consideração a perda de pressão por altura do leito,  $\Delta P/\Delta L$ , foi possível ajustar a curva para valores mais próximos às condições experimentais, conforme se observa na Figura 3.10.

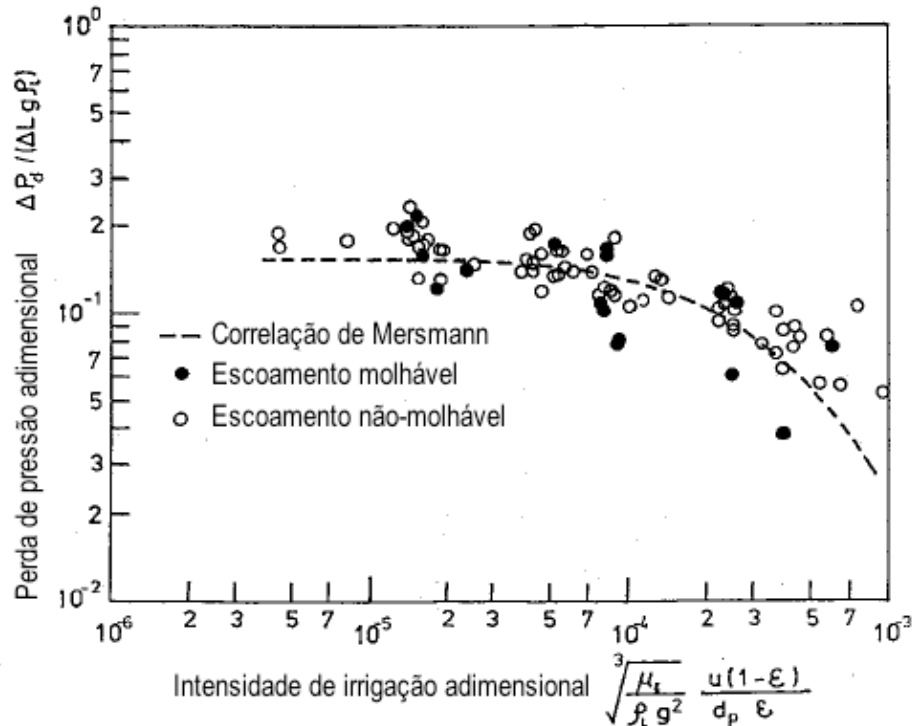


Figura 3.10: Dados plotados no diagrama de “Flooding” de Mersmann. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982).

Em que:

$\Delta P_d$  - queda de pressão através do leito (Pa);

$\Delta L$  - altura do leito em que é medido o  $\Delta P$  (m);

$\mu_f$  - viscosidade do líquido (Pa.s);

$u$  - velocidade superficial do líquido baseada em coluna vazia (m/s).

É possível constatar ainda que há vários pontos plotados que estão razoavelmente distantes da correlação de Mersmann. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982) evoluíram do trabalho de Mersmann ao analisar e considerar que no processo do alto-forno não há molhabilidade da escória e do ferro com o coque, e ao constatar isso, propuseram uma correlação melhor ajustada para os dados experimentais de sistemas não molháveis, conforme Figura 3.11. A diferença é só a consideração do ângulo de contato líquido/sólido.

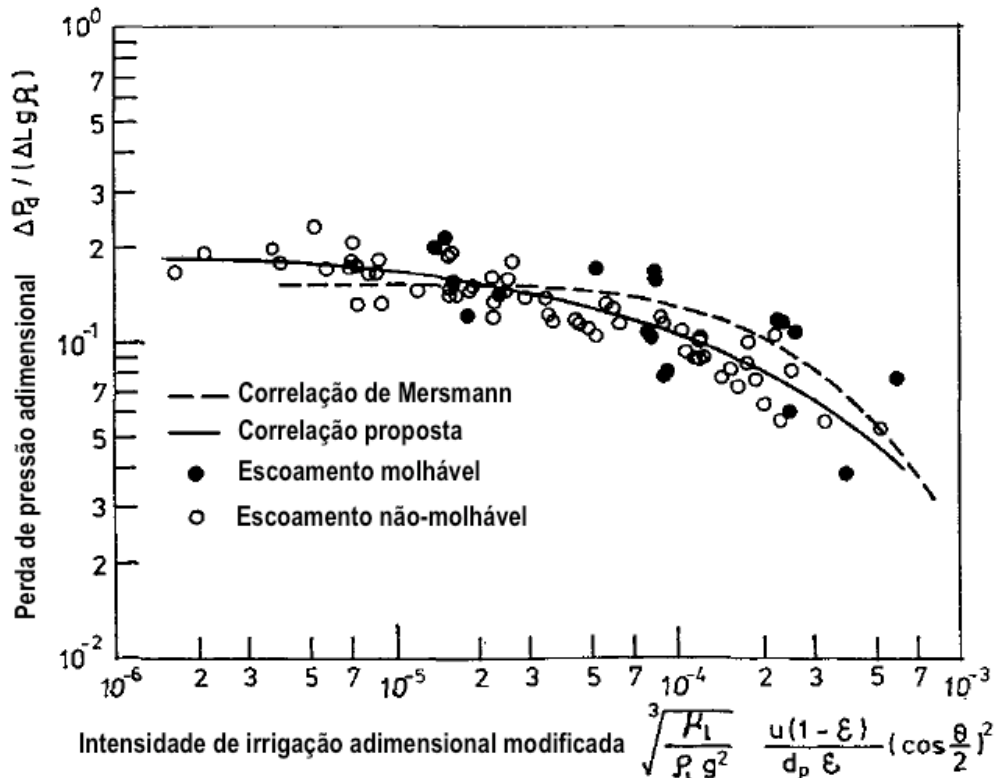


Figura 3.11: Proposta de diagrama de “Flooding” de Fukutake para vários níveis de molhabilidade. FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982)

Em que:

$\theta$  - ângulo de contato do líquido no sólido (-)

Mais recentemente, MATSU-URA e OHNO (1994) fizeram o último ajuste conhecido da equação de intensidade de irrigação adimensional. Visando avaliar a abrangência das equações de FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982), eles aprofundaram nos estudos da relação  $(d_1/\phi d_p)$ , que leva em consideração o diâmetro da gota ( $d_1$ ), a esfericidade do coque ( $\phi$ ) e diâmetro médio das partículas de coque ( $d_p$ ) e encontraram os resultados apresentados na figura 3.12. A partir das análises observaram que as propriedades dos líquidos não estavam bem representadas pelas curvas de FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982), pois ao aumentar a viscosidade do líquido usado no experimento, como exemplo a solução aquosa de  $ZnCl_2$ , os resultados experimentais se distanciavam da curva de FUKUTAKE.

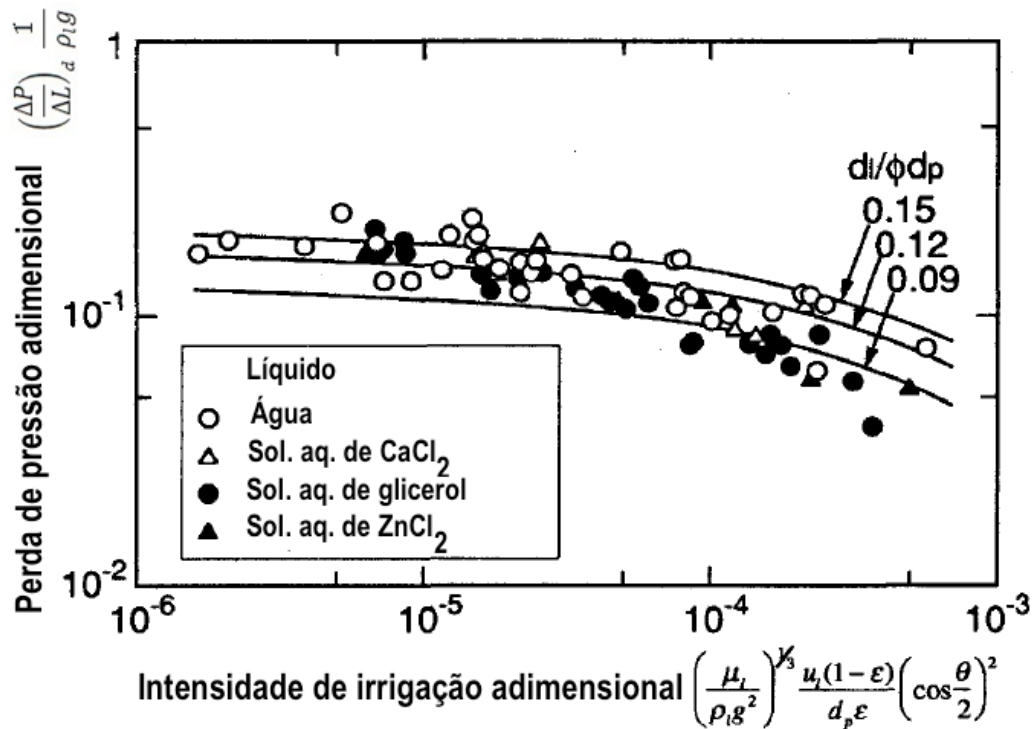


Figura 3.12: Comparação do dados observados por MATSU-URA e OHNO (1994) e os resultados no diagrama de “Flooding” proposto por Fukutake.

Ao recalculer os números adimensionais de Reynolds (Re), Galileo (Ga), Capilaridade (Cp) e da Força Superficial (Nc) com as novas condições de viscosidade do líquido, MATSU-URA e OHNO (1994) encontraram uma nova equação para intensidade de irrigação adimensional, na qual houve mudança no termo do primeiro parênteses aumentando a dependência em relação à viscosidade da escória, conforme indicado na figura 3.13.

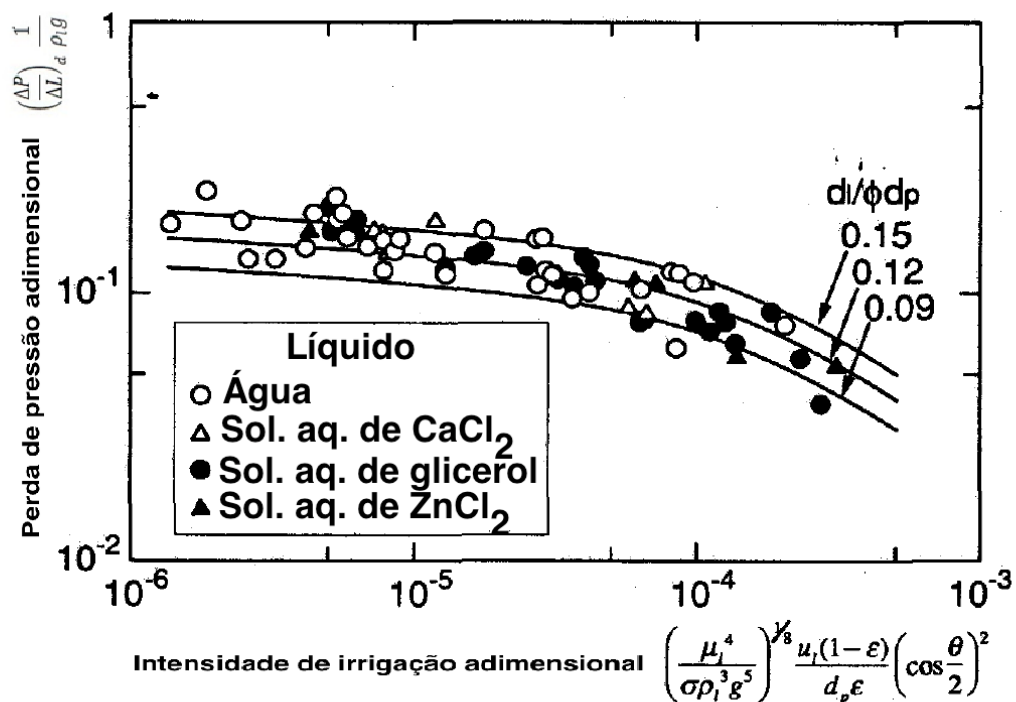


Figura 3.13: Diagrama de “Flooding” proposto por MATSU-URA e OHNO (1994)

Acredita-se que, a partir da evolução das análises e os trabalhos complementares ao longo dos anos, a fórmula mais aproximada existente que retrata as condições do alto-forno é a proposta por MATSU-URA e OHNO (1994).

### 3.6 Limite Real e Limite Teórico de Refluxo

A apresentação do conceito de retenção e refluxo foi feito pela JFE à Gerdau Ouro Branco no momento em se tinha dificuldade de alcançar alta produtividade com elevada produção específica de escória.

Entretanto, desde o início foi considerado que os limites para ocorrência dos fenômenos de retenção e refluxo, FRR, em operação de alto-forno não seriam aqueles que Mersmann, Fukutake e Matsu-ura definiram pelas curvas experimentais. A Figura 3.14 mostra como o fenômeno foi apresentado e a consideração que a ocorrência do mesmo no processo seria da ordem de 75% do limite teórico.

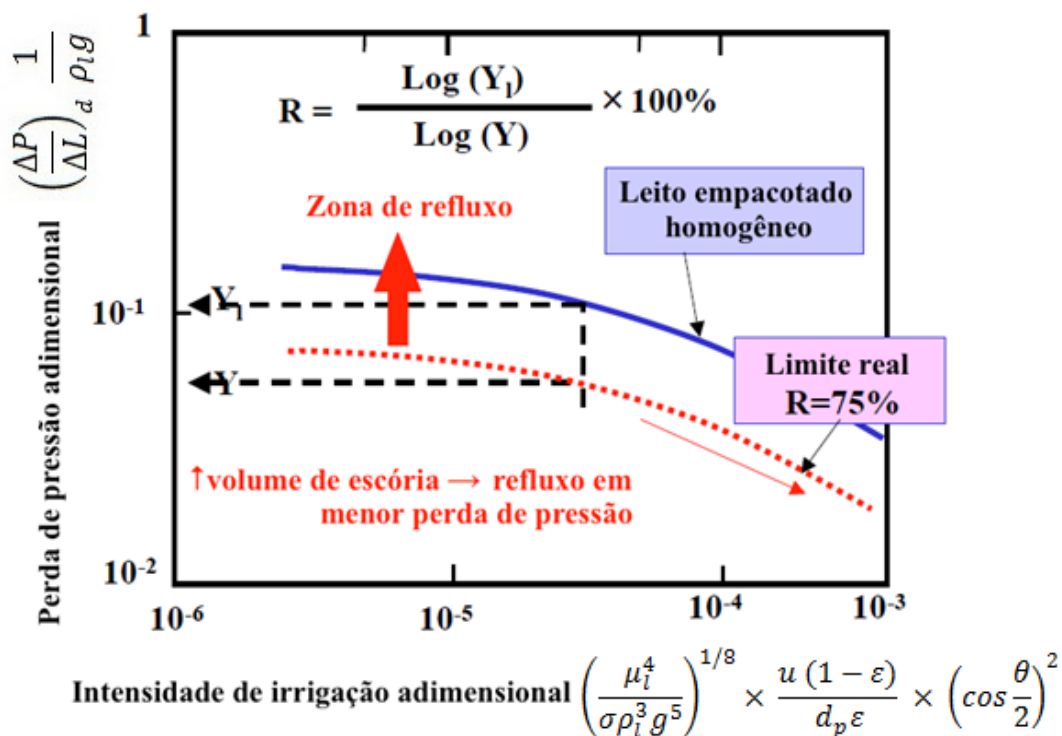


Figura 3.14: Diagrama de “Flooding” apresentado pela JFE à Gerdau Ouro Branco apresentando o conceito e propondo um limite real. JFE STEEL CORPORATION (2015)

Essa diferença de 25% entre o limite teórico e limite real de refluxo se dá pelo fato de que:

- 1) A distribuição granulométrica do coque na Zona de Gotejamento não é homogênea, que há regiões onde há maior presença de finos de coque. Exemplo na Figura 3.15 de NEGRO *et al.* (2001).
- 2) Os experimentos realizados por todos os pesquisadores foram executados em equipamentos de pequena escala. Análises feitas na operação dos altos-fornos no Japão mostraram que as instabilidades operacionais (engaiolamento, chaminés, etc) ocorriam em patamares entre 75 e 80% dos limites teóricos, JFE STEEL CORPORATION (2015).

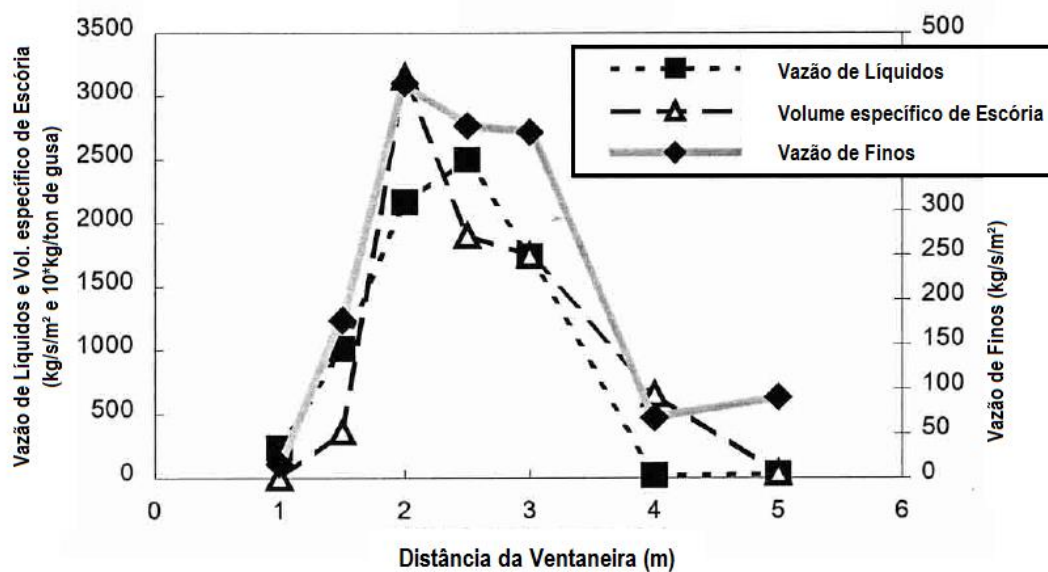


Figura 3.15: Análise de líquidos e finos coletados ao longo do raio do alto-forno.  
 NEGRO *et al.* (2001)

Um dos desafios do presente trabalho é o de confirmar o limite real para os altos-fornos da Gerdau Ouro Branco. Espera-se determinar se de fato ele ocorre entre 75 a 80% do limite teórico apresentado.

#### 4. METODOLOGIA

A execução do trabalho consiste em atribuir valores para as variáveis das equações de ambos os eixos do diagrama de MATSU-URA e OHNO (1994) e avaliar os resultados posicionando cada situação no diagrama.

As atribuições desses valores dependem de analisar, medir, estimar, ou usar uma referência para definir os valores dos parâmetros nas condições operacionais dos altos-fornos da Gerdau Ouro Branco.

A Gerdau Ouro Branco tem dois altos-fornos a coque, sendo que eles têm os dados de projeto descritos na tabela IV.1:

Tabela IV.1 - Dados de projeto dos altos-fornos da Gerdau Ouro Branco

| <b>Dados de Projeto</b>          | <b>Alto-forno #1</b>                  | <b>Alto-forno #2</b> |
|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Fabricante                       | Davy Ashmore                          | CISDI(China)         |
| Início de Operação               | Jul/1986                              | Out/2007             |
| Última Reforma                   | Jul/2009 (4ª)                         | N/A - (1ª)           |
| <b>Produção Diária (nominal)</b> | <b>7.935t/dia</b>                     | <b>4.155t/dia</b>    |
| Volume Interno                   | 3.051m <sup>3</sup>                   | 1.750m <sup>3</sup>  |
| Volume de Trabalho               | 2.652m <sup>3</sup>                   | 1.420m <sup>3</sup>  |
| Diâmetro do Cadinho              | 11,5m                                 | 9,4m                 |
| Número de Ventaneiras            | 28                                    | 24                   |
| Diâmetro das Ventaneiras         | 150mm                                 | 120mm                |
| Sistema de Refrigeração          | “Stave cooler” (Água Desmineralizada) |                      |
| Furo de Gusa                     | 4                                     | 2                    |
| Injeção de Combustível           | Carvão Pulverizado e Gás Natural      |                      |
| Distribuição de Carga            | “Bell-less top” (PW)                  |                      |
| Regeneradores                    | 03-Cowpers                            |                      |

Os estudos foram realizados para os dois altos-fornos e pode ser notada a diferença entre eles, principalmente pela produção nominal, pois o #1 é aproximadamente 1,8 vezes maior que o #2. Logo, essa diferença entre os equipamentos impossibilita a utilização dos

mesmos valores das variáveis críticas e foi feita uma análise diferente para cada um.

Um ponto positivo é que o coque abastecido é o mesmo para os dois altos-fornos, são provenientes de duas plantas de coqueria, são homogeneizados, são enviados e são peneirados em malhas de mesma abertura.

Os itens a seguir demonstrarão como é atribuído valor para cada variável, como os processos dos altos-fornos estão posicionados no diagrama e avaliar os limites e possíveis ajustes operacionais.

#### **4.1 Definição do Histórico a Utilizar**

A Gerdau Ouro Branco tem um vasto banco de dados operacionais de seus altos-fornos e uma etapa para execução do trabalho foi definir quais os períodos a serem utilizados, assim como o intervalo de aquisição dados.

Os períodos foram selecionados de acordo com a relevância quanto às variáveis críticas ou características que influenciam nessas variáveis. Períodos com maior produtividade, ou maior produção específica de escória, ou com operação em altos níveis de diferença de pressão ou escória com alta viscosidade. Para tal é necessário visualizar no espectro de meses e anos quais são esses períodos e depois olhar detalhadamente em períodos mais curtos.

Nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 há exemplos dos principais indicadores de altos-fornos ligados ao FRR para o Alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco nos anos de 2014 e 2015. Foram expurgadas as paradas e perdas de produção por causas especiais.

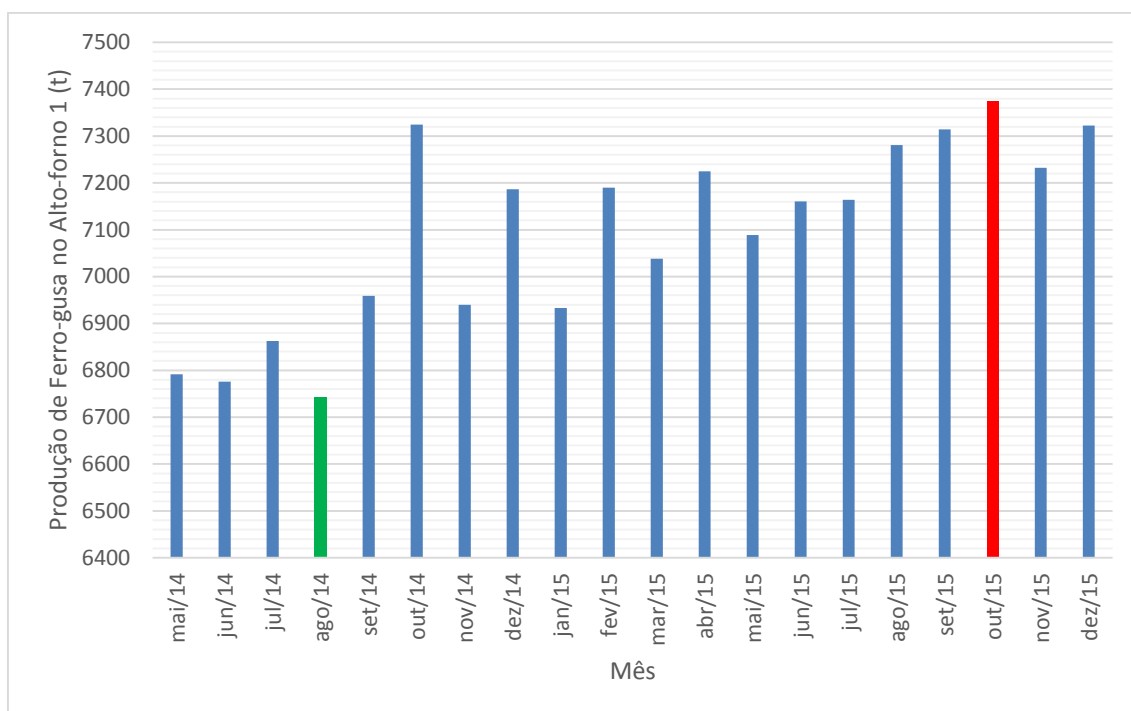


Figura 4.1: Produção em 2014 e 2015 do alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco

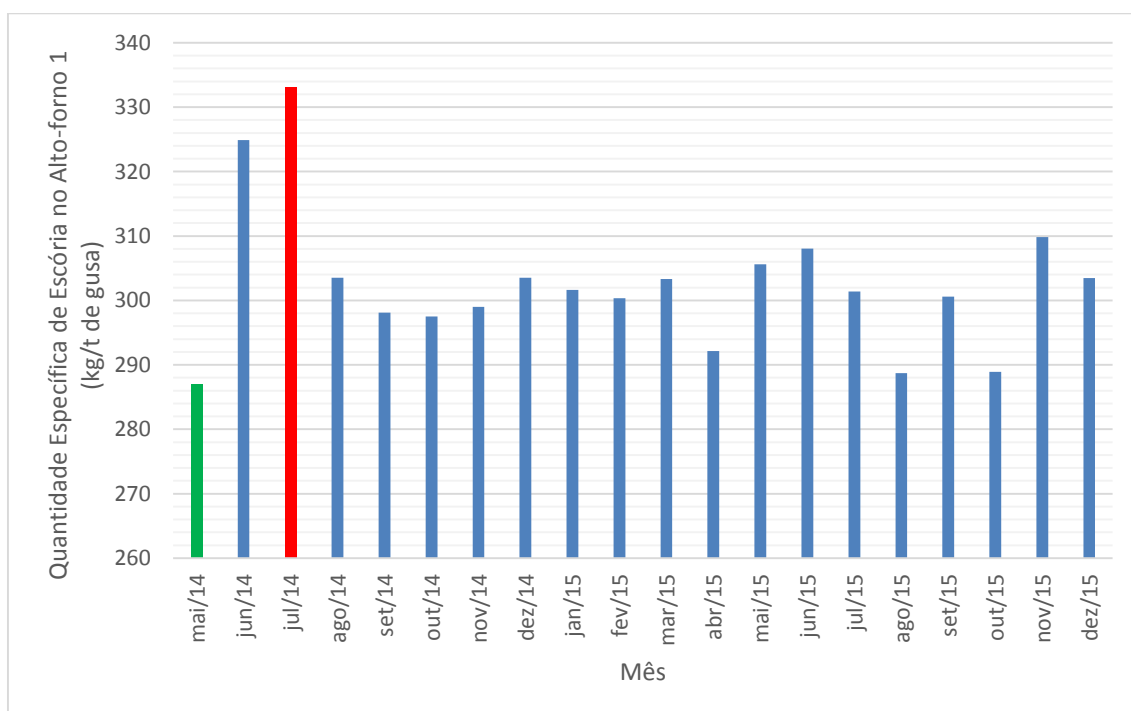


Figura 4.2: Quantidade específica de escória em 2014 e 2015 do alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco

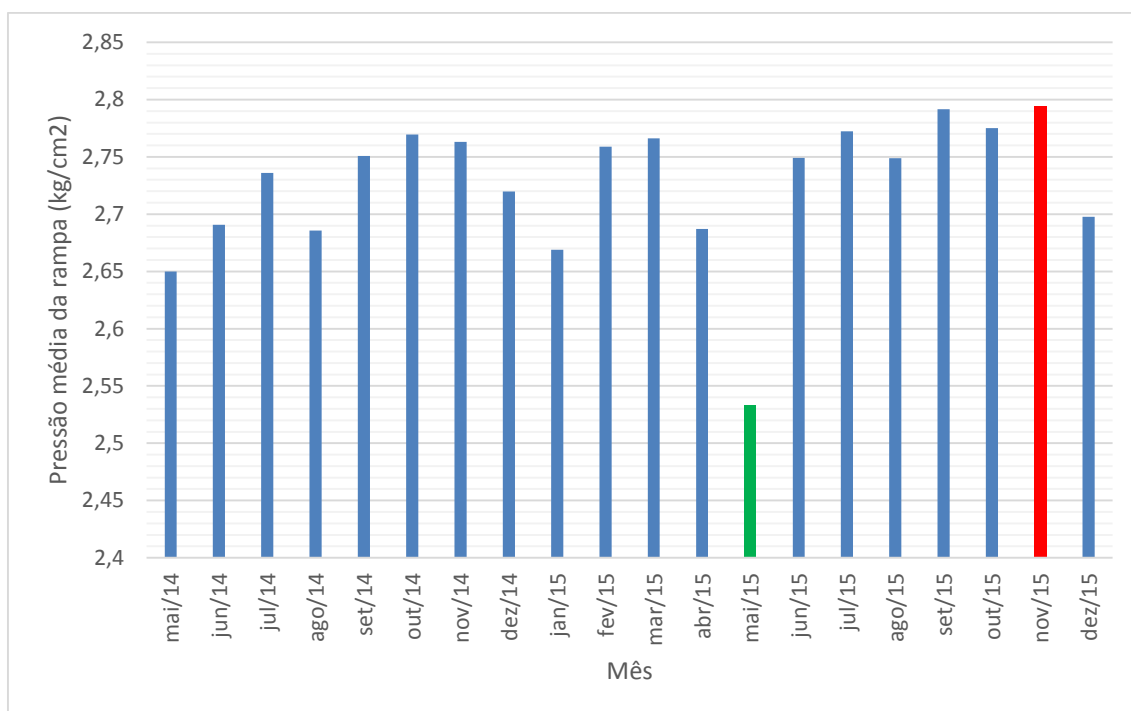


Figura 4.3: Pressão média da rampa do alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco em 2014 e 2015.

A pressão é fator chave para a equação 4.2 e a produção e a quantidade de escória são fatores chave para a equação 4.3. Na figura 4.4 mostra-se o total de líquidos, ferro-gusa mais escória produzidos nos anos de 2014 e 2015.

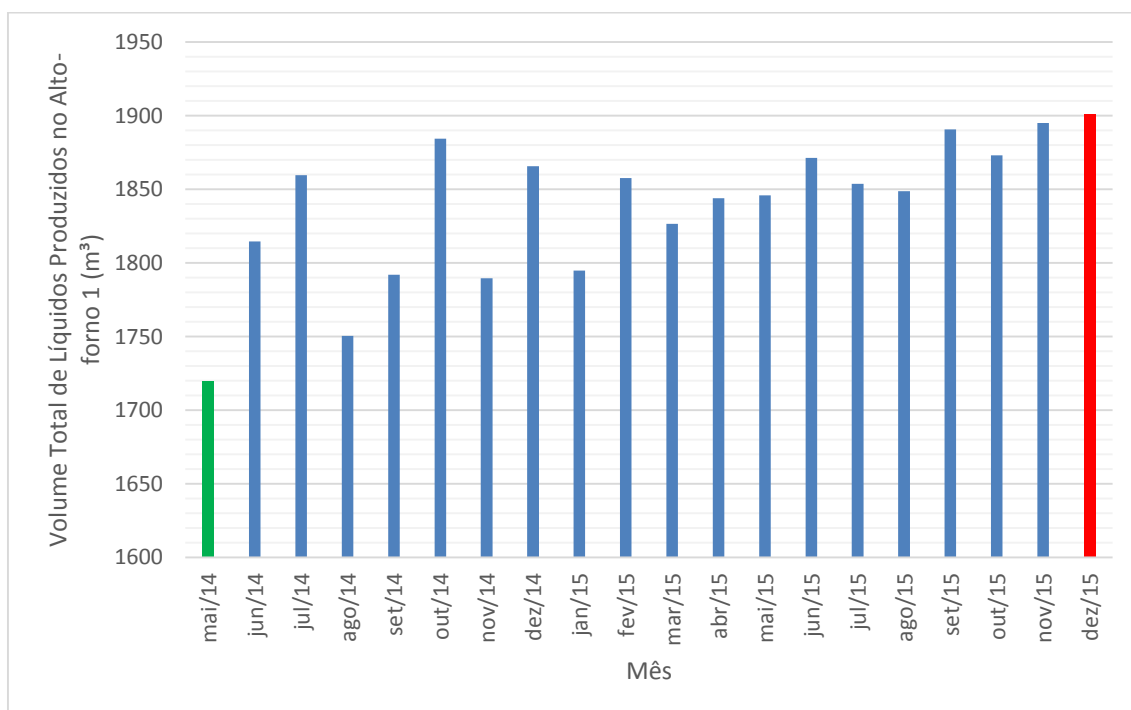


Figura 4.4: Volume médio total de líquidos produzidos no alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco em 2014 e 2015

As frequências de aquisição de dados dessas variáveis são diferentes, conforme visto na Tabela IV.2:

Tabela IV.2 - Aquisição de dados dos altos-fornos da Gerdau Ouro Branco

| Variáveis   | Frequência        | Quando                         |
|---|-------------------|--------------------------------|
| Produção Específica de Escória (kg/t de gusa)                   | 1 vez ao dia      | Fechamento diário de produção  |
| Escória:<br>- Viscosidade (Poise)<br>- Tensão Superficial (N/m) | 1 vez por corrida | Análise da Escória por Corrida |
| Diferença de Pressão (kg/cm <sup>2</sup> )                      | Instantânea       | Medição Online                 |
| Produção Diária (t de gusa)                                     | 1 vez ao dia      | Fechamento diário de produção  |

Como os dados serão confrontados, deve-se avaliar qual é a frequência de dados a utilizar, pois pode ser que um período longo demais ou curto demais não seja representativo. Por exemplo, a variação na produção específica da escória só contabilizada por dia ou turno, enquanto o diferencial de pressão é medido instantaneamente. Avaliar a produção específica de escória instantaneamente pode não ser útil e nem fiel, assim como só avaliar a diferença de pressão no fechamento de um mês pode não mostrar o efeito de uma retenção de líquidos na zona de gotejamento.

Para o alto-forno 1 foram considerados os dados históricos entre 01/01/2005 até 31/12/2015. Durante o primeiro semestre de 2009 houve uma grande parada desse reator para reforma da quarta campanha, e é interessante avaliar as condições operacionais antes e depois desse período.

Para o alto-forno 2, que ainda está operando na sua primeira campanha, foram utilizados os dados do início da operação, em 24/10/2007, até 31/12/2015.

Para ambos os altos-fornos a frequência de análise dos parâmetros foi diária.

## 4.2 Análises e Definição das Variáveis Críticas

São chamadas de variáveis críticas aqui as variáveis que estão diretamente ligadas às equações do diagrama de “Flooding”, que são usadas nas equações 4.1 e 4.2 abaixo:

$$1) \text{ Perda de Pressão Adimensional: } \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_d \left(\frac{1}{g\rho_l}\right) \quad (4.1)$$

Em que:

$\Delta P_d$  - queda de pressão através do leito (Pa);

$\Delta L$  - altura do leito que é medido o  $\Delta P$  (m);

$g$  - aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$\rho_l$  - densidade do líquido ( $kg/m^3$ ).

$$2) \text{ Intensidade de Irrigação Adimensional: } \left(\frac{\mu^4}{\sigma\rho_l^3g^5}\right)^{1/8} \left(\frac{u_{l(1-\varepsilon)}}{d_p\varepsilon}\right) \left(\cos\frac{\theta}{2}\right)^2 \quad (4.2)$$

Em que:

$g$  - aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$\sigma$  - tensão superficial do líquido (N/m);

$\rho_l$  - densidade do líquido ( $kg/m^3$ );

$\mu$  - viscosidade do líquido (Pa.s);

$\varepsilon$  - fração de vazios do leito (-);

$d_p$  - diâmetro da partícula de coque (m);

$u$  - velocidade superficial do líquido baseada em coluna vazia (m/s);

$\theta$  - ângulo de contato do líquido no sólido (-).

Alguns dos parâmetros que aparecem nas equações (4.1) e (4.2), devido à sua maior relevância e complexidade de avaliação, serão analisados com maior detalhe. Por exemplo:

- 1) A determinação do parâmetro  $\frac{\Delta P}{\Delta L}$  com acurácia é difícil, devido ao desconhecimento da espessura da zona de gotejamento e à impossibilidade de medir a diferença de pressão no interior do forno. Normalmente o que se faz

é estimar estes valores a partir de medições feitas na parede do alto-forno. Para ser possível avaliar em escala industrial e real de um alto-forno foram utilizadas as tomadas de pressões que existem no corpo do alto-forno. Os corpos dos altos-fornos são divididos em níveis de B-1 até R-3. Para o Alto-forno 1 as tomadas de pressão estão posicionadas e destacadas conforme a figura 45.b e para o Alto-forno 2 a figura 4.5a. O próximo item abordará a espessura da zona de gotejamento.

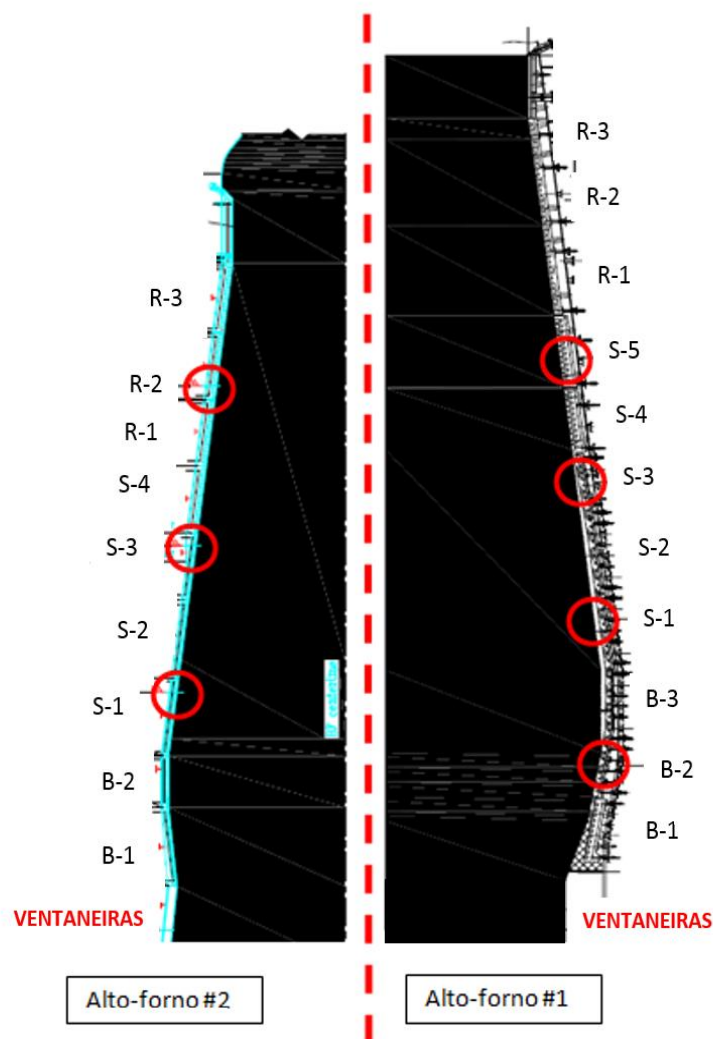


Figura 4.5: a) Corte transversal do alto-forno #2 identificando os pontos de tomada de pressão. b) Corte transversal do alto-forno #1 identificando os pontos de tomada de pressão

- 2) Para a densidade da escória líquida,  $\rho_l$ , foi usado o valor de referência de 2600 kg/m<sup>3</sup>, conforme histórico da Gerdau Ouro Branco. No SLAG ATLAS (1981), a escória com qualidade mais próxima da produzida nos altos-fornos da Gerdau Ouro Branco é a de composição de 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 45% CaO e 40% SiO<sub>2</sub>.

Essa escória tem  $2601 \text{ kg/m}^3$  para temperatura de  $1500^\circ\text{C}$ . Nessa mesma referência, variações de 5% nos óxidos citados tem um impacto de no máximo  $10 \text{ kg/m}^3$ , ou seja, 0,4%.

- 3) A viscosidade da escória líquida,  $\mu$ , foi calculada conforme o modelo de URBAIN (1987), que é muito utilizado para escórias típicas de Aciaria e Alto-forno. Ao contrário da densidade, que a referência utiliza faixas de composição, o modelo de viscosidade permite calcular essa grandeza a partir da composição da escória analisada. Assim, a viscosidade foi calculada a partir da composição diária e não fixada como a densidade.
- 4) O ângulo de contato,  $\theta$ , que representa a molhabilidade, já foi discutido no item 3.1.3. Não havendo molhabilidade, o ângulo mínimo que representa essa situação é de  $90^\circ$ , e esse valor foi o utilizado na análise conforme a referência. Entretanto, foi feita uma avaliação do comportamento dos pontos no diagrama variando o ângulo de contato.

Os parâmetros fração de vazios,  $\varepsilon$ , o diâmetro médio das partículas de coque,  $d_p$ , e a velocidade superficial dos líquidos em leito vazio, serão discutidos com mais detalhes nos itens a seguir.

#### 4.2.1 Espessura da Zona de Gotejamento

A distância vertical do leito empacotado,  $\Delta L$ , que representa a espessura da zona de gotejamento no Alto-forno é difícil de ser estimada.

O limite inferior não é o problema principal, pois como a zona de coque ativo é considerada onde há a coexistência do gás, dos líquidos e do coque, e essa região é delimitada pela altura das ventaneiras. Poderia se considerar essa altura como o limite inferior, mesmo não sendo totalmente correta essa consideração, pois a posição da zona de coque ativo varia de acordo com a posição radial do reator e em alguns momentos quando o furo de gusa está aberto e soprando, há o contato de gases com o coque e os líquidos abaixo do nível das ventaneiras.

Porém, a maior dificuldade está em saber o limite superior da zona de gotejamento, que seria a fronteira com a zona de coesão. A altura da zona de coesão é variável, dependendo da distribuição gasosa e o nível térmico.

Sendo assim, mesmo sabendo que as tomadas de pressão de um alto-forno têm seus locais fixados e que aquela medição poderá abranger um pouco mais ou um pouco menos do que a zona de gotejamento, esse é o instrumento que se tem para avaliação. A figura 4.6 ilustra essa situação para o alto-forno 1, sendo que o mais comum é que a zona de coesão esteja abaixo do nível B2 ou entre os níveis B2 e S1.

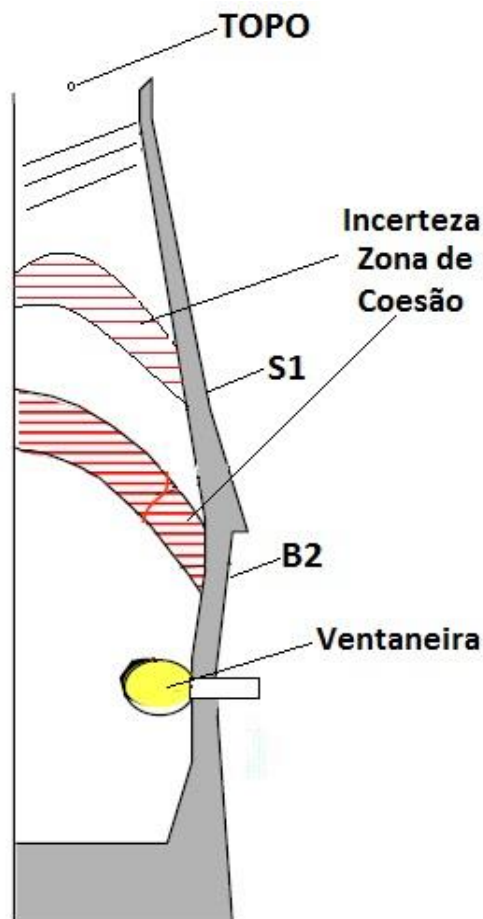


Figura 4.6: Zona de coesão em relação às tomadas de pressão do alto-forno 1.

A altura média da zona de gotejamento é definida a partir dos desenhos dos alto-fornos, considerando a altura do nível das ventaneiras e as tomadas de pressão com maior queda de pressão.

A região com a maior queda de pressão é a Zona de Coesão, pois é o local onde os gases têm a maior dificuldade de permear no reator e é onde logo acima é certo de já estar na Zona Granular, que é um local com boa permeabilidade.

Como a Zona de Coesão pode variar sua altura para certas condições de processo, foram avaliados os diagramas de MATSU-URA e OHNO (1994) para três níveis: o nível B2, o nível S1 e o topo.

#### 4.2.2 Fração de Vazios na Zona de Gotejamento

Fração de vazios,  $\epsilon$ , é uma característica importantíssima para operação do alto-forno, seja na Zona Granular, na Zona de Amolecimento e Fusão, na Zona de Gotejamento ou no Cadinho, e esses vazios são diferentes para cada uma dessas regiões.

A fração de vazios afeta a facilidade do gás e/ou líquido fluir dentro do alto-forno e interfere na troca de calor, nas reações químicas de redução, na estabilidade do processo e nas reações químicas que definem a qualidade do gusa.

Quanto à Zona de Gotejamento, a principal importância da fração de vazios é quanto à coexistência de gases ascendentes e líquidos descendentes, conforme a Figura 3.2. Nessa região, pode se considerar que o único fator que interfere na fração de vazios é a distribuição granulométrica do coque, já que não há mais a presença da carga metálica.

Entretanto, é sabido que a granulometria do coque carregado no topo não é a mesma na Zona de Coque Ativo. Há estimativas e alguns testes já realizados inserindo lança coletora de amostras na região das ventaneiras com o objetivo de avaliar a granulometria na parte inferior do alto-forno.

BANDO *et al.* (2005), ao estudarem as propriedades e escoamento dos líquidos em alto-forno, com diferentes velocidades de gás e fazendo balanços das forças ascendentes e descendentes, utilizaram uma fração de vazios igual a 0,38.

Estudos empíricos da empresa japonesa JFE relacionaram o diâmetro harmônico do coque carregado com o diâmetro harmônico do coque do homem morto; e com a fração de vazios, conforme visto na figura 4.2. A equação vista na figura foi obtida através de ajuste aos dados experimentais. O diâmetro harmônico foi definido no próximo item, 4.2.3.

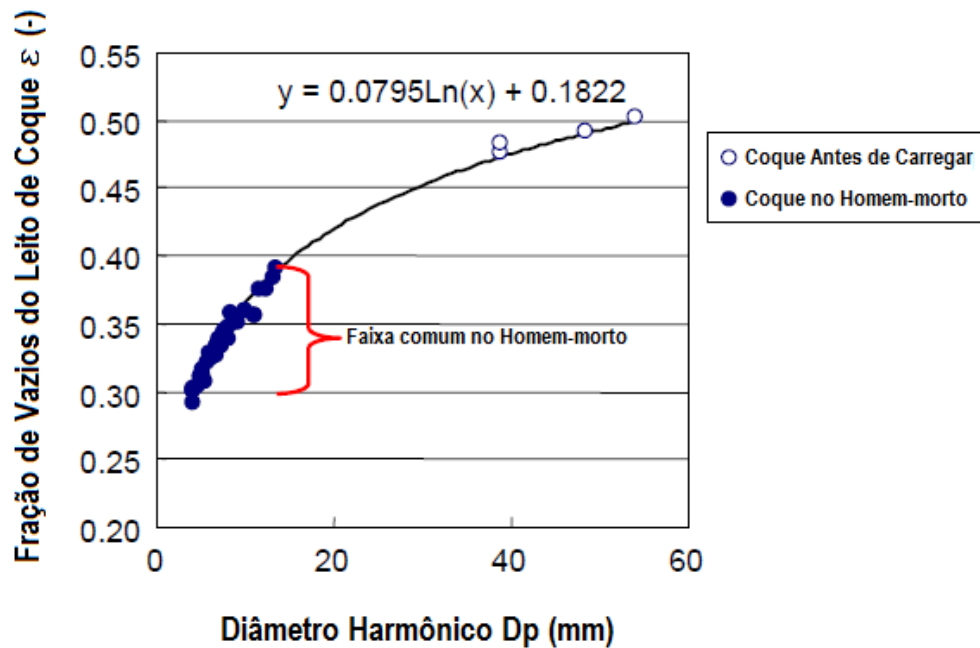


Figura 4.7: Relação da fração de vazios do leito ( $\varepsilon$ ) com o diâmetro médio ( $D_p$ ). JFE STEEL CORPORATION (2015).

YAGI *et al* (1982) e NOGAMI *et al* (2004) utilizam um modelo similar ao da figura 4.2 para realizarem seus estudos em altos-fornos à coque, porém com uma equação um pouco diferente. Esse modelo também já é utilizado pela Gerdau Ouro Branco. A equação 4.3 é a mais comum utilizada.

$$\varepsilon = (0.153 * \log d_p) + 0.724 \quad (4.3)$$

Em que:

- $\varepsilon$  - fração de vazios do leito (-);
- $d_p$  - diâmetro da partícula de coque (m);

Desta forma, para estimar a fração de vazios na região da Zona de Gotejamento é necessário conhecer o diâmetro médio das partículas de coque na mesma, assunto que é tratado no próximo item.

### 4.2.3 Diâmetro Médio das Partículas Sólidas

O modelo utilizado pela Gerdau Ouro Branco para analisar o diâmetro médio das partículas de coque é o tamanho médio, que é definido pela equação 4.4:

$$TM = \sum_{i=1}^{i=n} (\%i) * \frac{(d_i + d_{i+1})}{d_n} \quad (4.4)$$

Em que:

TM - tamanho médio do coque (mm)

n - número de peneiras usadas e onde o material foi;

(% i) - percentagem de material retido na peneira i;

d<sub>i</sub> - diâmetro da abertura da peneira i (mm);

Para os modelos apresentados, tanto os diagramas de FUKUTAKE e RAJAKUMAR (1982) e MATSU-URA e OHNO (1994), quanto para os cálculos de fração de vazios, é utilizado o modelo de diâmetro harmônico para calcular o diâmetro médio do coque. Esse modelo é descrito conforme a equação 4.5:

$$d_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(\%i)/100}{d_i}} \quad (4.5)$$

Em que:

d<sub>p</sub> - diâmetro harmônico do coque (m);

n - número de peneiras usadas e onde o material foi;

(% i) - percentagem de material retido na peneira i;

d<sub>i</sub> - diâmetro harmônico médio do material retido na peneira (m)

O d<sub>i</sub> é calculado pela raiz quadrada do produto da abertura de cada peneira em questão pela abertura da peneira superior (para o caso do passante na menor peneira, use o produto da abertura da peneira superior pela metade dessa abertura).

Portanto, não é possível utilizar o tamanho médio (TM) que é usado na empresa e foi necessário calcular o diâmetro harmônico do coque através da distribuição granulométrica que é passada pelo laboratório.

O coque diminui de tamanho ao longo do seu deslocamento no interior do alto-forno até ser totalmente consumido no cadinho. Ele degrada por esforços físicos, ele perde massa quando o carbono reage com os gases ou é incorporado ao ferro-gusa e as cinzas fundem e se incorporam à escória.

Como o coque carregado no topo é totalmente consumido dentro do alto-forno e não é prática da maioria das usinas coletar amostras do coque nas ventaneiras, fica difícil saber o tamanho do coque na parte inferior do reator e esse tamanho das partículas é importante para estimar às frações de vazio no leito, conforme foi dito anteriormente.

NEGRO *et al.* (2001) realizaram coletas de amostras de coques em dois altos-fornos idênticos na França, atual ArcelorMittal Fos Sur Mer, de volume de trabalho de 2964m<sup>3</sup>. Essas coletas foram feitas através de sonda instalada em uma das ventaneiras e foi possível analisar a perda de tamanho e a dispersão desse tamanho ao longo da posição radial no interior do forno. O ponto principal do trabalho é a perda do tamanho de coque com o CSR (Coke Strength after Reaction); que representa a degradação do coque em ambiente redutor, conforme visto na Figura 4.8.

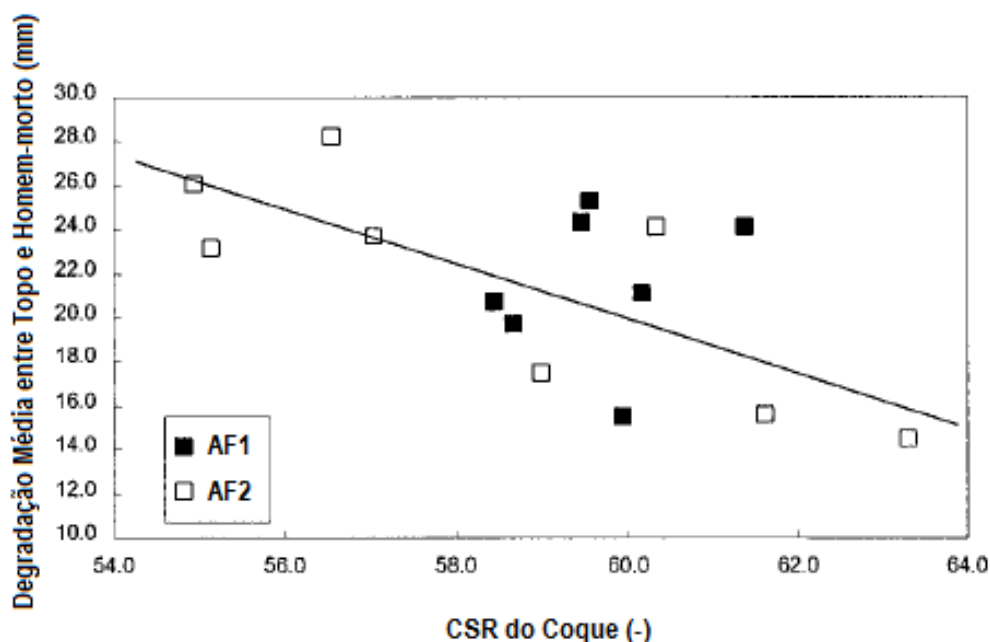


Figura 4.8: – CSR do coque com a degradação média do topo até o homem-morto. NEGRO *et al.* (2001)

Com a curva é possível estimar o tamanho das partículas de coque na região das ventaneiras, conhecendo o tamanho médio carregado e o CSR.

Outro ponto interessante do trabalho é a confirmação da existência de zonas com diferentes permeabilidades, conforme mostrado na figura 4.4. Eles utilizaram elementos traçadores e mediram o tempo para esses atingirem a sonda.

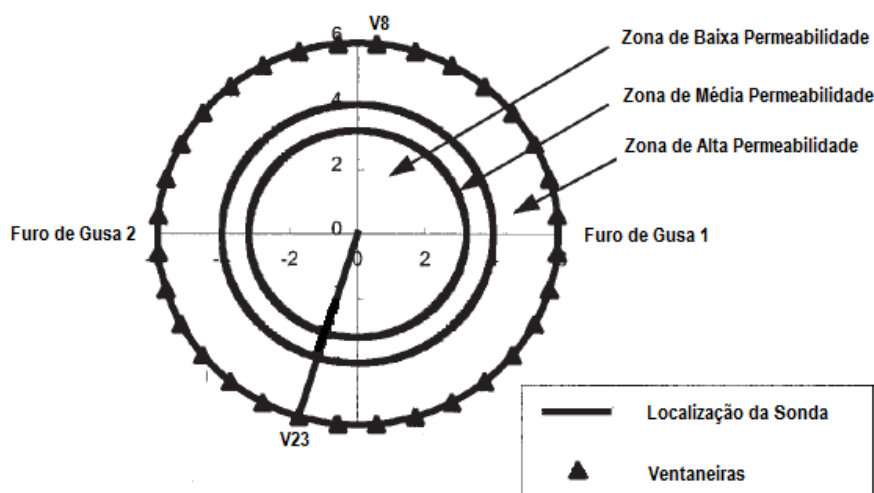


Figura 4.9: Permeabilidade no nível das ventaneiras ao longo do raio. NEGRO *et al.* (2001)

De forma parecida, mas com uma abordagem diferente, a empresa japonesa JFE agregou medições da taxa de degradação do tamanho do coque de diferentes altos-fornos e as relacionou com o tamanho do forno, via volume interno do reator. A partir de tal estudo, foi apresentada uma estimativa da taxa de degradação para o Alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco, conforme Figura 4.10.

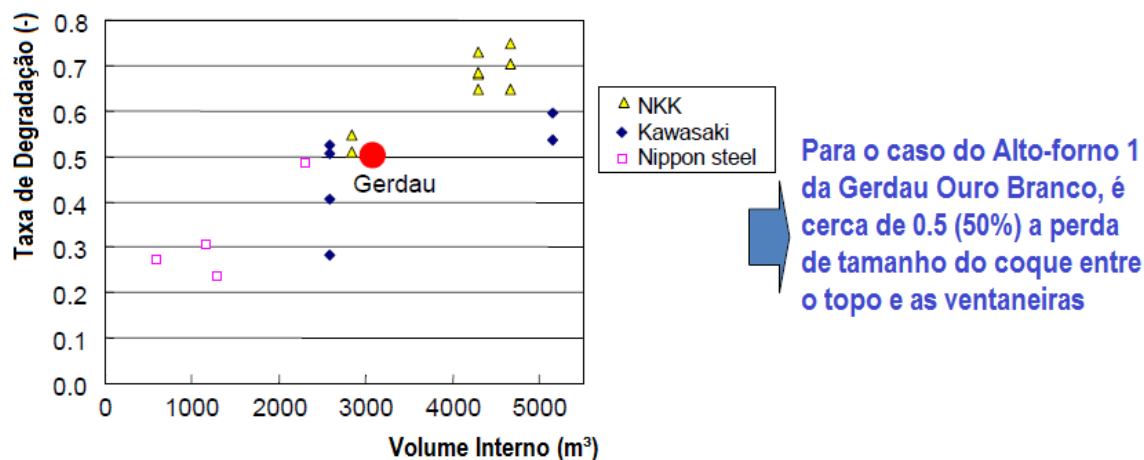


Figura 4.10: Percentual de degradação do coque do topo até a região das ventaneiras de acordo com o volume interno do alto-forno. JFE STEEL CORPORATION (2015).

A taxa de degradação mencionada na figura 4.10 é a perda do diâmetro harmônico do coque entre coque carregado no alto-forno e do diâmetro harmônico do coque nas ventaneiras. Entretanto, para a Gerdau Ouro Branco não é possível até o momento coletar o coque a ser carregado, logo foi utilizado a análise do coque produto, que é coletado na saída da Coqueria. A figura 4.11 mostra a rota do coque demonstrando as possíveis degradações nessa logística. A equação 4.6 descreve o cálculo da taxa de degradação:

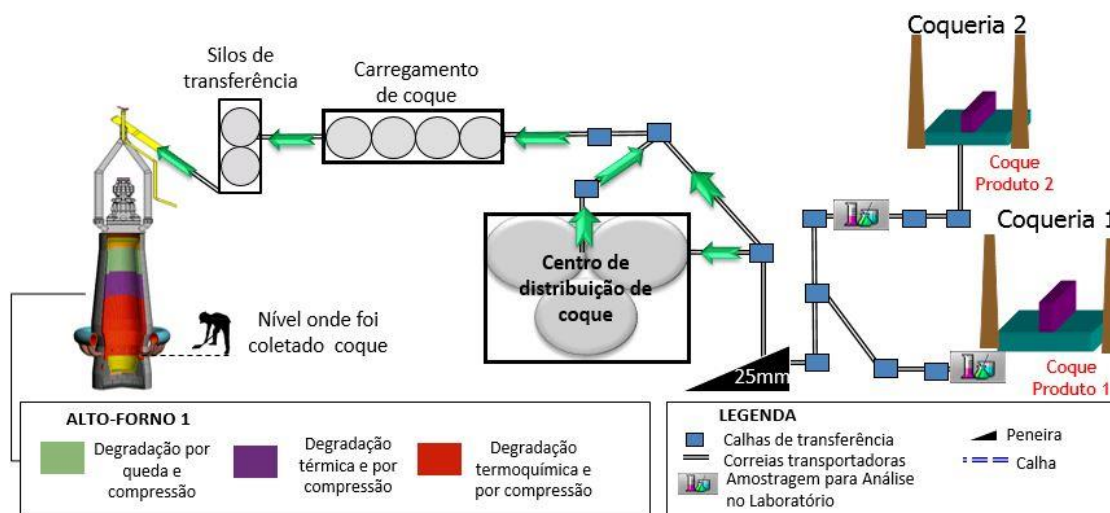


Figura 4.11: Rota de abastecimento do coque da usina da Gerdau Ouro Branco.

$$\text{Taxa de Degradação} = \frac{D_p \text{ coque} - D_p \text{ ventaneiras}}{D_p \text{ coque}} \quad (4.6)$$

Em que:

$D_p \text{ coque}$  - diâmetro médio do coque produto;

$D_p \text{ ventaneira}$  - diâmetro médio do coque no nível das ventaneiras.

A partir dos dados da figura 4.10, foram realizados quatro tipos de regressão para chegar à uma equação que descreva a taxa de degradação pelo porte do alto-forno, nesse caso avaliado pelo volume interno. Espera-se, então, que o coque na região das ventaneiras do AF#2 sofra menor degradação e tenha um diâmetro médio maior, conseqüentemente, uma fração de vazios maior. A tabela IV.3 mostra os resultados das regressões e o respectivo  $R^2$ .

Tabela IV.3: Regressões e cálculos de degradação para diferentes tamanhos de altos-fornos.

| Tipo de Regressão  | R <sup>2</sup> | Taxa de Degradação para AF1 (%) | Taxa de Degradação para AF2 (%) |
|--------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Linear             | 0,7145         | 0,515                           | 0,385                           |
| Exponencial        | 0,7054         | 0,457                           | 0,353                           |
| Polinomial 2º grau | 0,7533         | 0,502                           | 0,367                           |
| Logarítmica        | 0,7024         | 0,535                           | 0,407                           |

A regressão que se mostra mais adequada para altos-fornos até 5500m<sup>3</sup> de volume interno é a polinomial de 2º grau, pelo R<sup>2</sup>, mas também pelo comportamento de queda quando aumenta o volume interno do alto-forno, pois se isso não acontecesse, para um determinado tamanho de alto-forno a degradação seria de 100%. A figura 4.12 apresenta a regressão polinomial de 2º grau.

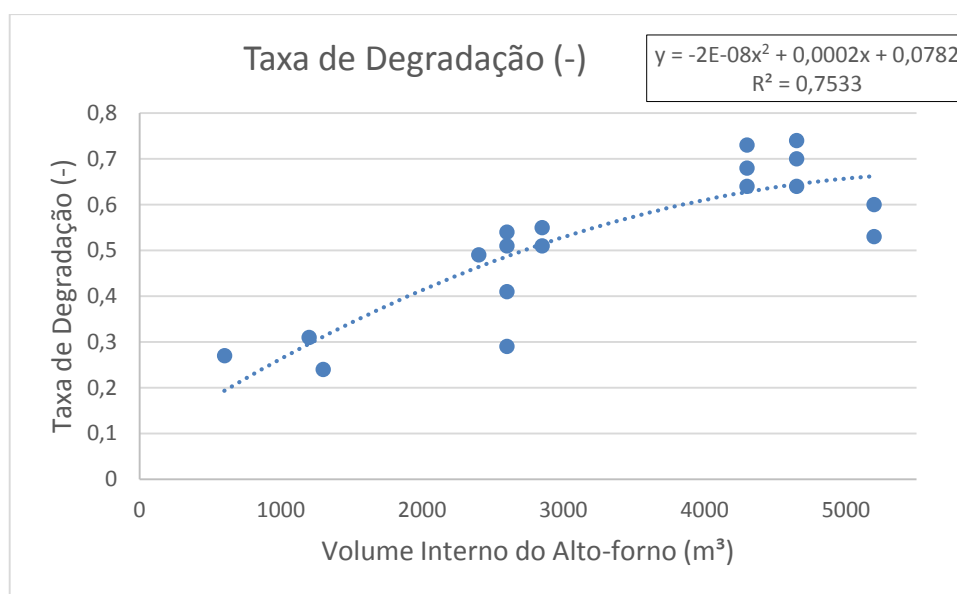


Figura 4.12: Regressão polinomial de 2º grau da degradação do coque para altos-fornos japoneses.

Para ajudar na definição dos critérios, foram coletadas amostras de coque na região das ventaneiras para comparação entre os altos-fornos e para avaliar se o tamanho é coerente com os valores calculados via análise de NEGRO *et al.* (2001) ou pelos dados da JFE STEEL CORPORATION (2015). A degradação do coque para os altos-fornos da Gerdau, caso fosse utilizado o modelo de NEGRO *et al.* (2001), seria muito pequena. Por esse modelo, um CSR do coque igual 76 apresentaria degradação nula.

#### 4.2.4 Velocidade Superficial do Líquido em Leito Vazio

A velocidade com que o líquido escoo no leito vazio é necessária para calcular a intensidade de irrigação adimensional, eixo das abcissas.

FIGUEIRA e TAVARES (1984) estudaram a curva de refluxo de SHERWOOD, SHIPLEY e HOLLOWAY (1938) para dados operacionais de um alto-forno. Eles calcularam a vazão mássica de líquidos em leito vazio a partir da produção instantânea de alto-forno, massa específica de escória e área do cadinho daquele alto-forno.

Ao encontrar a vazão mássica dos líquidos divide-se pela densidade dos líquidos e encontrará a velocidade superficial dos líquidos em leito vazio. Como já foi dito anteriormente, a densidade dos líquidos é a densidade da escória, já que em um FRR o líquido de menor densidade representa a densidade dos dois líquidos que são imiscíveis. Resume-se esse raciocínio com a equação 4.6

$$u = \frac{(prod).(1000+SR)}{(A_{cadinho}) \cdot \rho_l} \quad (4.7)$$

Em que:

|               |  |
|---------------|--|
| u             | - velocidade superficial do líquido em leito vazio (m/s) |
| Prod          | - produção de gusa por segundo (t/s)                     |
| SR            | - massa específica de escória (kg/t de gusa)             |
| $A_{cadinho}$ | - área do cadinho do alto-forno (m <sup>2</sup> )        |
| $\rho_l$      | - densidade da escória (kg/m <sup>3</sup> )              |

#### 4.2.5 Tensão Superficial da Escória

A tensão superficial da escória,  $\sigma$ , tem influência no escoamento da escória na zona de gotejamento de um alto-forno. Essa variável é dependente da qualidade da escória e essa qualidade varia constantemente dentro do reator.

Segundo SLAG ATLAS (1981), a figura 4.13 mostra um sistema de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO e SiO<sub>2</sub>. A escória de alto-forno possui outros óxidos, porém esses são os principais. Considerando um sistema com 15% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 45% de CaO e 40% de SiO<sub>2</sub> e temperatura de referência de 1600°C a tensão superficial da escória é de 500 dyne ou 0,5 N/m.

Já MILLS (2011), usando como referência a temperatura de 1500°C, separou a tensão superficial de cada óxido e observou que é uma aproximação confiável utilizar a participação de cada óxido de uma escória vezes a tensão superficial do óxido puro.

Ambos os modelos, indicam que para a composição média da escória, a tensão superficial da mesma variaria centrada em uma média de 0,5 N/m.

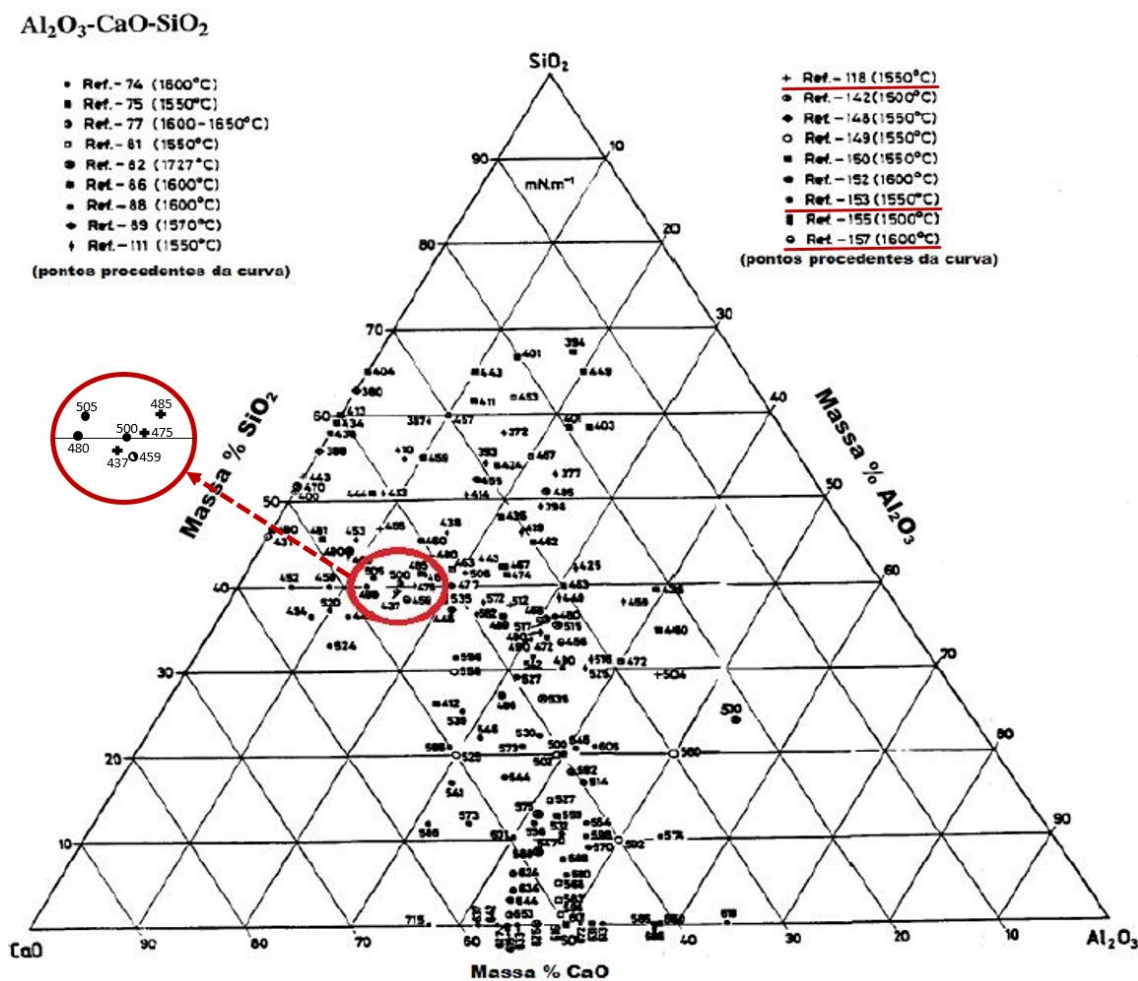


Figura 4.13: Diagrama ternário para estimar tensão superficial de escória de um sistema  $Al_2O_3$ , SiO e CaO. SLAG ATLAS (1981).

#### 4.3 Coleta de Informações Operacionais para Posicionamento no Diagrama

Foi visto no capítulo anterior a evolução das análises da intensidade de irrigação adimensional e que provavelmente o modelo apresentado por MATSU-URA e OHNO (1994) é o que melhor representa o processo de alto-forno, já que é o mais moderno e que veio complementar os modelos anteriores.

A partir da definição das variáveis críticas, foram testados, via dados operacionais, os períodos definidos no item 4.1. Dessa forma, foi possível ver qual foi o impacto característico daquela situação (alta viscosidade, ou alta produtividade, ou baixa qualidade do coque, etc) no diagrama de “Flooding” proposto por MATSU-URA e OHNO (1994).

Foi realizada uma análise de sensibilidade das variáveis críticas, para então verificar o impacto delas na intensidade de irrigação adimensional. A análise de sensibilidade é apresentada no item 5.4.

#### **4.4 Determinação dos Limites de Operação dos Altos-fornos Considerando o Percentual Real de Retenção e Refluxo**

A partir do item 4.3 e do vasto banco de dados, os valores que forem os mínimos e os máximos de todas as condições juntas foram encontrados.

Com as informações anteriores foi possível estimar limites de algumas variáveis, porém com uma avaliação de um fator de segurança, pois para padronizar esse limite, é necessário entender que o alto-forno pode sofrer interferências que não foram avaliadas nesse trabalho. A estabilidade e segurança operacional é um condicionante para o resultado da empresa.

Ao encontrar esses limites, a intenção é deixar claro que para avançar em valores superiores em um dos limites, é necessário ajustar outros parâmetros, caso contrário instabilidades operacionais ocorrerão. Por exemplo, caso os volumes de produção e volumes específicos de escória necessitem ser aumentados, ajustes na viscosidade da escória ou na granulometria do coque serão necessários.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise de Coque das Ventaneiras do Alto-forno 1

Para avaliação da degradação do coque nas rotas e dentro do alto-forno foram coletadas amostras de coque das ventaneiras em paradas programadas do alto-forno 1.

Foram feitas quatro coletas em três paradas programadas diferentes, em agosto e novembro de 2016 e posteriormente em fevereiro de 2017. Em novembro de 2016 foram coletadas duas amostras de ventaneiras diferentes. Cada conjunto de sopro selecionado para fazer a coleta foi completamente desmontado, a ventaneira foi retirada e foi feita a limpeza do seu berço para evitar contaminação. A figura 5.1 mostra o momento logo antes da coleta, durante a limpeza do berço.

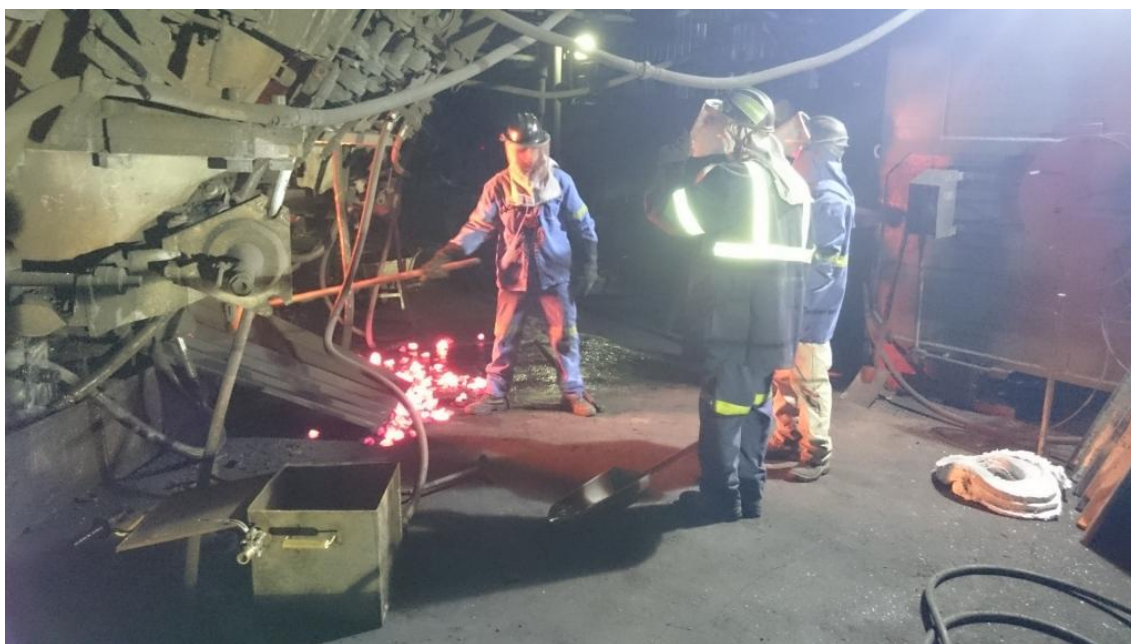


Figura 5.1: Preparação para coleta de coque da ventaneira.

As amostras foram coletadas e acondicionadas na caixa metálica com fluxo de nitrogênio gasoso para refrigeração. A caixa era sempre fechada para evitar contaminação do ambiente e grande contato com o oxigênio do ar, como mostra a figura 5.2. Após resfriadas, as amostras eram repassadas para um saco plástico padrão da empresa e as pequenas contaminações de ferro gusa e escória eram retiradas manualmente. Todas as amostragens foram feitas pela mesma pessoa.



Figura 5.2: Caixa fechada com coque da ventaneira refrigerada com nitrogênio gasoso.

As amostras foram levadas ao laboratório onde foi realizado o peneiramento que resultava na distribuição granulométrica. Os resultados de distribuição granulométrica de cada amostra das ventaneiras estão apresentados na tabela V.1.

Tabela V.1: Análises granulométricas dos coques coletados nas ventaneiras do alto-forno 1

| Abertura da Peneira (mm) | Ventaneira 18 ago/16 (%) | Ventaneira 6 nov/16 (%) | Ventaneira 10 nov/16 (%) | Ventaneira 27 fev/17 (%) |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 100                      | 0                        | 0                       | 0                        | 0                        |
| 75                       | 0                        | 0                       | 0                        | 0                        |
| 63                       | 7,39                     | 8,29                    | 10,86                    | 3,78                     |
| 50                       | 18,98                    | 11,64                   | 16,84                    | 10,76                    |
| 37,5                     | 29,28                    | 15,77                   | 3,13                     | 19,7                     |
| 25                       | 35,8                     | 37,44                   | 44,16                    | 34,67                    |
| 19                       | 4,07                     | 13,6                    | 8,65                     | 12,87                    |
| 13,2                     | 1,95                     | 6,01                    | 2,3                      | 9,13                     |
| 0                        | 2,53                     | 7,26                    | 14,08                    | 9,09                     |

A partir da distribuição da granulométrica de cada amostra foi calculado o diâmetro harmônico,  $D_p$ , pela fórmula mencionada no item 4.2.3 da revisão bibliográfica. Para todos os casos a degradação foi considerada comparando com a análise do coque carregado do dia anterior à parada, já que a amostra de coque produto é coletada em incrementos ao longo do dia e as paradas ocorreram no dia por volta das 6 às 7h da manhã.

Além, da representatividade dos incrementos, estima-se que demora 12h para o coque percorrer a rota de distribuição, ser abastecido no alto-forno e chegar até as ventaneiras.

Na tabela V.2, há o resumo dos cálculos dos diâmetros harmônicos das ventaneiras e do coque e da degradação entre eles. O resultado médio da degradação das amostras ficou em 43,4%.

Tabela V.2: Diâmetros harmônicos do coque carregado, do coque das ventaneiras e as suas respectivas degradações.

| Parâmetro/Amostra       | Ventaneira #18 - ago/16 | Ventaneira #6 - nov/16 | Ventaneira #10 - nov/16 | Ventaneira #27 - fev/17 | Média  |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------|
| Dp do Coque Produto (m) | 0,0541                  | 0,0563                 | 0,0563                  | 0,0503                  | 0,0542 |
| Dp nas Ventaneiras (m)  | 0,0340                  | 0,0366                 | 0,0249                  | 0,0274                  | 0,0307 |
| Degradação (%)          | 37                      | 35                     | 56                      | 46                      | 43     |

Na figura 4.12 foi feita uma regressão polinomial de grau 2 da referência 4.10 e calculada a degradação teórica para um alto-forno de 3050m<sup>3</sup> de volume interno. O resultado foi de 50,2% a partir da equação da figura 4.12. Foram feitos outros tipos de regressões conforme a tabela IV.2, a regressão polinomial apresenta maior R<sup>2</sup> e não apresenta tendência de chegar a 1,0, pois isso é improvável.

Como não é possível analisar o coque na região das ventaneiras diariamente, para os cálculos da Intensidade de Irrigação Adimensional do alto-forno 1 foi considerada uma degradação fixa de 43,4%, logo o diâmetro harmônico do coque na região de ventaneiras, i.e. zona de gotejamento, é 43,4% do diâmetro harmônico do coque produto para todos os cálculos.

Há vários motivos possíveis para o valor real do diâmetro médio do coque das ventaneiras ter sido diferente da regressão polinomial, respectivamente 43,4% e 50,2%. As principais possíveis diferenças são: ponto de coleta do coque produto, método de amostragem, qualidade do coque (ex.: CSR e DI) e outras características do processo como qualidade da carga metálica, velocidade de ar nas ventaneiras, etc.

Para o alto-forno 2 não foi possível coletar coque das ventaneiras. Nos anos de 2016 e 2017 houve o processo de abaixamento de carga nas paradas programadas desse alto-forno e isso descaracterizaria muito o coque dessa situação em relação ao do dia-a-dia. Para o alto-forno 2 a degradação considerada foi de 36,7%, determinada pelo cálculo da regressão polinomial da figura 4.12.

## 5.2 Diagramas de Retenção e Refluxo para os Altos-Fornos

Os diagramas de retenção e refluxo foram plotados utilizando a referência de MATSU-URA e OHNO (1994) com os parâmetros dos altos-fornos da Gerdau Ouro Branco, lembrando que todos os diagramas estão em escala logarítmica de base 10. Para os dois altos-fornos foram considerados valores diários de cada variável, sendo para as variáveis com frequência de mais de 1 vez ao dia foi considerada a média aritmética no dia.

A intensidade de irrigação adimensional foi calculada com as variáveis críticas dentro das faixas expostas na tabela V.3. As faixas mencionadas são valores típicos dessas variáveis entre os anos de 2005 e 2015 para o alto-forno 1 e de 2008 até 2015 para o alto-forno 2, sendo que para o primeiro abrange o final da 3ª campanha e 4ª campanha, e para o segundo a única campanha.

Tabela V.3: Faixas mínimas e máximas das variáveis críticas do histórico dos altos-fornos.

| Variáveis   | Alto-forno 1 |          | Alto-forno 2 |          |
|---|--------------|----------|--------------|----------|
|   | Mínimo       | Máximo   | Mínimo       | Máximo   |
| Intensidade de Irrigação Adimensional (MATSU-URA) | 2,12E-05     | 9,33E-05 | 1,66E-05     | 7,36E-05 |
| Produção (t/dia)                                  | 5,01E+03     | 8,13E+03 | 2,80E+03     | 5,34E+03 |
| Volume Específico de Escória (kg/t)               | 2,35E+02     | 3,76E+02 | 2,29E+02     | 3,95E+02 |
| Viscosidade da Escória URBAIN (Pa.s)              | 1,95E-01     | 6,91E-01 | 2,01E-01     | 1,00E+00 |
| Diâmetro Harmônico do Coque nas Ventaneiras (m)   | 2,10E-02     | 5,80E-02 | 3,67E-02     | 1,03E-01 |
| Diâmetro Harmônico do Coque (m)                   | 3,67E-02     | 1,03E-01 | 2,33E-02     | 6,52E-02 |
| Tensão Superficial (N/m)                          | 4,64E-01     | 5,34E-01 | 3,40E-01     | 5,36E-01 |
| Fração de Vazios do Leito (-)                     | 4,67E-01     | 5,35E-01 | 4,74E-01     | 5,43E-01 |
| Velocidade Superficial do Líquidos (m/s)          | 2,75E-04     | 4,42E-04 | 2,29E-04     | 4,58E-04 |

Do banco de dados foram excluídos somente dois tipos de valores. Primeiro, valores absurdos de qualquer variável, que claramente refletem alguma falha na medição ou registro. Segundo, foram excluídos baixos níveis de produção diária para os dois altos-fornos, já que a análise é para avaliar altas taxas de produção de líquidos. Para ambos os cálculos dos altos-fornos foram excluídas produções menores que 70% da nominal do equipamento.

Na figura 5.3 e 5.4 vê-se os primeiros diagramas plotados para os altos-fornos 1 e 2, respectivamente. Nesses diagramas estão todos os dados entre 2005 e 2015 e é possível notar que a intensidade de irrigação adimensional é um pouco maior para o alto-forno 1, já que para esse caso foi considerada a mesma degradação do coque. Nas próximas análises serão consideradas degradações diferentes para cada reator e as escalas dos gráficos não serão as mesmas do diagrama de MATSU-URA, elas serão ajustadas para maior detalhe dos pontos plotados.

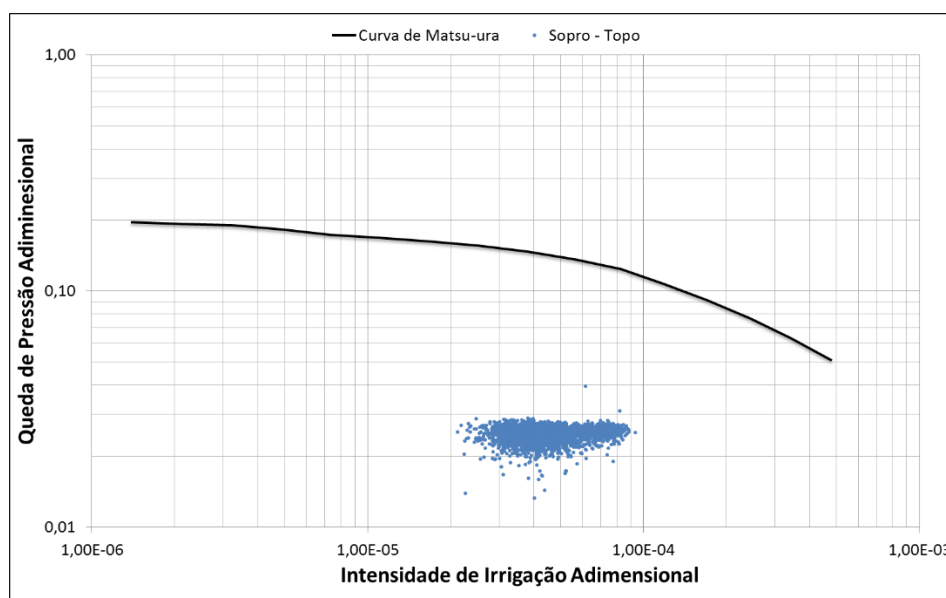


Figura 5.3: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 1.

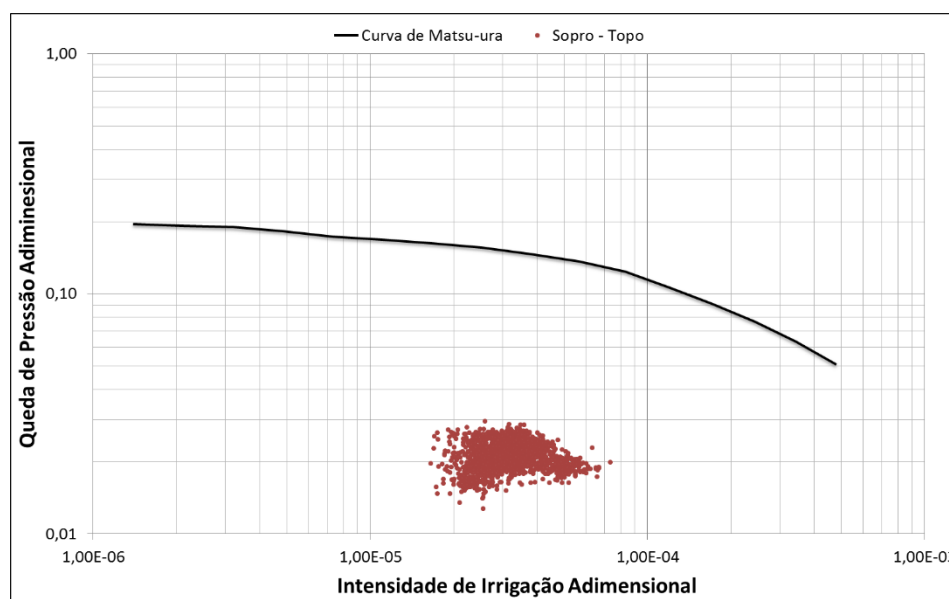


Figura 5.4: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 2.

### 5.2.1 Diagramas para Diferentes Medições de Pressões

Aprofundou-se nas análises para o alto-forno 1 já que a intensidade de irrigação dele é maior do que do alto-forno 2, e é o reator para o qual foi relatado possível problema de retenção e refluxo.

A altura da zona de coesão é uma dúvida comentada anteriormente nesse texto, e por consequência a localização da zona de gotejamento também. Sendo assim, foi avaliada a perda de pressão adimensional para diferentes posições verticais no alto-forno. Em todas elas a maior pressão é a pressão de sopro menos queda de pressão nas ventaneiras e a menor pressão foi avaliada em três tomadas diferentes: o primeiro nível, o segundo nível e a pressão de topo, conforme mostrado na figura 4.6.

Nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7 tem-se os diagramas plotados para as três alturas de tomadas de pressão diferentes.

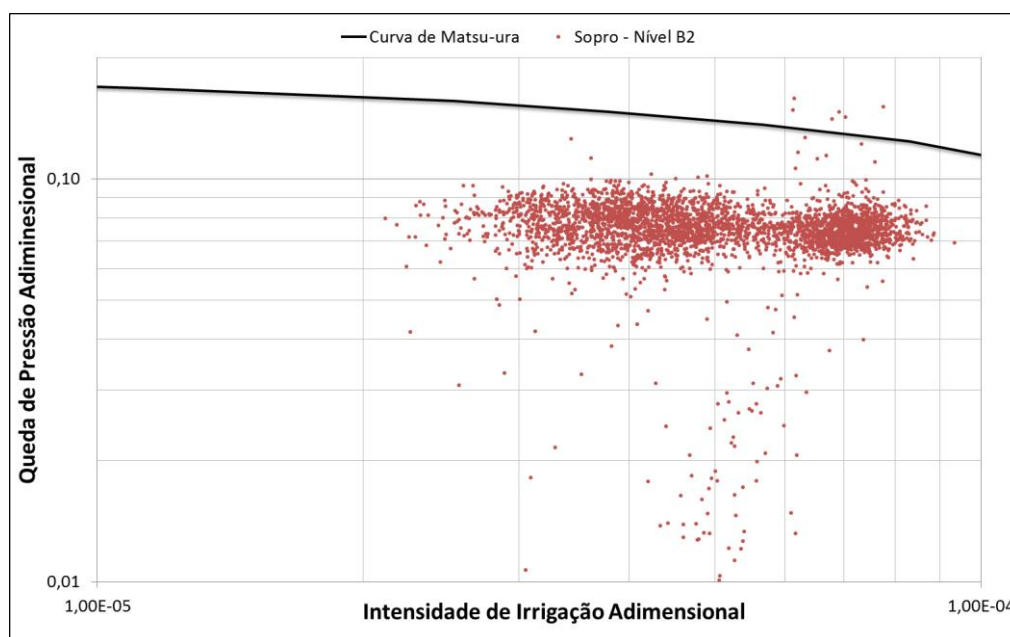


Figura 5.5: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1.

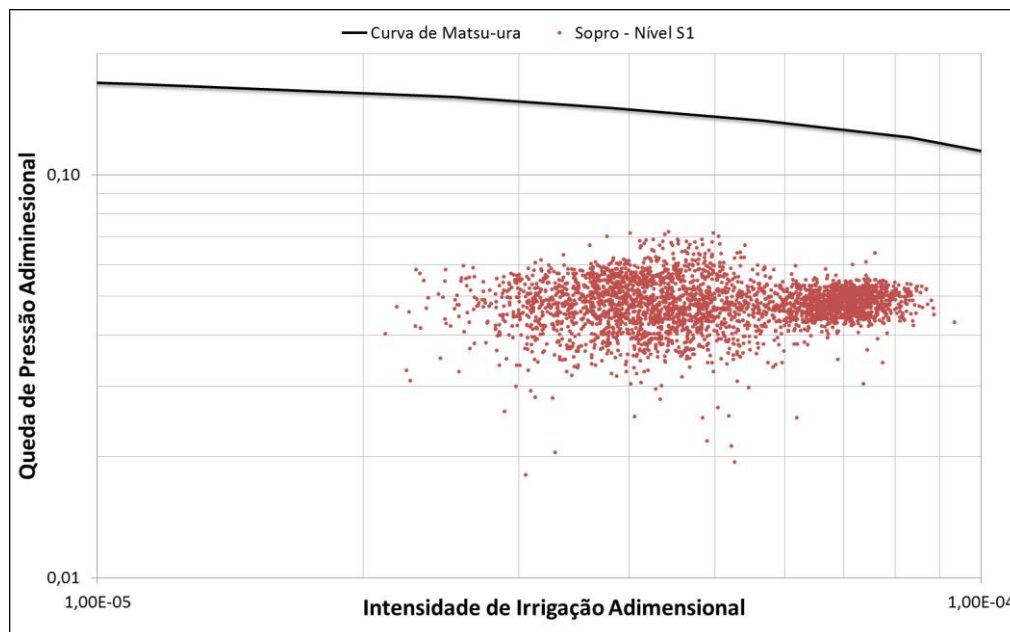


Figura 5.6: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S1 para o alto-forno 1.

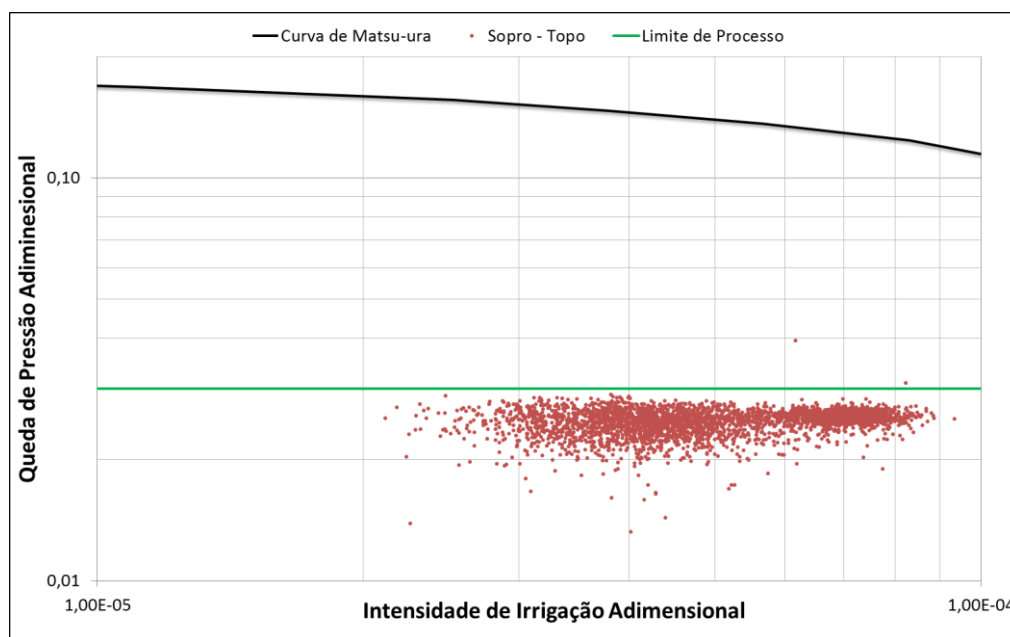


Figura 5.7: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 1.

As seguintes observações podem ser feitas ao comparar os três diagramas:

- 1) A massa de dados é mais próxima da curva limite de MATSU-URA e OHNO (1994) para a figura 5.5, que usa o  $\Delta P$  para a região mais próxima das ventaneiras.

- 2) A massa de dados fica mais concentrada para a figura 5.7, que mostra que ao considerar todo o reator as variações de pressão por unidade de altura diminuem.
- 3) Com exceção de dois pontos, vê-se um limite muito claro na figura 5.7 para perda de pressão adimensional (eixo Y) em um valor próximo de 0,03 (linha verde). Possivelmente isso está ligado ao procedimento operacional de redução de vazão de sopro (conseqüentemente redução de produção de líquidos) quando a diferença de pressão entre sopro e topo extrapola um certo valor.

A partir dos dados operacionais plotados nos diagramas, separou-se em três cores diferentes as instabilidades operacionais. São chamadas de instabilidades operacionais nesse trabalho as ocorrências de engaiolamentos, arriamentos e pressões altas que forcem o operador do alto-forno a reduzir a vazão de sopro. Nas figuras 5.8, 5.9 e 5.10 há a separação entre os dias que não houve nenhuma instabilidade operacional, os dias que houve de uma a cinco instabilidades e os dias com mais de seis instabilidades. É possível observar uma tendência, sem evidência clara, que dias com maior número de instabilidades tendem a estar posicionados quando os valores das Quedas de Pressão Adimensional e Intensidade de Irrigação Adimensional aumentam.

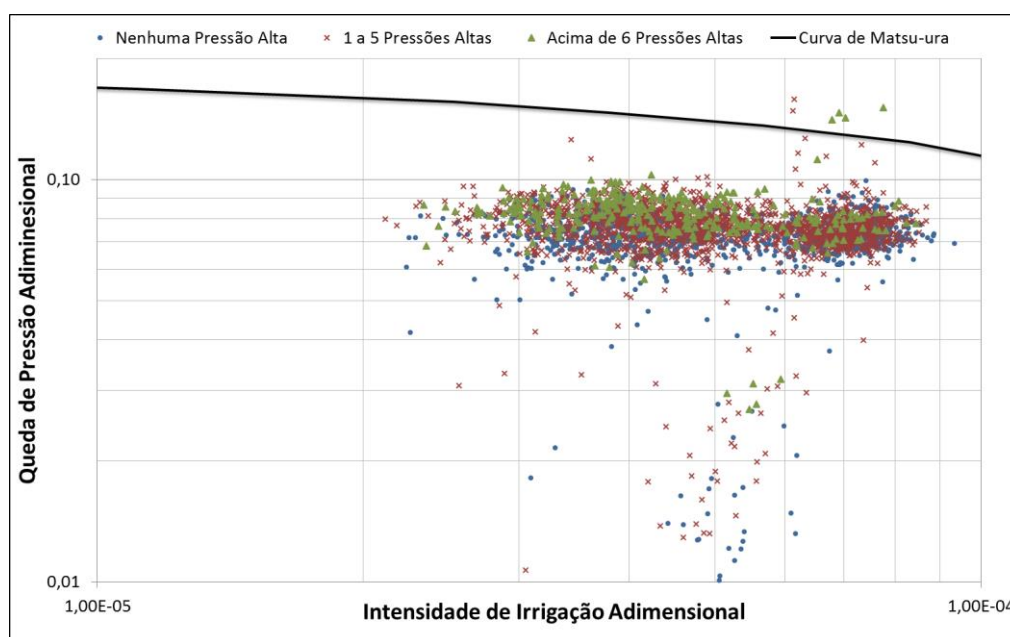


Figura 5.8: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 com frequência de pressões altas.

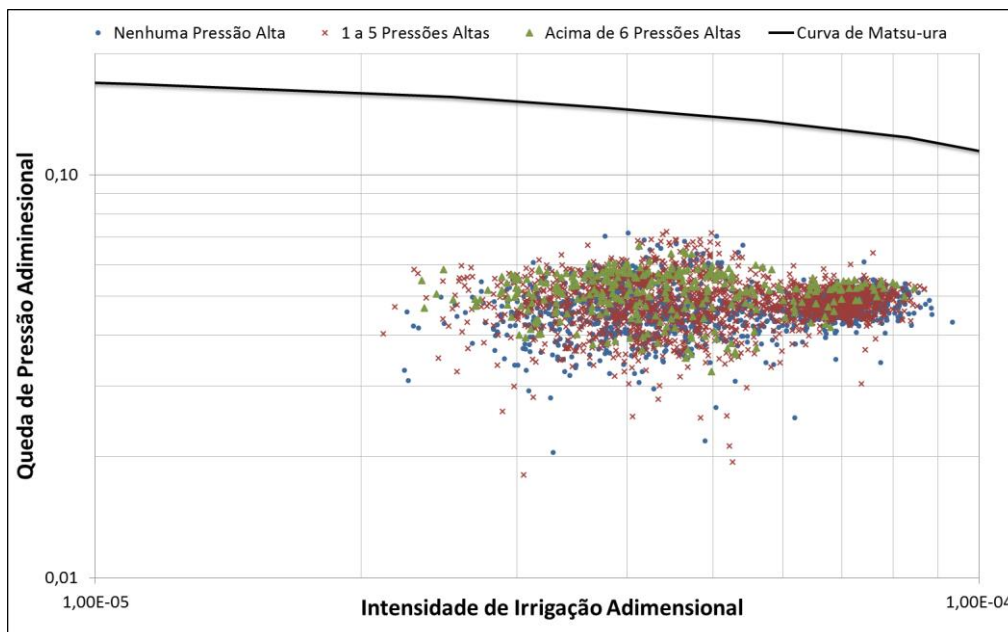


Figura 5.9: Diagrama de Matsu-ura para queda de pressão entre Sopro e Nível S1 para o alto-forno 1 com frequência de pressões altas.

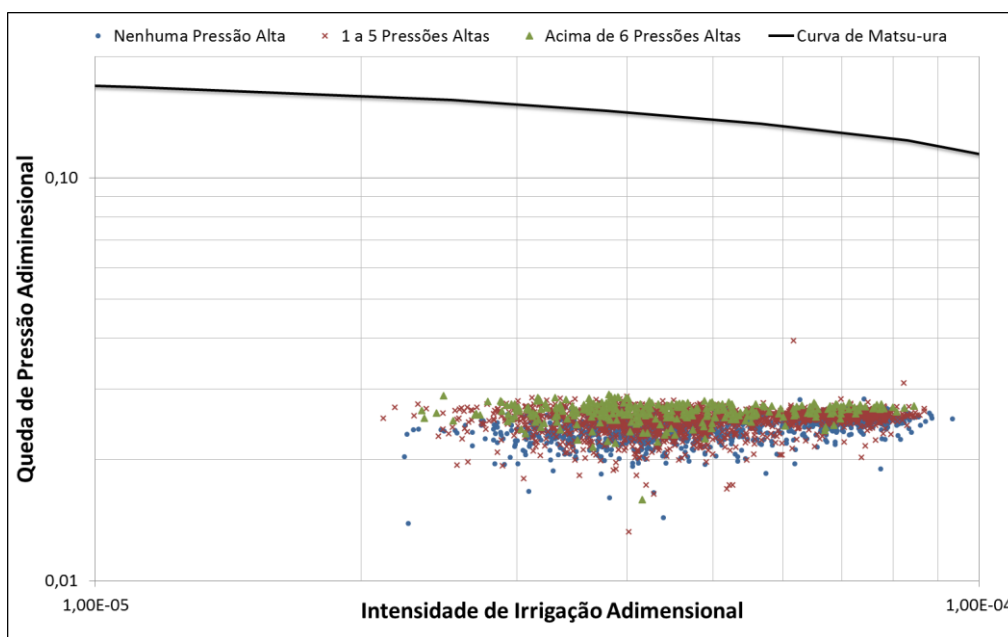


Figura 5.10: Diagrama de Matsu-ura para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 1 com frequência de pressões altas.

Outro conceito introduzido anteriormente é a diferença entre o limite de retenção e refluxo teórico de Matsu-ura e OHNO (1994) e o chamado de limite “real”. O limite real seria a situação em que as instabilidades começariam a acontecer (as linhas vermelhas). Nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13 estão plotados somente os dias em que não houve nenhuma ocorrência de instabilidade operacional, e então a linha vermelha foi

ajustada conforme um percentual dos pontos que definem a curva de MATSU-URA e OHNO (1994) até que essa linha encontre o primeiro ponto sem ocorrência de pressão alta, de cima para baixo. A tabela V.4 resume os limites reais para cada um dos gráficos.

Tabela V.4: Limites reais de retenção e refluxo para queda de pressão do alto-forno 1.

| <b>Delta P limite entre:</b>          | <b>Sopro e Nível B2</b> | <b>Sopro e Nível S1</b> | <b>Sopro e Topo</b> |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| Limite Real de Retenção e Refluxo (%) | 83                      | 59                      | 35                  |

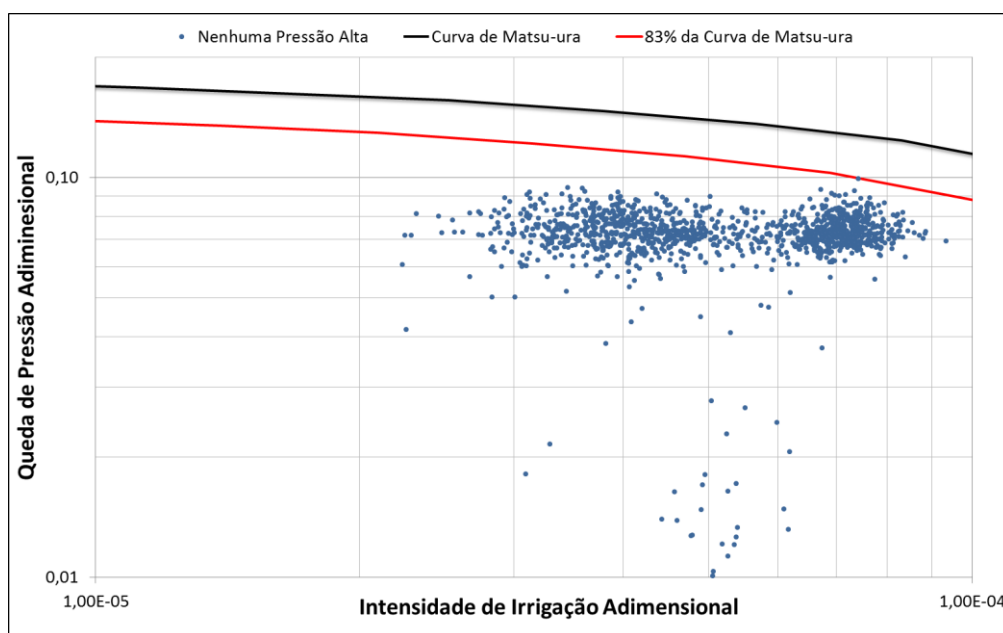


Figura 5.11: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 sem ocorrência de pressão alta.

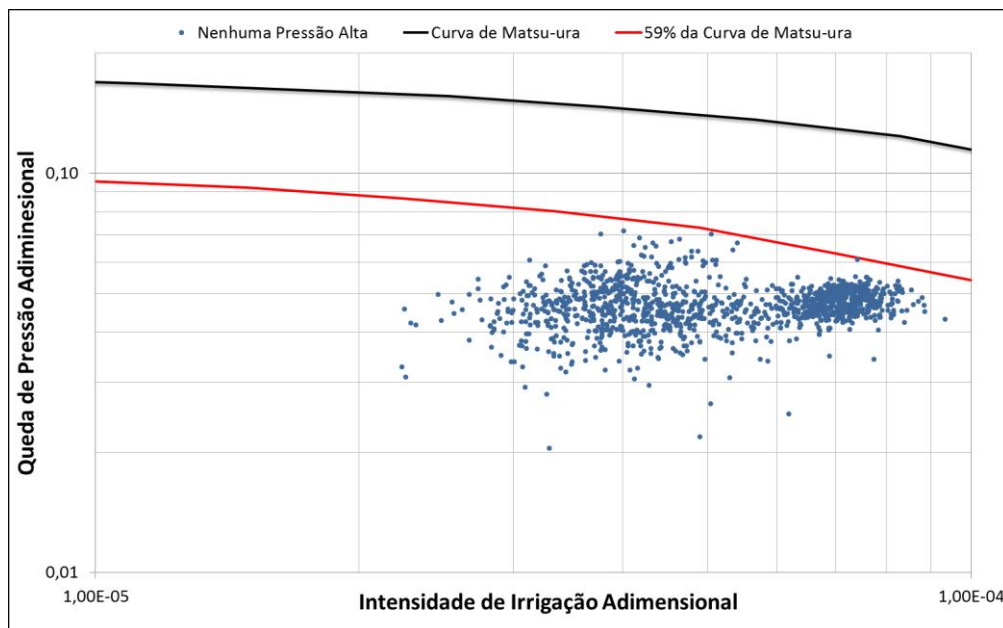


Figura 5.12: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopros e Nível S1 para o alto-forno 1 sem ocorrência de pressão alta.

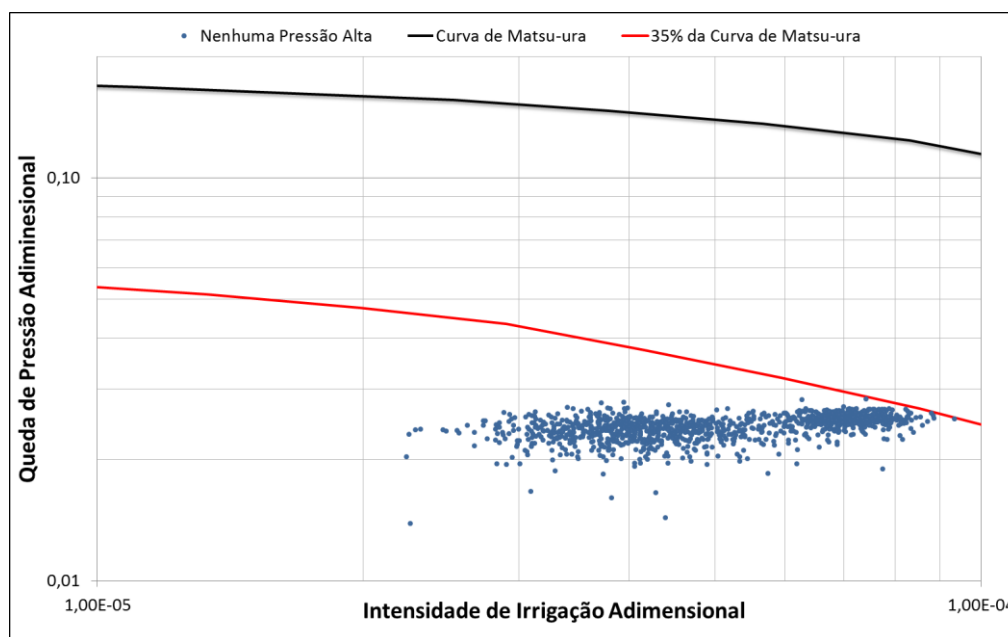


Figura 5.13: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopros e Topo para o alto-forno 1 sem ocorrência de pressão alta.

Nota-se pelos gráficos e pela tabela que quanto maior é a distância das tomadas de pressão,  $\Delta L$  dos níveis B2, S1 e Topo, menor é o limite real de retenção e refluxo. Outro ponto de destaque é que para diagrama Sopros e Topo, o limite real está relacionado aos valores extremos da Intensidade de Irrigação Adimensional.

## 5.2.2 Diagramas Comparando Antes e Depois do Ano de 2008

O alto-forno 1 teve grandes mudanças no seu processo e matérias-primas entre dois períodos, antes do final do ano 2008 e após. Ocorreu o início de operação do alto-forno 2 no final de 2007, reforma do cadinho do alto-forno 1 no primeiro semestre do ano de 2009, início da utilização de minério próprio em 2007 e início de operação da coqueria 2 em 2008. A figura 5.14 mostra a intensidade de irrigação adimensional entre 2005 e 2015 para o alto-forno 1.

Já o alto-forno 2 entrou em operação em 24 de outubro de 2007, portanto a maioria dos dados já são do período após 2008.

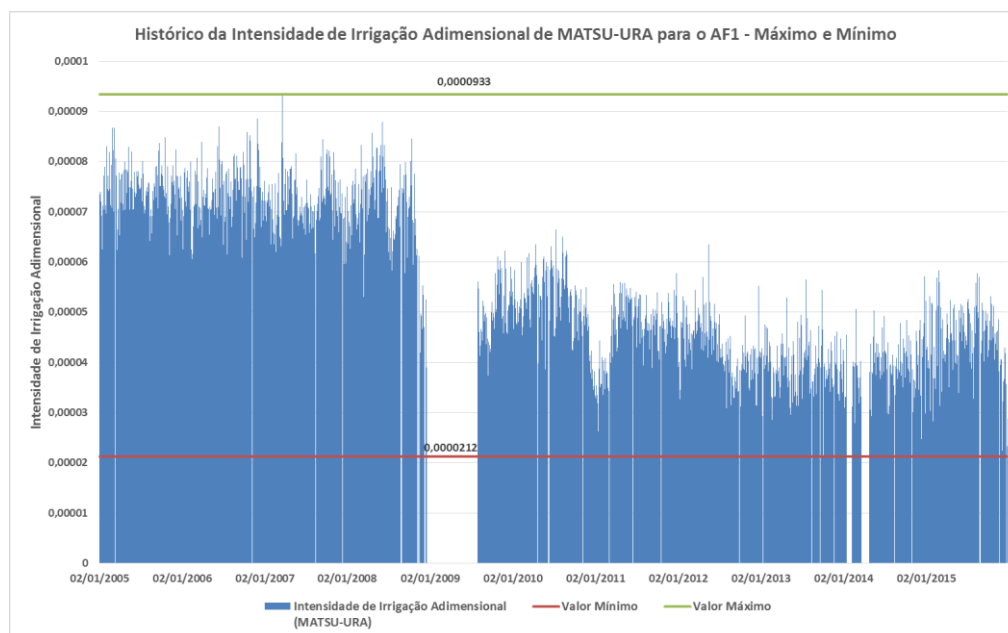


Figura 5.14: Histórico da intensidade de irrigação adimensional de MATSU-URA para o alto-forno 1.

Desses fatos, o início da operação da coqueria 2 impactou fortemente nos resultados da intensidade de irrigação. A partir da entrada de uma segunda coqueria passou-se a ter uma sobre produção de coque, que levou a uma redução de produção das coquerias e isso fez com que o coque aumentasse seu tamanho. A figura 5.15 mostra a evolução do diâmetro harmônico do coque para o alto-forno 1.

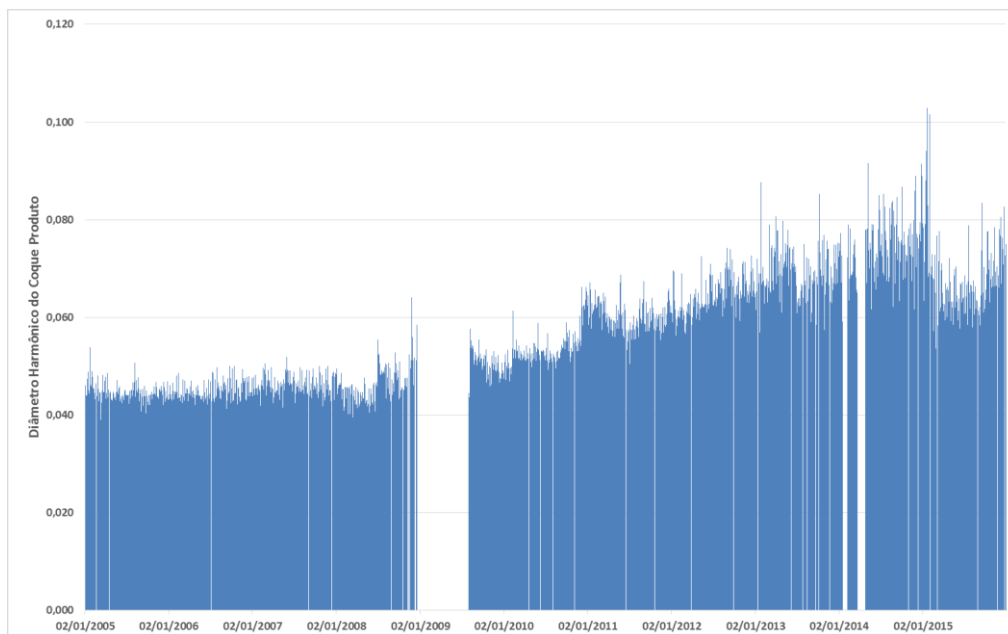


Figura 5.15: Histórico do diâmetro harmônico do coque abastecido no alto-forno 1.

Na figura 5.16 foi separado o período até e após 2008. Nota-se grande diferença no diagrama entre os dois períodos, a massa de dados até 2008 se concentra com maiores valores de intensidade de irrigação e os casos que extrapolam o limite teórico estão nesse período.

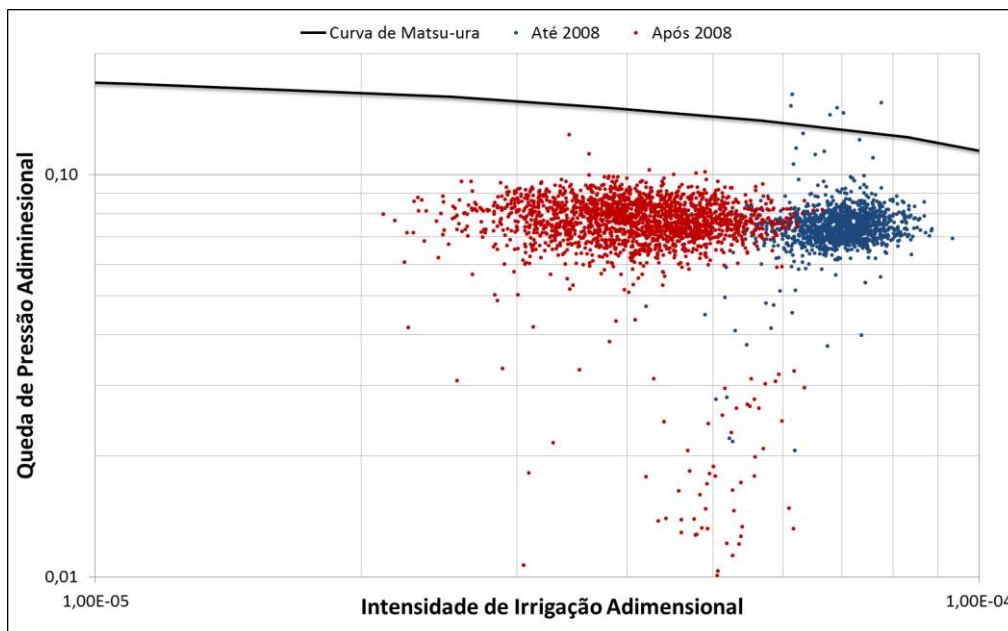


Figura 5.16: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopros e Nível B2 para o alto-forno 1 separando antes e após o ano de 2008.

Assim, fica claro que as características granulométricas do coque têm grande impacto nos fenômenos de retenção e refluxo. No item 5.4 desse texto foi feita uma análise de sensibilidade das variáveis críticas e poderá ser avaliado o impacto da distribuição granulométrica do coque.

### 5.2.3 Impacto da Molhabilidade Entre Escória e Coque na Intensidade de Irrigação Adimensional

A molhabilidade entre escória e coque na zona de gotejamento tem grande impacto na intensidade de irrigação adimensional de MATSU-URA e OHNO (1994), equação 4.2. Pequenas variações no ângulo da molhabilidade fazem a função cosseno ao quadrado variar bruscamente entre 0 e 1.

Foi mostrado nos estudos de KANG *et al.* (2005) que a molhabilidade da escória no coque é mínima, valores do ângulo de contato próximos de  $90^\circ$ . Entretanto, pequenas variações nesse ângulo, por exemplo de  $75^\circ$  a  $120^\circ$  fazem o resultado da intensidade de irrigação mudar e ter outro valor de limite real, como mostrado nas figuras 5.17 e 5.18. A figura 5.11 representa a situação de  $90^\circ$ , intermediária entre  $75^\circ$  e  $120^\circ$ , e que foi utilizada em todas as outras análises.

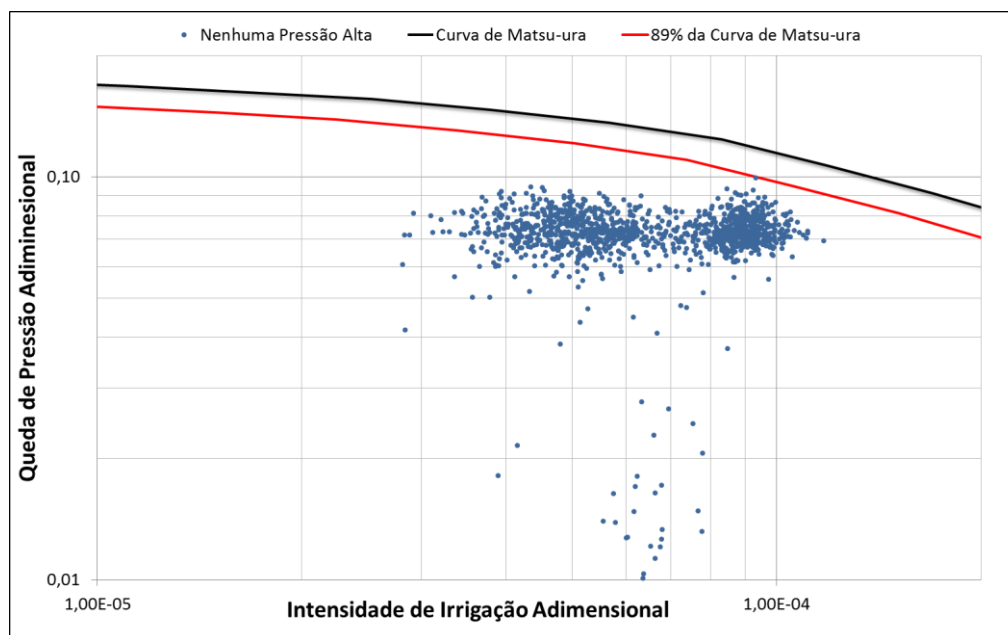


Figura 5.17: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopros e Nível B2 para o alto-forno 1 com ângulo de contato de  $75^\circ$ .

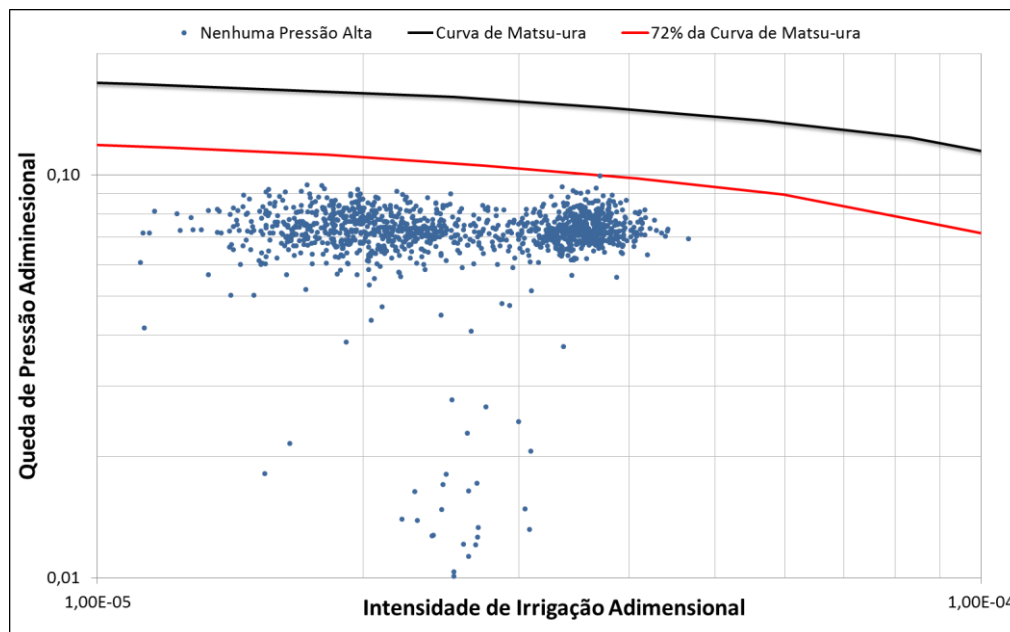


Figura 5.18: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopros e Nível B2 para o alto-forno 1 com ângulo de contato de 120°.

Constata-se o impacto da molhabilidade da escória no coque ao verificar o deslocamento horizontal da massa de dados e na alteração dos valores dos limites reais para ângulos de 75°, 90° e 120°, respectivamente, 89%, 83% e 72%.

KANG *et al.* (2005) mostraram que a basicidade da escória, a cinza do coque e o tempo de contato interferem no ângulo de contato. Entretanto, não foram encontradas na literatura referências que permitissem calcular o ângulo de contato a partir das características da escória e do coque. Em todo o trabalho usou-se o ângulo de contato fixo de 90°, conforme é sugerido por KANG *et al.* (2005). Seria interessante aprofundar nesse conhecimento de forma a calcular o ângulo de contato a partir de características do coque e da escória, para assim deixar o modelo mais sensível às variações dessa interface.

### 5.3 Diagramas de Retenção e Refluxo para o Alto-forno 2

Foram apresentadas anteriormente as discussões com foco no alto-forno 1, por ser objeto de maior interesse. Entretanto, observa-se um comportamento diferente quando se analisa os diagramas de retenção e refluxo para o alto-forno 2. As figuras 5.19, 5.20 e 5.21 apresentam os diagramas para o alto-forno 2 no primeiro nível de tomada de pressão (S1), no segundo nível de tomada de pressão (S2) e na pressão de topo, respectivamente.

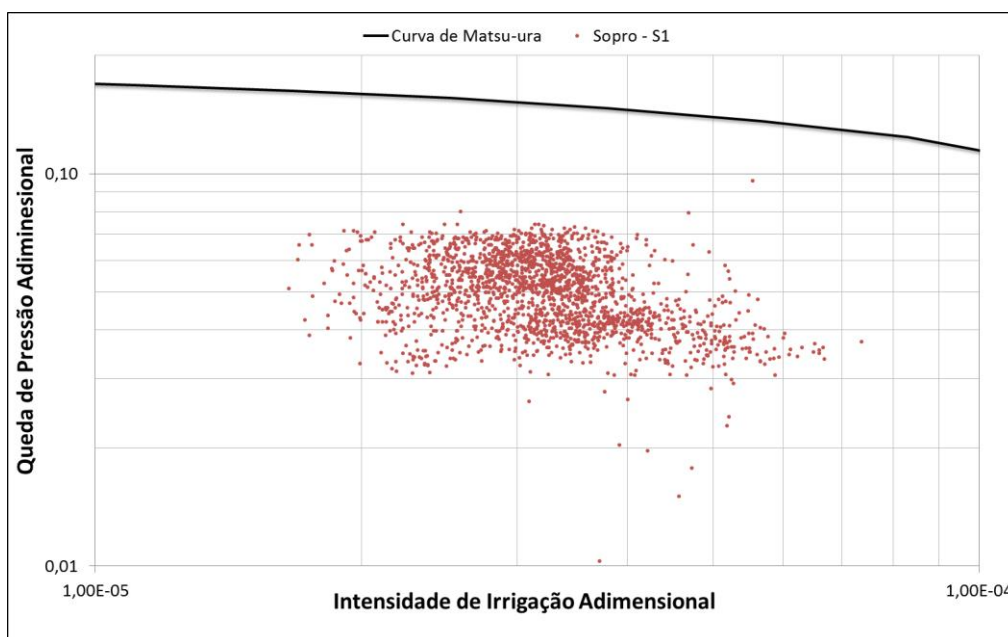


Figura 5.19: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S1 para o alto-forno 2.

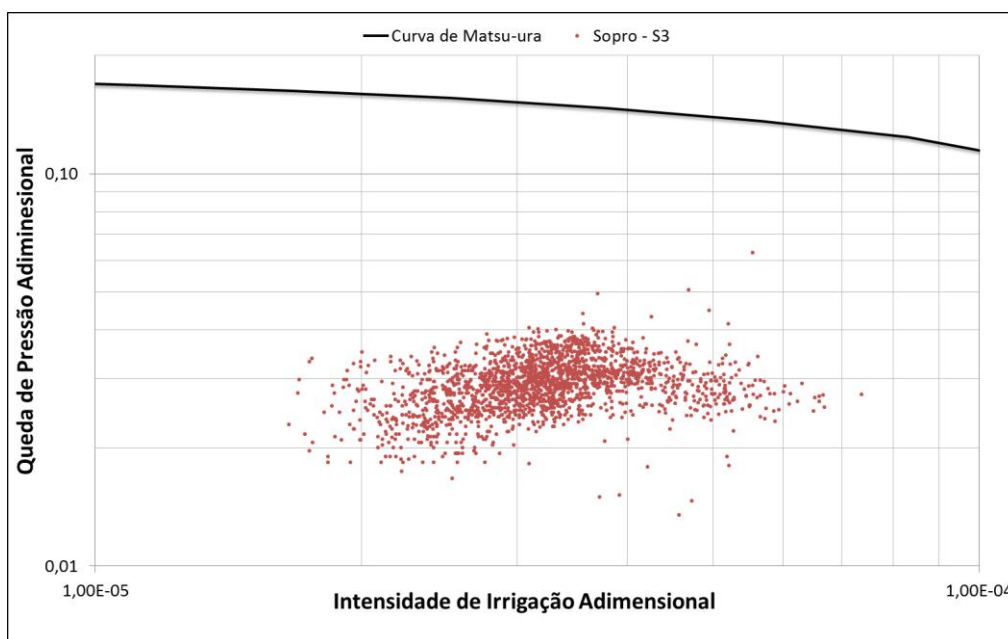


Figura 5.20: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S3 para o alto-forno 2.

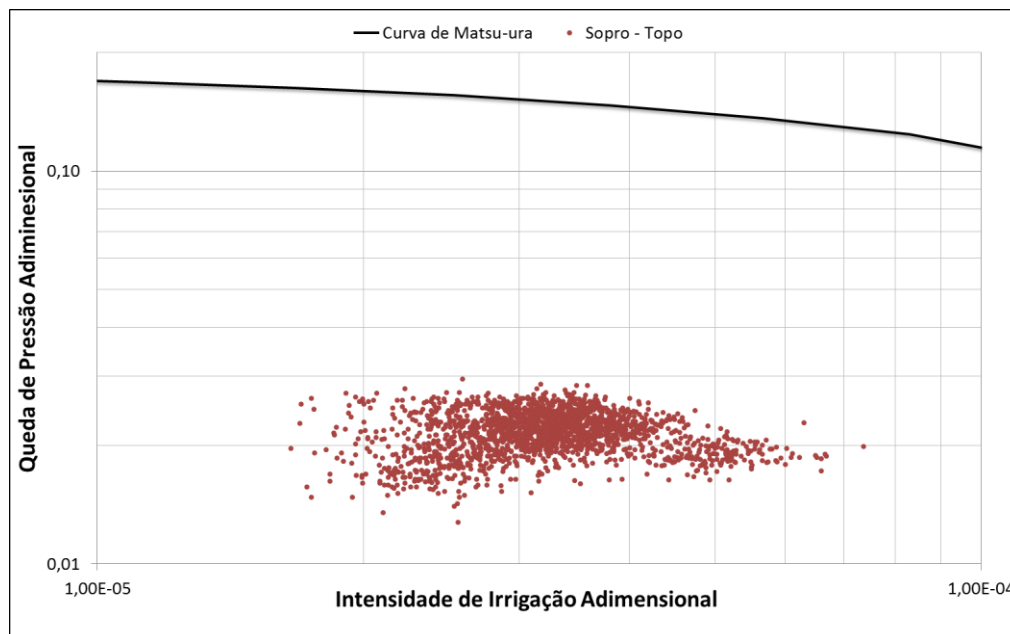


Figura 5.21: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 2.

É possível observar que com o aumento da intensidade de irrigação adimensional para o alto-forno 2 as quedas de pressão entre sopro e nível S1 tendem a cair e as quedas de pressão entre sopro e nível S3 tendem a subir. Para as quedas de pressão entre sopro e topo, a massa de dados não parece ficar tão concentrada como o gráfico similar do alto-forno 1, figura 5.7. Essa falta de concentração deve ter relação com a maior permeabilidade desse forno, ele provavelmente não atinge os limites de queda de pressão entre sopro e topo com tanta frequência como o alto-forno 1, mostrado na figura 5.7.

As figuras 5.22, 5.23 e 5.24 mostram os diagramas separando os dias que não tem pressão alta, dos que tem de 1 a 5 pressões altas e dos que tem mais de 6 pressões altas. Ao separar os dias com pressões altas para o alto-forno 2 nota-se um comportamento diferente do alto-forno 1, pois não se vê relação entre as instabilidades e a curva de MATSU-URA e OHNO (1994). A maior parte das pressões altas estão concentradas em momentos em que a queda de pressão adimensional entre sopro e nível S1 são baixas.

Mesmo para as quedas de pressão entre sopro e nível S1 e topo não se vê relação clara com o diagrama de MATSU-URA e OHNO (1994). Isso pode ser observado ao traçar os limites reais da curva para o alto-forno 2. Não é possível separar situações com a ocorrência ou não de pressões altas.

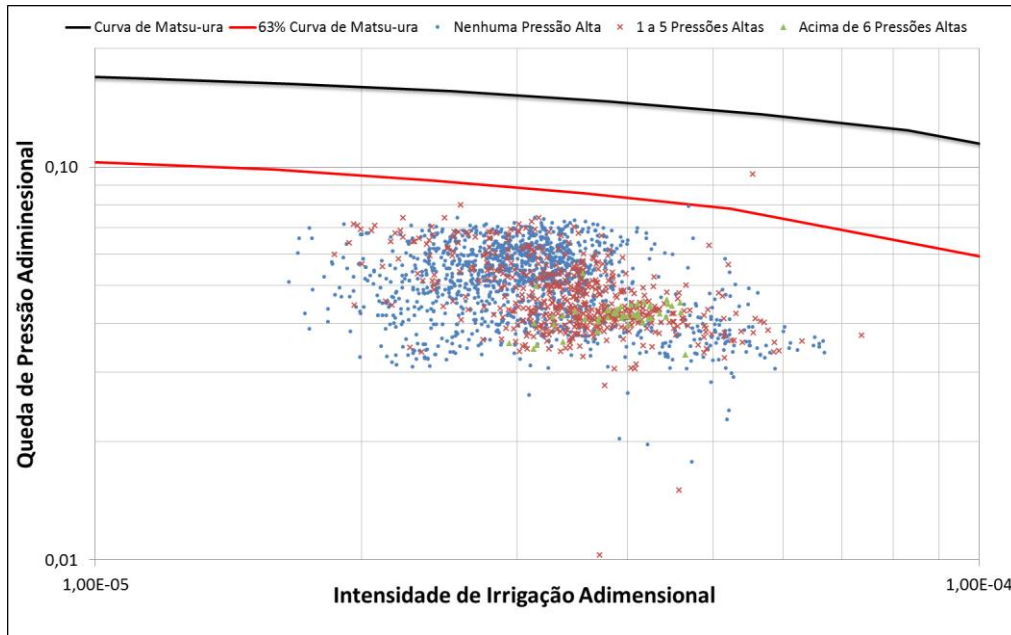


Figura 5.22: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S1 para o alto-forno 2 com frequência de pressões altas.

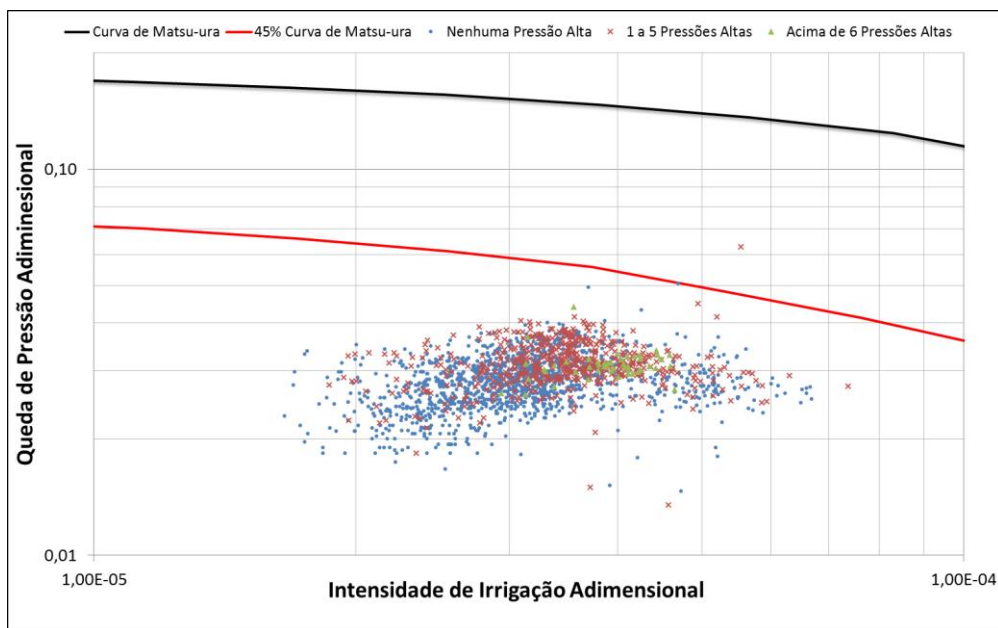


Figura 5.23: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível S3 para o alto-forno 2 com frequência de pressões altas.

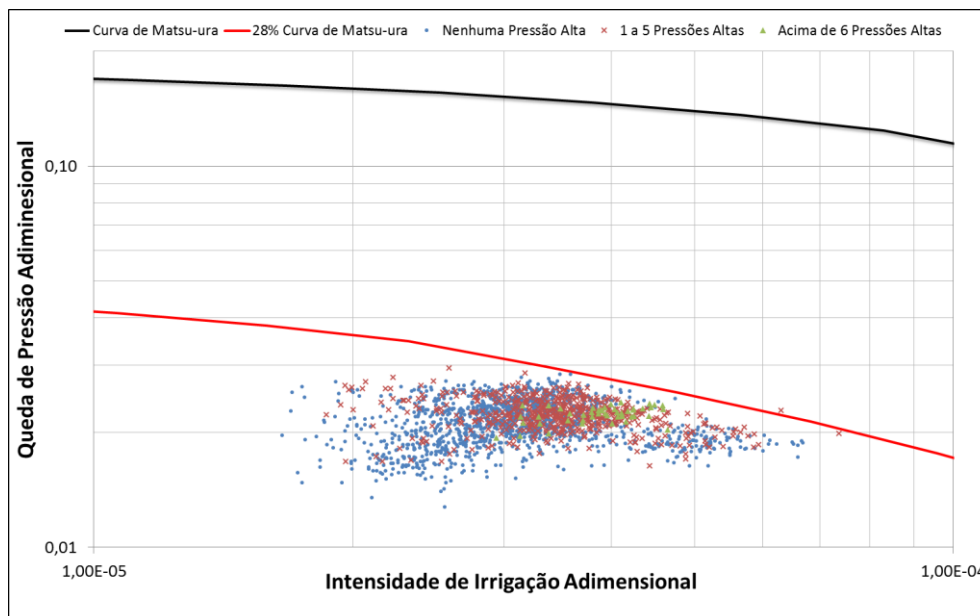


Figura 5.24: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Topo para o alto-forno 2 com frequência de pressões altas.

Os resultados apresentados dos diagramas de retenção e refluxo para o alto-forno 2 sugerem que esse fenômeno não é um problema operacional para este alto-forno, pelo menos entre seu início de operação e o final do ano de 2015.

Possivelmente não é um problema para o alto-forno 2, pois ambos altos-fornos trabalham com matérias-primas semelhantes e como o alto-forno 2 é menor, ele provoca menor degradação das mesmas e propicia melhor permeabilidade em todo o reator.

#### 5.4 Análise de Sensibilidade das Variáveis Críticas

As variáveis do eixo das ordenadas dos diagramas de retenção e refluxo são valores fixos ou são respostas de instrumentos de medição do processo como as tomadas de pressão. Já para o eixo das abscissas, há algumas variáveis que foram chamadas de variáveis críticas e que então se fez uma avaliação do impacto delas na intensidade de irrigação adimensional.

Foi utilizado o mesmo critério para as análises de sensibilidade do alto-forno 1 e 2. Usou-se como base o modelo de MATSU-URA e OHNO (1994) com as médias das variáveis: produção, volume específico de escória, viscosidade de escória, diâmetro harmônico do coque, diâmetro harmônico do coque das ventaneiras (considerando a degradação teórica) e tensão superficial da escória.

A análise de sensibilidade foi feita conforme os valores mínimos, médios e máximo de cada variável e cada uma com o respectivo intervalo. A diferença da análise de sensibilidade entre os altos-fornos foi somente quanto à produção diária, já que os fornos trabalhando com o mesmo coque e com carga metálica parecida, logo as características da escória são semelhantes. A tabela V.5 mostra esses valores.

Tabela V.5: Faixas consideradas na análise de sensibilidade para os altos-fornos.

|  | Valor Máximo | Valor Médio | Valor Mínimo | Intervalo de avaliação |
|--|--------------|-------------|--------------|------------------------|
| Produção AF1 (t/dia)                       | 8500         | 7500        | 6500         | 100 em 100             |
| Produção AF2 (t/dia)                       | 5000         | 4000        | 3000         | 100 em 100             |
| Volume Específico de Escória (kg/t)        | 400          | 325         | 250          | 10 em 10               |
| Viscosidade da Escória URBAIN (Pa.s)       | 0,500        | 0,350       | 0,200        | 0,02 em 0,02           |
| Tamanho Médio do Coque nas Ventaneiras (m) | 0,060        | 0,040       | 0,020        | 0,001 em 0,001         |
| Diâmetro Harmônico do Coque (m)            | 0,090        | 0,065       | 0,040        | 0,001 em 0,001         |
| Fração de Vazios (-)                       | 0,700        | 0,450       | 0,200        | 0,01 em 0,01           |
| Tensão Superficial (N/m)                   | 0,550        | 0,500       | 0,450        | 0,01 em 0,01           |

A análise de sensibilidade foi feita avaliando, para ambos os dados dos altos-fornos, o impacto de uma variação de  $1,0 \times 10^{-6}$  da intensidade de irrigação adimensional nas outras variáveis. Logo, os valores das outras variáveis da tabela V.6 significam que aquele montante impacta em  $1,0 \times 10^{-6}$  na intensidade de irrigação e pode se comparar o impacto entre as variáveis também. Por exemplo, para o alto-forno 1, um aumento na produção de 136 toneladas por dia impacta da mesma forma que aumentar o volume específico de escória em 25,1 kg por tonelada, com a visão de permeabilidade da zona de gotejamento pelo modelo de intensidade de irrigação adimensional de MATSU-URA e OHNO (1994).

Tabela V.6: Resultados da análise de sensibilidade das variáveis críticas para os altos-fornos

| Variáveis   | Alto-forno 1 | Alto-forno 2 |
|---|--------------|--------------|
| Intensidade de Irrigação Adimensional (MATSU-URA) | 1,00E-06     | 1,00E-06     |
| Produção (t/dia)                                  | 1,36E+02     | 1,18E+02     |
| Volume Específico de Escória (kg/t)               | 2,51E+01     | 4,15E+01     |
| Viscosidade da Escória URBAIN (Pa.s)              | 1,27E-02     | 2,07E-02     |
| Diâmetro Harmônico do Coque nas Ventaneiras (m)   | -6,20E-04    | -7,63E-04    |
| Diâmetro Harmônico do Coque (m)                   | -1,02E-03    | -1,50E-03    |
| Fração de Vazios (-)                              | -2,82E-04    | -4,34E-04    |
| Tensão Superficial (N/m)                          | -1,29E-11    | -7,93E-12    |

Cada variação quantificada na tabela V.6 indica um aumento de  $1,0 \times 10^{-6}$  na Intensidade de Irrigação Adimensional do diagrama. Isso provoca a ocorrência de pressões altas, chamadas de instabilidades operacionais, e os fenômenos de retenção e refluxo para menores quedas de pressões adimensionais.

Para operação de alto-forno, uma informação importante é que, a princípio, o diâmetro harmônico do coque tem grande impacto. Com a visão do modelo de MATSU-URA e OHNO (1994), diminuir o  $D_p$  do coque em 1 milímetro deveria ser compensado com uma redução de produção 136 t/dia na produção para manter a mesma intensidade de irrigação.

A fração de vazios no cadinho tem grande impacto na intensidade de irrigação adimensional e pode variar não só pelo  $D_p$ , ao contrário da equação 4.3, pois essa equação é uma forma simplificada de avaliação. Por exemplo, essa variável depende também da esfericidade das partículas, da localização radial no cadinho (figura 4.9) e até do nível de líquidos dentro do alto-forno (situação do esgotamento em um certo momento). NIGHTINGALE (2000) estudou a influência do nível de líquidos no cadinho e outros fatores que impactam na fração de vazios nessa região.

Pela fração de vazios na zona de gotejamento depender de vários fatores e ser uma variável crítica, é interessante avaliar graficamente o comportamento dessa variável no diagrama de MATSU-URA e OHNO (1994). As figuras 5.25, 5.26 e 5.27 mostram, respectivamente, a fração de vazios fixada em 0,50, 0,40 e 0,33.

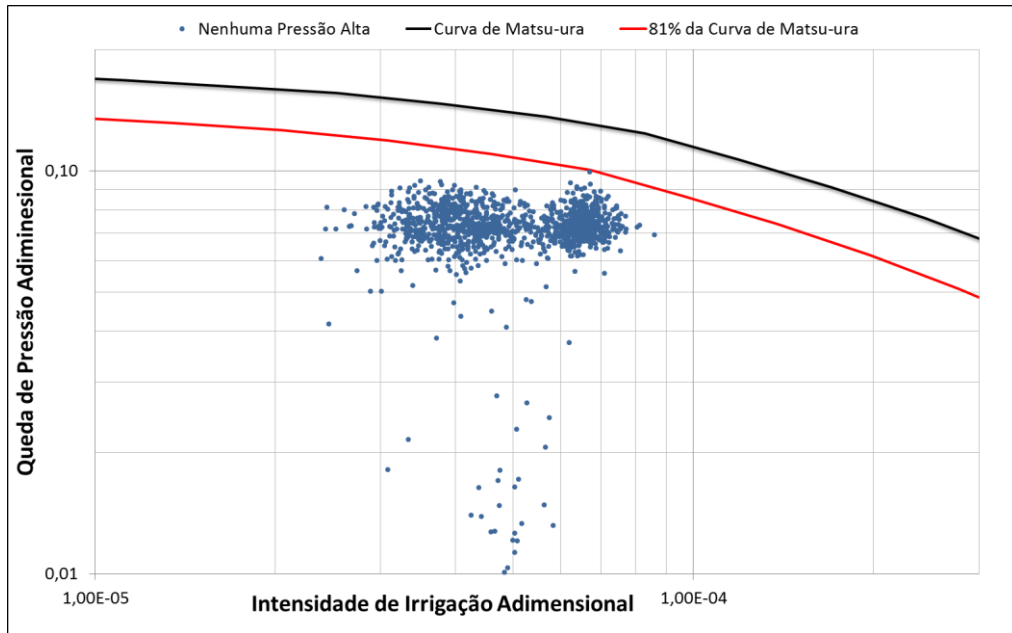


Figura 5.25: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 utilizando fração de vazios fixa em 0,50.

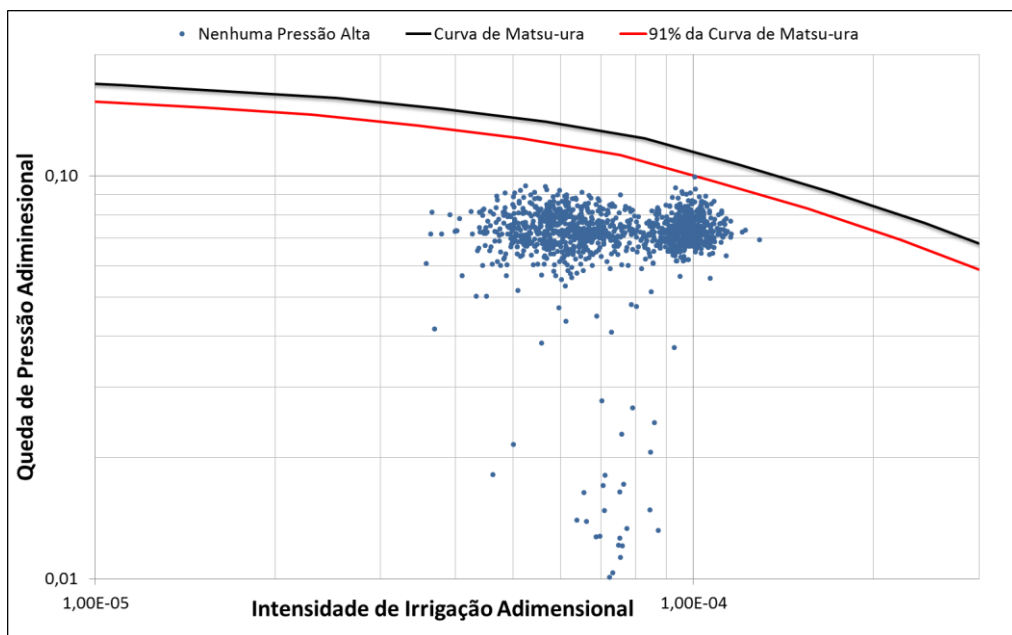


Figura 5.26: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 utilizando fração de vazios fixa em 0,40.

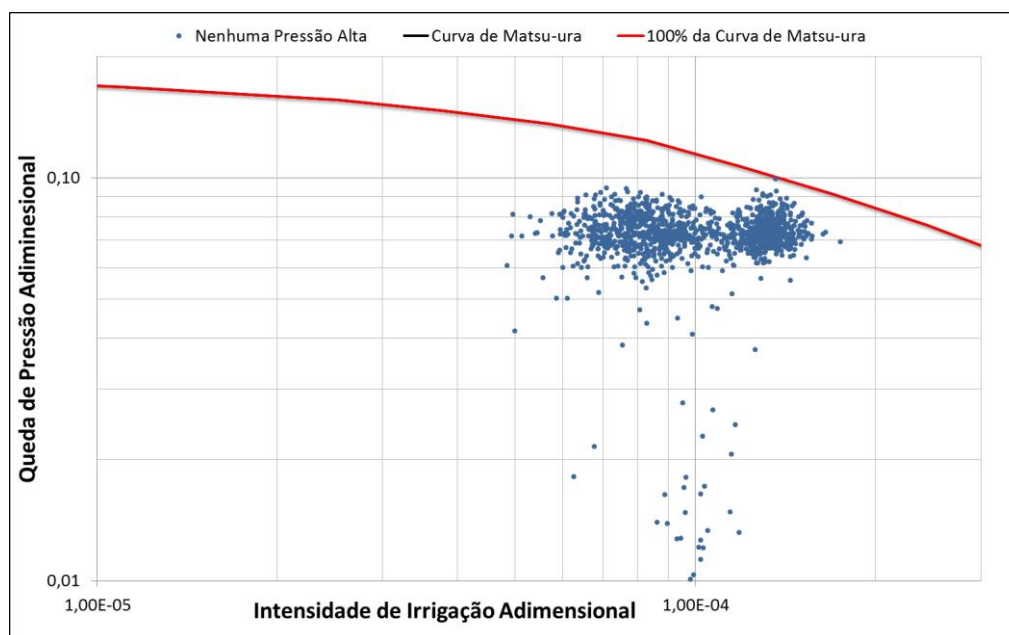


Figura 5.27: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopro e Nível B2 para o alto-forno 1 utilizando fração de vazios fixa em 0,33.

Para a figura 5.25 observa-se que o limite real é bem próximo da figura 5.11, e isso é devido aos dados da fração de vazios calculados pelo  $D_p$  serem, em média, próximos 0,50.

Com a diminuição da fração de vazios para 0,40 e 0,33, figuras 5.26 e 5.27 respectivamente, nota-se um aumento da intensidade de irrigação adimensional. Para o valor de 0,33, o limite real é igual ao limite teórico, 100%. Isso indica que a fração de vazios da zona de gotejamento do alto-forno 1 para o ponto plotado dificilmente seria menor que 0,33.

Todas as variáveis críticas têm seu impacto na intensidade de irrigação adimensional. Vale lembrar que na operação cotidiana de um alto-forno esses parâmetros sempre apresentam variações, e o problema seria maior caso todos variassem de modo que provocassem o aumento da Intensidade de Irrigação Adimensional (IIA).

## 5.5 Limites para Operação da Retenção e Refluxo para o Alto-forno 1

A figura 5.28 mostra as condições limites só para o período após 2008, em situações em que não houve nenhum tipo de instabilidade operacional. Para os cálculos de limite de operação foi analisado somente após 2008, já que ficaram nítidas as mudanças de patamar no processo e esse período representa melhor a operação atual do

alto-forno em questão. É possível observar que o limite real é 70% do limite teórico da curva de MATSU-URA e OHNO (1994).

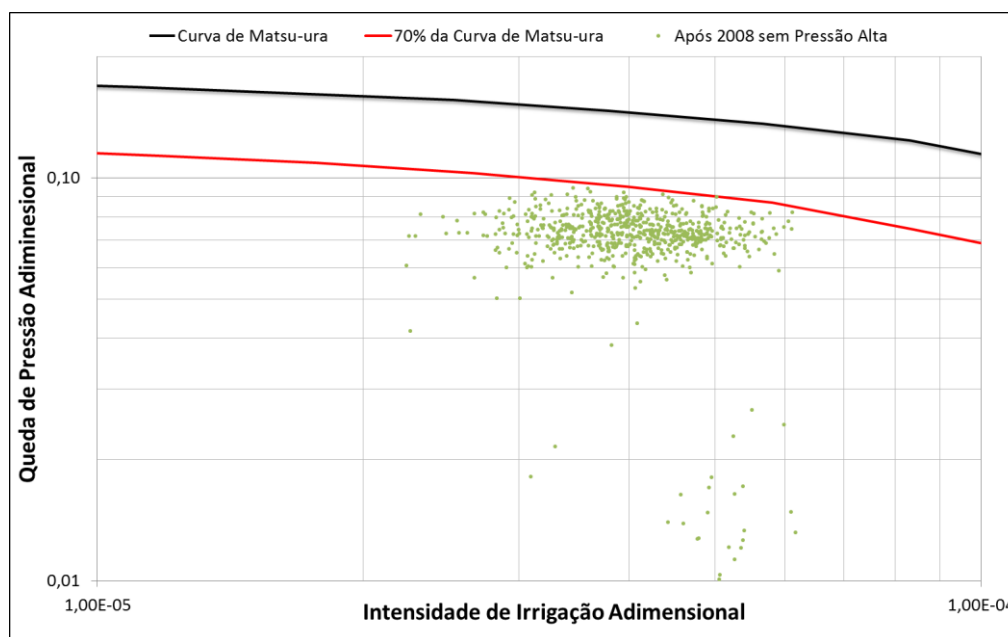


Figura 5.28: Diagrama de MATSU-URA para queda de pressão entre Sopros e Nível B2 para o alto-forno 1 sem ocorrência de pressão alta após ano de 2008.

Dessa forma, pode-se montar a tabela V.7 que mostra os limites de queda de pressão medidos pelos instrumentos do alto-forno 1 de forma que não ocorra uma instabilidade operacional. Por exemplo, caso o alto-forno esteja operando com uma IIA no valor de  $8,34 \times 10^{-5}$ , o operador de alto-forno deve controlar a queda de pressão entre sopros e nível B2 em no máximo  $0,71 \text{ kgf/cm}^2$  (incluindo perda de pressão das ventaneiras), pois acima desse valor deve apresentar uma instabilidade operacional.

Tabela V.7: Limites da queda de pressão entre sopros e nível B2 para diferentes intensidades de irrigação adimensional

| Intensidade de Irrigação Adimensional (MATSU-URA) | Queda de Pressão Adimensional | Queda de Pressão Limite entre Sopros e B2 ( $\text{kgf/cm}^2$ ) |
|---|-------------------------------|---|
| 1,17E-05  | 1,14E-01                      | 1,08E+00  |
| 1,77E-05  | 1,09E-01                      | 1,03E+00  |
| 2,66E-05  | 1,03E-01                      | 9,73E-01  |
| 3,97E-05  | 9,53E-02                      | 9,03E-01  |
| 5,81E-05  | 8,69E-02                      | 8,23E-01  |
| 8,34E-05  | 7,47E-02                      | 7,07E-01  |

Pode-se também estabelecer uma queda de pressão limite entre sopros e B2 e então

atuar nas variáveis críticas da IIA quando o alto-forno chegar próximo ao limite de pressão.

Importante ressaltar que a principal ação no cotidiano do operador de alto-forno para minimizar FRR seria a redução da vazão de sopro, que conseqüentemente tem relação com os dois eixos do diagrama, na velocidade superficial do líquido (contida no IIA) e com diminuição de pressão de base.

## 6. CONCLUSÕES

A análise e discussão dos resultados, deste trabalho, permitiram que fossem obtidas as seguintes conclusões:

- 1) Há grande variação do diâmetro harmônico do coque e distribuição granulométrica quando coletado das ventaneiras. Entretanto, o valor médio é razoável comparando com os dados dos altos-fornos japoneses. Para o alto-forno 1 pode considerar uma degradação de 43% entre o coque produto e coque que chega nas ventaneiras.
- 2) Para o alto-forno 1 a avaliação do modelo de retenção e refluxo de MATSU-URA e OHNO (1994) foi mais clara para a queda de pressão entre sopro e nível B2, pois há maior relação com as instabilidades operacionais (pressões altas) e é o provável limite entre zona de gotejamento e zona de coesão.
- 3) Há grande diferença do processo quando é avaliado separadamente os períodos antes e depois de 2008 para o alto-forno 1. Houve grande mudança em parâmetros como diâmetro harmônico do coque produto, produção diária de gusa e massa específica de escória.
- 4) A molhabilidade da escória no coque mostra grande influência na intensidade de irrigação adimensional. Nesse trabalho o ângulo de contato foi fixado em  $90^\circ$ , entretanto julga-se necessário o aprofundamento do conhecimento da molhabilidade da escória para melhorar a precisão do modelo.
- 5) O modelo de retenção e refluxo de MATSU-URA e OHNO (1994) não se mostrou útil para avaliação desse fenômeno para o alto-forno 2, ou nesse alto-forno não ocorreram FRR frequentes no seu histórico.
- 6) A análise de sensibilidade das variáveis críticas do alto-forno 1 mostra que uma variação de  $+ 1,0 \times 10^{-6}$  na intensidade de irrigação adimensional ocorre quando se varia:
  - a. + 136 toneladas na produção diária.
  - b. + 25,1 kg/t da massa específica de escória.
  - c. + 0,0127 Pa.s da viscosidade da escória pelo modelo de URBAIN.
  - d. - 0,620 mm no diâmetro harmônico do coque nas ventaneiras.
  - e. - 1,023mm no diâmetro harmônico do coque produto.
  - f. -  $2,82 \times 10^{-4}$  na fração de vazios.
  - g. -  $1,291 \times 10^{-11}$  N/m na tensão superficial da escória.

- 7) Considerando o período entre os anos de 2009 e 2015 do alto-forno 1 para as quedas de pressão entre sopro e nível B2, foi possível definir o limite real de 70% da curva de MATSU-URA e OHNO (1994) e a partir dele calcular a queda de pressão limite para cada valor de intensidade de irrigação adimensional. Dessa forma, é possível implementar um padrão de controle dessas quedas de pressão entre sopro e nível B2 para evitar o fenômeno de retenção e refluxo na zona de gotejamento desse alto-forno.

## 7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

A dissertação apresentada trouxe aprendizado para os envolvidos diretos, dissemina conhecimento e trouxe importantes resultados, tais como:

- Foi possível avaliar a degradação real entre o coque produto e o coque das ventaneiras de um alto-forno, assim dando maior confiabilidade ao modelo de degradação do coque dos altos-fornos japoneses.
- A partir de artigos japoneses, o trabalho trouxe conhecimento e um modelo ainda não difundido na comunidade alto-fornista brasileira.
- Um modelo foi ajustado para operação de um alto-forno e poderá ser utilizado no dia-a-dia para ajustes de processo e planejamento de consumo de matérias-primas e definição de parâmetros de processo. Esse modelo permitirá aumentar a produtividade de líquidos na zona de gotejamento ao ajustar as outras variáveis críticas.

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a degradação do coque entre logo antes de ser carregado no alto-forno e na região das ventaneiras.
- Avaliar a degradação do coque para um alto-forno de tamanho diferente ao do alto-forno 1 da Gerdau Ouro Branco, por exemplo o alto-forno 2 da mesma empresa.
- Desenvolver um método capaz de estimar a fração de vazios a partir do coque coletado da região das ventaneiras. Pequenas variações na fração de vazios, mesmo que para um mesmo coque, tem grande impacto na intensidade de irrigação adimensional.
- Simular em laboratório e medir o ângulo de contato da escória no coque a partir de variáveis características desses dois protagonistas e talvez do reator. Assim, sendo possível calcular o ângulo de contato, que é traduzido em molhabilidade, para diferentes escórias, coques e condições operacionais.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANDO, Y. et al. Effects of Packed Structure and Liquid Properties on Liquid Flow Behavior in Lower Part of Blast Furnace. **ISIJ International**, Vol. 45, 2005. 1461-1465.

CASTRO, L. F. A.; TAVARES, R. P. **Tecnologia de Fabricação de Ferro-Gusa em Altos-Fornos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, 1998. 854 p.

CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BORRACHA. Ângulo de Contato e Molhabilidade. **Características de Borrachas e Substratos**. Disponível em: <<http://ctborracha.com/>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

ELLIOTT, J. F.; BUCHANAN, R. A.; WAGSTAFF, J. B. Physical Conditions in the Combustion and Smelting Zones of a Blast Furnace. **J. Metals** 4, 4, 1952. 709.

FONTANA, P. E. A. Modelli Físico-matematici di Process di Reduzione dei Mineralli di Ferro. **Bolletino Técnico Finsider (353)**, Luglio 1976. 459-470.

FUKUTAKE, T.; RAJAKUMAR, V. Liquid Holdup and Abnormal Flow Phenomena in Packed Beds under Conditions Simulating the Flow in the Dropping Zone of a Blast Furnace. **ISIJ International**, Vol. 22, 1982. 355-364.

JFE STEEL CORPORATION. **Answer for Flooding Questionnaire for Gerdau Blast Furnace 1**. Contrato de Consultoria com Gerdau Ouro Branco. Ouro Branco/MG. 2015. (Trabalho não publicado.).

KANG, T. W. et al. Wetting and Interfacial Reaction Investigations of Coke/Slag Systems and Associated Liquid Permeability of Blast Furnaces. **ISIJ International**, Vol. 45, 2005. 1526-1535.

MATSU-URA, M.; OHNO, Y. Modelling of Gas and Liquid Flow in Two Dimensional Packed Bed and Analysis of Dropping Zone in Blast Furnace. **ISIJ International**, Vol. 80, 1994. 15-19.

MERSMANN, A. Zur Berechnung des Flutpunktes in Füllköperschüttungen. **Chemie Ingenieur Technik**, Vol. 37, 1954. 218.

MILLS, K. **The Estimation of Slag Properties**. Southern African Pyrometallurgy. [S.l.], p. 27-29. 2011.

NEGRO, P. et al. Characterization of Permeability of the Blast Furnace Lower Part. **La Revue de Métallurgie-CIT**, Juin 2001.

NIGHTINGALE, R. J. **The Development and Application of Hearth Voidage Estimation and Deadman Cleanliness Index for the Control of Blast Furnace Operation**. University of Wollongong. Wollongong, Australia. 2000.

NOGAMI, H. et al. Numerical Investigation on Effects of Deadman Structure and Powder Properties on Gas and Powder Flows in Lower Part of Blast Furnace. **ISIJ International**, Vol. 44, 2004. 500–509.

SHERWOOD, T. K.; SHIPLEY, G. H.; HOLLOWAY, F. A. L. Flooding Velocities in Packed Columns. **Industrial & Engineering Chemistry**. Vol. 30, 1938. 765.

SLAG ATLAS. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GMBH, 1981. 178 p.

SLAG ATLAS. 2nd Edition. ed. Dusseldorf: Verlag Stahleisen, 1995. 430 p.

URBAIN. Viscosity Estimation of Slag. **Steel Research**, 1987. 111-116.

YAGI, J.; TAKEDA, K.; OMORI, Y. Two-dimensional Simulation on the Gas Flow and Heat Transfer. **ISIJ Internacional**, Vol 22, 1982. 884-892.