

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTIMATIVA DO CONSUMO DE AR COMPRIMIDO NA PRODUÇÃO DE
EMBALAGENS DE VIDRO**

Luciano de Almeida Nagata

São Paulo
2014

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTIMATIVA DO CONSUMO DE AR COMPRIMIDO NA PRODUÇÃO DE
EMBALAGENS DE VIDRO**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Luciano de Almeida Nagata

Orientador: Marcos M. Pimenta

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2014

Nagata, Luciano de Almeida

**Estimativa do consumo de ar comprimido na produção de
embalagens de vidro / L.A. Nagata. – São Paulo, 2014.
83 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Ar comprimido (Consumo) 2.Embalagens de vidro (Produ-
ção I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departa-
mento de Engenharia Mecânica II.t.**

RESUMO

O ar comprimido é um importante recurso para a produção de embalagens de vidro, cuja produção corresponde a uma grande parte do consumo energético de uma usina.

Com o objetivo de compreender melhor e avaliar esse consumo para os diferentes tipos de artigos que são produzidos pela indústria, esse trabalho, com o auxílio de empresa Verallia, do grupo Saint-Gobain, desenvolve um programa em Excel, baseado, principalmente, em modelos teóricos (teorias de escoamento compressível) e numéricos (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) capaz de estimar o consumo de ar comprimido de uma linha de produção de embalagens de vidro em função de seus principais parâmetros.

Os resultados do programa foram satisfatórios na maior parte dos casos, permitindo não só uma previsão do consumo da linha de produção, mas também a identificação dos setores e mecanismos responsáveis pela maior parte do consumo. Contudo em alguns casos os cálculos do programa destoam bastante de medidas fornecidas pela Verallia. Para esses casos especiais investigações devem ser realizadas para compreender melhor o motivo da incoerência entre medidas e cálculos.

Palavras chave: ar comprimido, embalagens de vidro, máquinas IS, área quente, CFD, escoamento compressível

ABSTRACT

Compressed air is a very important resource for glass packaging production, as its generation is responsible for a big percentage of a factory energy consumption.

For a better understanding and to evaluate this consumption for the different kinds of articles produced by this industry, this work, with the collaboration of the enterprise Verallia, from the group Saint-Gobain, develops a software made in Excel, based, mainly, in theoretical (compressed flow theories) and numerical (CFD – Computational Fluid Dynamics) models for the estimation of a glass packaging production line compressed air consumption in function of its principal parameters.

The results from this software are quite satisfactory for the most cases, allowing good predictions of the production line consumption and the identification of the most consuming sectors and mechanism. However there are some cases for which the results don't really correspond to the measurements made by Verallia. For these cases, an investigation is needed in order to reveal the reasons why the measurements and the calculations are so different.

Keywords: Compressed air, compressible flow, hollow glass, IS machine, hot end, CFD, glass packaging

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – operações pertencentes à categoria <i>operating air</i>	33
Tabela 2 – operações das categorias forming, upstream e ware handling air	34
Tabela 3 – Operações modeladas usando escoamento isentrópico	49
Tabela 4 – Operações modeladas usando o Modelo de Fanno	51
Tabela 5 – Operações modeladas usando Code Saturne	57
Tabela 6 – Comparação entre medidas e cálculos para dois artigos fabricados pelo processo soprado-soprado	67
Tabela 7 - Comparação entre medidas e cálculos para dois artigos fabricados pelo processo prensado-soprado estreita abertura.....	70
Tabela 8 - Comparação entre medidas e cálculos para dois artigos fabricados pelo processo prensado-soprado larga abertura	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais componentes do <i>feeder</i>	15
Figura 2 – Principais componentes do Gob distribuidor.....	17
Figura 3 – Disposição das peças durante a compressão.....	18
Figura 4 – Configurações das peças durante o assopro do parison.....	19
Figura 5 – Configuração das peças durante a prensagem	20
Figura 6 – Esquematização da inversão	21
Figura 7 – Disposição das peças durante o assopro final.....	21
Figura 8 – Exemplos de artigos defeituosos	23
Figura 9 – Configuração da saída de artigos da área fria (Vie de l'exploitation, 2014)	24
Figura 10 – Representação da rede de ar comprimido de uma linha de produção.....	25
Figura 11 – Ilustração do ângulo de instalação exigido pelo captor (VAN PUTTEN INSTRUMENTS, 2011)	26
Figura 12 – Exemplo de medidas globais de ar comprimido.....	27
Figura 13 – Representação das medidas de consumo global em função da velocidade de produção e da massa do artigo	28
Figura 14 – Consumo das linhas de produção em três usinas diferentes	28
Figura 15 – Esquema da montagem da bancada de medidas	29
Figura 16 – Exemplo de medida realizada na bancada de testes (CLEMENT, 1997)30	
Figura 17 – Exemplo de medida realizada com o segundo método de medidas individuais (FLEURY, 2013).....	31
Figura 18 – Circuito pneumático padrão que liga o reservatório a um mecanismo da máquina IS	35
Figura 19 –Planilha Interface do programa desenvolvido	38
Figura 20 – Esquema do modelo de cilindros pneumáticos (NICOLAS, 2013).....	39
Figura 21 – Comparação entre medidas globais e cálculos do modelo sem vazamento para a rede de baixa pressão.....	42
Figura 22 – Os três níveis de vazamentos do modelo.....	43
Figura 23 – Cavidades que devem ser preenchidas nas operações de compressão e assopro do parison.....	45
Figura 24 – Exemplo de uma correlação tempo x massa do artigo	47

Figura 25 – Representação do modelo usado para o modelo isentrópico	50
Figura 26 – Circuito pneumático completo das operações calculadas usando o modelo de Fanno	52
Figura 27 – Resultado do uso do modelo de Fanno acoplado com as equações de perda de carga para o resfriamento do bloco	54
Figura 28 – Representação das pressões e fluxo de ar durante a segunda etapa do assopro final	55
Figura 29 – Diagrama da pressão interna da cabeça de assopro em função da pressão do regulador (DR MARTIN BUSS & PARTNER, 2004)	55
Figura 30 – Comparação entre resultados do método de Fanno e medidas para a segunda etapa do assopro final.....	56
Figura 31 - Exemplo de uma malha desenvolvida para o modelo de resfriamento do fundo da forma	58
Figura 32 – Evolução das vazões de entrada e saída do cálculo do resfriamento do fundo da forma	60
Figura 33 – Resultados do cálculo CFD para o resfriamento do fundo da forma em comparação com medidas	60
Figura 34 – Perfil de velocidades para um resultado de CFD para o resfriamento do fundo da forma	61
Figura 35 – Análise de convergência para o modelo de assopro final em potes	64
Figura 36 – Regressão linear dos resultados do assopro final em potes	64
Figura 37 – Dimensões dos modelos de cilindro pneumáticos da planilha <i>Process Parameters</i>	65
Figura 38 – Formulas da vazão mássica e duração da planilha <i>Process Parameters</i>	65
Figura 39 – Organização dos dados na planilha Calcul	66
Figura 40 – Repartição do consumo do soprado-soprado, 500g e 7ciclos/min	68
Figura 41 – Participação das operações no consumo total de linha de produção Soprado-Soprado.....	69
Figura 42 - Repartição do consumo do prensado-soprado estreita abertura, 170g e 13,5 ciclos/min	71
Figura 43 - Participação das operações no consumo total de linha de produção Prensado-Soprado Estreita Abertura	72

Figura 44 - Repartição do consumo do prensado-soprado larga abertura, 405g e 8,21 ciclos/min	74
Figura 45 - Participação das operações no consumo total de linha de produção Prensado-Soprado Larga Abertura (tradução Anexo 3)	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FABRICAÇÃO DE EMBALAGENS DE VIDRO	14
2.1 Setor de fusão	14
2.2 Área Quente	15
2.2.1 Feeder	15
2.2.2 Gob Distribuidor	16
2.2.3 Máquina IS	17
2.2.4 Esteira.....	22
2.3 Área Fria.....	22
3 MEDIDAS DO CONSUMO DE AR COMPRIMIDO NA ÁREA QUENTE	25
3.1 Medidas de consumo global da linha de produção	25
3.2 Medidas de operações individuais	29
4 IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DA ÁREA QUENTE	32
5 NIVEL PADRÃO DE PRESSÃO DAS OPERAÇÕES	35
6 APRESENTAÇÃO DO MODELO GLOBAL	37
7 MODELO DE CILINDROS PNEUMÁTICOS	39
7.1 Obtenção das dimensões dos diversos cilindros pneumáticos	41
7.2 Implementação de um modelo de vazamentos.....	41
8 MODELO DE ENXIMENTO DE RECIPIENTES	45
9 GRUPO DE OPERAÇÕES BASEADAS NO ESCOAMENTO DE AR COMPRIMIDO.....	47
9.1 Estimativa do tempo de operação do mecanismo	47
9.2 Cálculo do fluxo de ar durante o funcionamento do mecanismo.....	48

9.2.1 Modelo de escoamento compressível isentrópico	48
9.2.2 Modelo de escoamento de Fanno	50
9.2.3 Modelos de cálculos CFD	56
9 INCOMPORAÇÃO DOS RESULTADOS DOS SUB-MODELOS NO MODELO GLOBAL	65
10 RESULTADOS DO MODELO GLOBAL.....	67
10.1 Resultados do soprado soprado	67
10.2 Resultados do prensado-soprado de estreita abertura	70
10.3 Resultados do prensado-soprado larga abertura.....	73
11 CONCLUSÃO	75
12 CRONOGRAMAS.....	77
13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
APÊNDICE 1	80
ANEXO 1	81
ANEXO 2.....	82
ANEXO 3.....	83

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a eficiência energética é um tópico constantemente em discussão de grande importância no cenário mundial. Por essa razão muitas indústrias vêm fazendo investimentos cada vez maiores para a melhora desse fator, seja para a diminuição de seu impacto ambiental diretamente, seja por um aspecto econômico. Uma das indústrias que onde esse tema vem ganhando progressivamente mais atenção é a indústria de embalagens de vidro.

A produção de embalagens de vidro (garrafas, potes, etc) é uma atividade baseada fortemente no uso de ar comprimido, um recurso cujo o custo energético é bastante alto e cuja produção consome em média um terço da eletricidade destinada a uma usina. Isso acontece pois além do ar comprimido ser de grande importância para o assopro e o resfriamento dos artigos durante sua conformação, as máquinas e mecanismos dessa indústria tem um funcionamento principalmente pneumático.

Sabe-se que atualmente o uso de ar comprimido nas usinas desse setor ainda está bastante distante de ser ótimo e em consequência algumas empresas do setor começaram a investir em iniciativas para a otimização do consumo e da produção desse recurso, como por exemplo medidas do consumo de alguns processos específicos e medidas do consumo da área quente¹ durante a produção. Uma dessas empresas é a Verallia (também conhecida no Brasil como Saint-Gobain Vidros), de onde a maior parte dos dados utilizados nesse trabalho vêm.

O problema dessas iniciativas baseadas em medidas é o fato que além de seu custo ser bastante alto para a empresa, seus resultados são na maior parte dos casos muito complexos e de difícil interpretação, devido à grande variedade de produtos e de máquinas existentes.

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um modelo teórico, baseado principalmente em cálculos analíticos e numéricos, que estime o consumo de ar comprimido da área quente em função dos principais parâmetros de uma produção e de um artigo. Isso possibilitará a identificação dos principais consumidores de ar comprimido de uma indústria, assim como do nível de eficiência de diferentes usinas

¹ Região logo após o forno de fusão onde a conformação do vidro em artigos de vidro ocorre é feita.

e, em conjunto com alguns dados dos fornecedores, um dimensionamento mais eficiente de compressores para novas plantas.

Nesse relatório serão descritas as medidas realizadas pela empresa Verallia, que serviram de base de validação desse trabalho, os métodos utilizados para identificação dos principais mecanismos da área quente e de seus níveis pressão. Também será apresentado o programa desenvolvido em Excel e como ele foi montado, além do detalhamento dos diversos submodelos desenvolvido para esse programa. Enfim serão apresentados os resultados do trabalho e comparações com as medidas realizadas para avaliar a qualidade desses resultados.

2 FABRICAÇÃO DE EMBALAGENS DE VIDRO

Como esse trabalho será realizado em torno da produção de garrafas e potes de vidro, essa seção será dedicada a familiarização com os processos e as nomenclaturas da atividade a partir de uma descrição dos principais setores e procedimentos pelo qual o vidro deve passar até a embalagem dos artigos.

Uma fábrica de embalagens de vidro pode ser dividida em três grandes setores que são chamados:

- O setor de fusão – fusão do vidro;
- A área quente – conformação do vidro;
- A área fria – controle de qualidade dos artigos.

Nas próximas seções as principais funções e processos desses setores serão descritos de forma mais detalhada.

2.1 Setor de fusão

O setor de fusão é o setor responsável pela alimentação da área quente com vidro líquido, que deve ter uma composição ótima para cada tipo de artigo, assim como uma temperatura, e em consequência uma viscosidade, homogênea e controlada.

As funções desse setor começam com a recepção do conjunto de matérias primas, que exige o controle da massa, das propriedades químicas e da granulometria dos diferentes componentes.

A próxima função importante realizada no setor de fusão é a mistura dos componentes nas proporções definidas para o artigo. A composição média de um produto do setor é 71% de areia (silício), 13% de soda, utilizada para reduzir o ponto de fusão da mistura, e 16% de estabilizantes e óxidos diversos, cujas proporções variam em função da cor e das propriedades mecânicas e estéticas desejadas. Atualmente, na maior parte dos casos também são adicionados cacos de vidro provindos de reciclagem nessa mistura².

Enfim a matéria prima é encaminhada aos fornos, onde ela irá fundir dando origem ao vidro líquido, cuja temperatura varia de 1650°C na região mais quente a 1350°C na saída do forno.

² A proporção de cacos de vidro pode corresponder até a 85% da composição

2.2 Área Quente

A área quente é o setor mais importante para o desenvolvimento desse trabalho, visto que é a região da usina que mais consome ar comprimido. Tendo isso em mente, essa seção será a mais detalhada do capítulo de fabricação.

Nesse setor a conformação propriamente dita dos artigos é realizada: o vidro líquido vindo dos fornos chega nesse setor a partir do canal de distribuição, em seguida é transformado em gotas de vidro por um mecanismo conhecido como *feeder*, em seguida essas gotas são transportadas pelo chamado gob distribuidor à máquina IS, onde o vidro líquido é transformado em garrafa ou pote, e finalmente os artigos são transportados para a etapa de tratamento de superfície pela esteira.

2.2.1 Feeder

O *feeder* (Figura 1) é o primeiro mecanismo com o qual o vidro tem contato chegando à área quente. Sua principal função é a criação de gotas de vidro com temperatura, peso e forma homogêneos e constantes e a uma velocidade bem determinada, o que garante a ausência de alguns tipos de defeitos nos artigos.

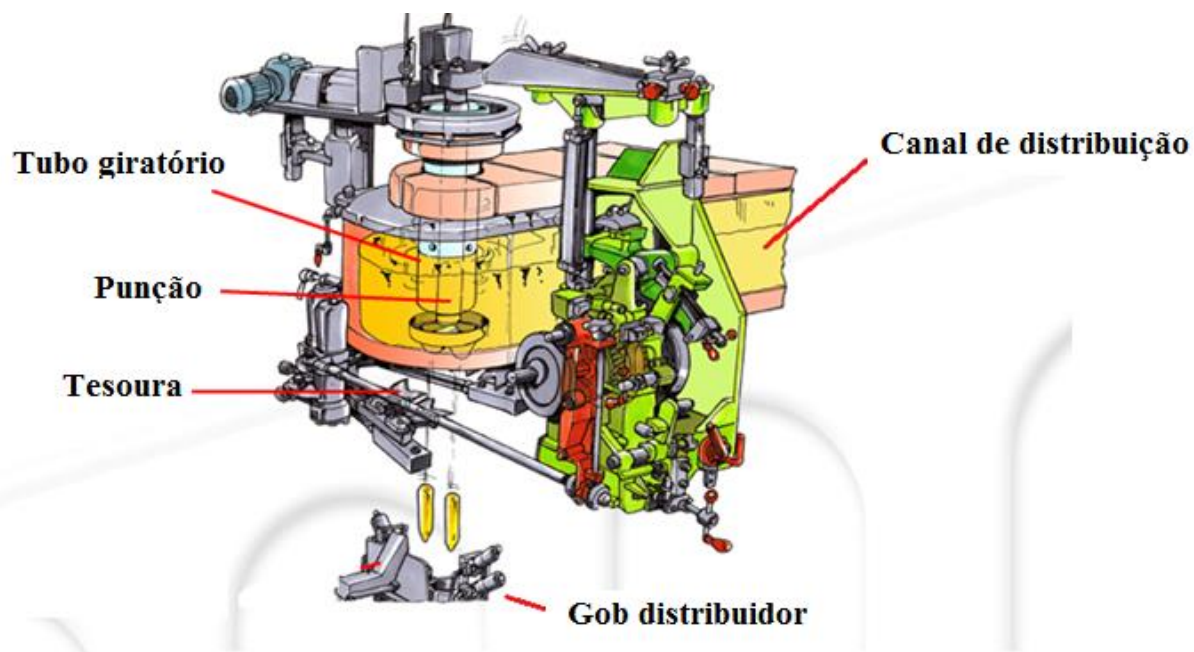


Figura 1 – Principais componentes do *feeder*

O mecanismo *feeder* possui três componentes principais, que possuem funções específicas e que devem ser ajustados para a produção de diferentes artigos:

- O tubo giratório – mecanismo utilizado para homogeneizar a temperatura do vidro proveniente do canal de distribuição³ e que permite o ajuste do peso das gotas de vidro a partir de sua vazão;
- Os punções – mecanismos cuja função é a formação de um filete de vidro líquido na parte inferior do *feeder*. Ele também permite a regulação da velocidade de produção e da forma das gotas.
Podem existir de 1 a 4 punções dentro de um mesmo *feeder* em função do número de artigos que são produzidos simultaneamente nas seções máquina IS.
- A tesoura – mecanismo responsável pelo corte do filete de vidro criado pelos punções para formação das gotas. Deve ser regulado para garantir que as gotas caiam sempre na vertical e ajustado juntamente com os punções para garantir a forma adequada das gotas de vidro.

2.2.2 Gob Distribuidor

Logo após a saída das gotas de vidro do *feeder*, elas entram no Gob distribuidor (Figura 2), cuja principal função é transportá-las de forma adequada à máquina IS. Seus principais componentes são:

- O interceptor – mecanismo cuja função é impedir a entrada da gota de vidro no Gob distribuidor durante operações de manutenção ou por questões de segurança.
- As colheres – mecanismo que direciona as gotas de vidro às seções na posição de carregamento da máquina IS. Esse mecanismo pode servir de 6 a 12 seções ao mesmo tempo.
- Intermediário e defletor – duas estruturas fixas que recebem a gota de vidro das colheres e as conduzem ao lado bloco da máquina IS.

³ O canal de distribuição é a estrutura que transporta o vidro líquido do forno aos múltiplos *feeders*

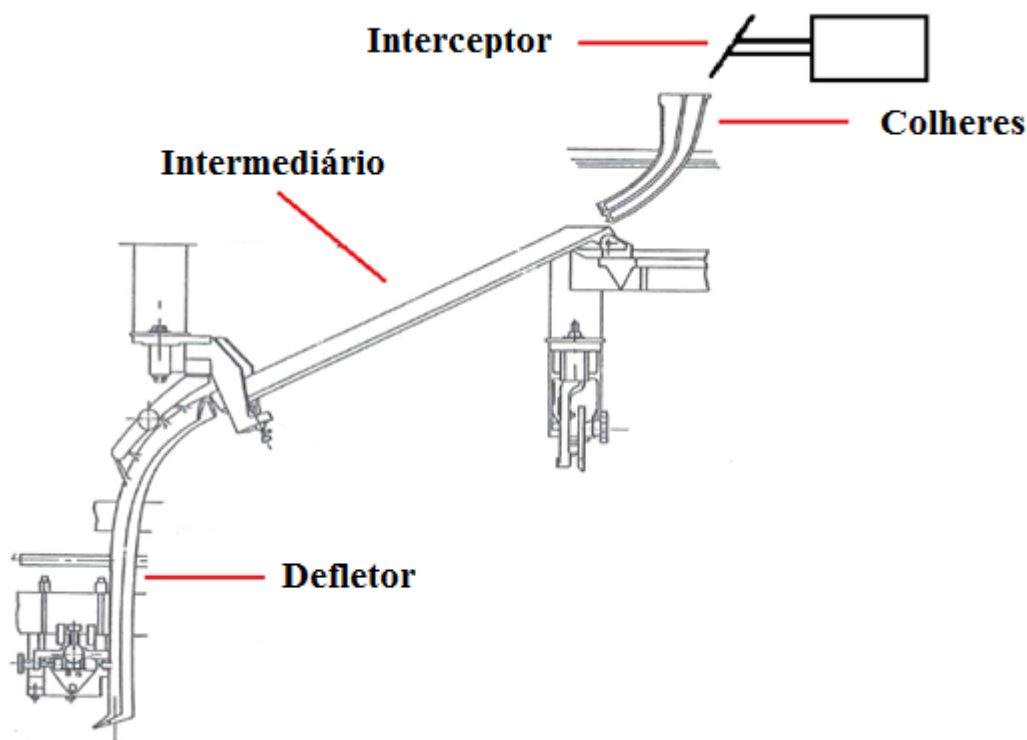


Figura 2 – Principais componentes do Gob distribuidor

2.2.3 Máquina IS

A máquina IS é o principal equipamento da área quente. Ela é quem realiza a transformação das gotas de vidro em garrafas ou potes, conseqüentemente é o equipamento mais complexo em termos de mecanismos e processos. Ainda botando em evidência sua importância para o projeto, ela é responsável pelo consumo cerca de 85% de todo ar comprimido utilizado pela área quente.

Para uma boa compreensão desse equipamento, todos os seus processos serão descritos na continuação deste texto na ordem que eles são realizados dentro dessa máquina.

2.2.3.1 O lado bloco

A máquina IS normalmente é dividida em lado bloco e em lado forma. O primeiro é o lado onde a recepção da gota de vidro e a formação de uma pré-forma do artigo, chamada parison, são realizadas. O segundo é onde a forma final do artigo é obtida.

No lado bloco, a primeira operação que é realizada é o carregamento, na qual a gota de vidro é recebida dentro do molde do bloco, que determinará a forma da

parison. Em seguida a formação do parison terá início, porém existem dois métodos diferentes para sua formação, que são escolhidos em função do tipo de artigo a ser produzido: o soprado-soprado e o prensado-soprado.

2.2.3.2 Soprado-Soprado

Este é o método mais utilizado para a conformação do parison, e é baseado na utilização do ar comprimido para a fabricação do pré-molde de garrafas (potes não são produzidos utilizando esse método). Sua principal vantagem em relação ao prensado-soprado é sua robustez em relação à regulagem dos parâmetros de produção, ou seja, a faixa de valores aceitos para os parâmetros de produção que limitam a quantidade de defeitos nos artigos é maior que para o caso do prensado-soprado, e em consequência o número de artigos defeituosos costuma ser menor.

Para esse método de produção as seguintes etapas são realizadas após a etapa de carregamento:

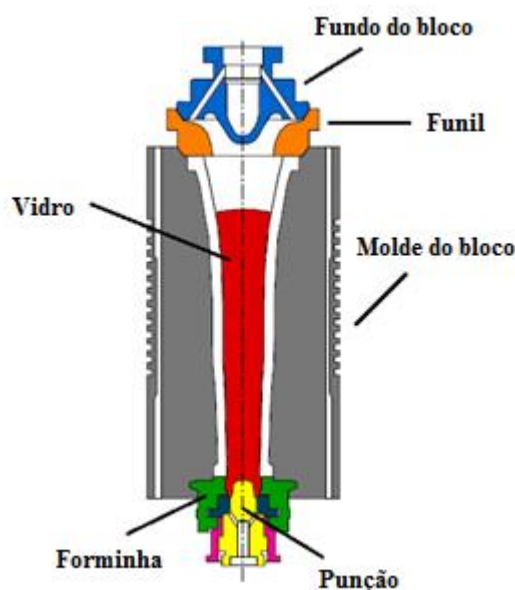


Figura 3 – Disposição das peças durante a compressão

- Compressão (Figura 3): essa etapa tem início com a descida do fundo do bloco sobre o funil, em seguida injeta-se ar comprimido a uma pressão que varia de 2 a 3 bar na cavidade em contato com o fundo do bloco, o que comprime o vidro líquido contra o molde do gargalo

(conhecido como forminha), minimizando a presença de defeitos nesta região da garrafa.

- Assopro do parison (Figura 4): essa etapa ocorre logo após a compressão e é nela que a conformação do parison é feita. Ela tem início com a subida do fundo do bloco, o que permite a retirada do funil. Ao mesmo tempo o punção (também conhecido como pino) vai descer, desbloqueando assim suas saídas de ar comprimido chegando a configuração da esquerda da Figura 4. Em seguida o fundo do bloco vai descer diretamente sobre o molde do bloco e o ar comprimido será injetado pelo punção, criando uma bolha de ar dentro do vidro e o forçando a tomar a forma do molde do bloco (configuração da direita da Figura 4).

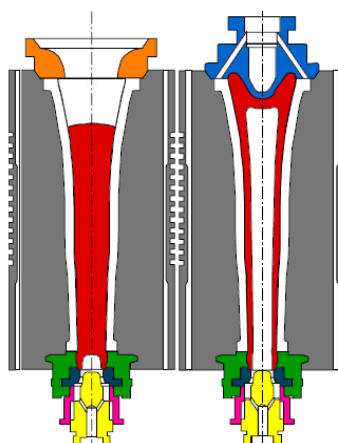


Figura 4 – Configurações das peças durante o assopro do parison

Passadas essas duas etapas o parison está formado e o processo de fabricação volta a ser comum para o soprado-soprado e o prensado-soprado, logo vamos explicar o método prensado-soprado antes de continuar a descrição dos processos realizados dentro da máquina IS.

2.2.3.3 Prensado soprado

Este método de conformação do parison tem a vantagem de possibilitar a fabricação não só de potes de vidro, mas também de garrafas mais leves, porém, como consequência da utilização desse método, os ajustes das máquinas IS se tomam mais complicados, o que pode levar a um maior número de artigos defeituosos.

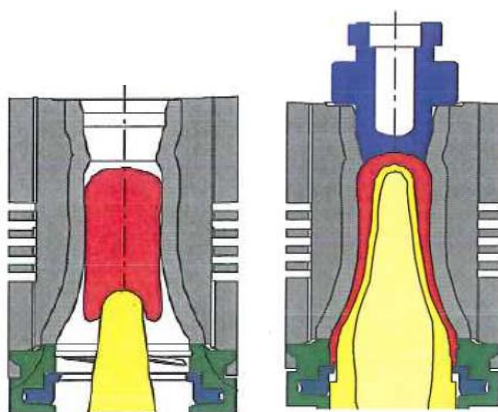


Figura 5 – Configuração das peças durante a prensagem

Como pode ser visto na Figura 5, o prensado-soprado usa um punção mais longo que o soprado-soprado e a partir do uso desse punção o parison é formado. Nesse caso, a operação que ocorre logo após o carregamento é a prensagem, ilustrada na Figura 5. Ela se inicia com a descida do fundo do bloco diretamente sobre o molde do bloco, seguida da subida do punção, que pressiona o vidro contra as paredes do molde do bloco, formando assim o parison. Ao contrário do soprado-soprado, nesse processo o gargalo é a última região a ser formada.

Uma vez que o parison foi formado, ele é transportado para o lado chamado lado forma.

2.2.3.4 O lado forma

O lado forma é onde a forma final do artigo é obtida. As operações dessa região da máquina IS são iniciadas pelo transporte do parison do lado bloco para esse lado. Essa é a função do processo chamado inversão.

A inversão se inicia pela abertura do molde do bloco, em seguida um mecanismo conduz o parison do lado bloco ao lado forma, como ilustrado na Figura 6, e após ocorre o fechamento do molde da forma. Enfim, a abertura da forminha é realizada, o que possibilita o retorno do mecanismo da inversão ao lado bloco, processo conhecido como reversão.

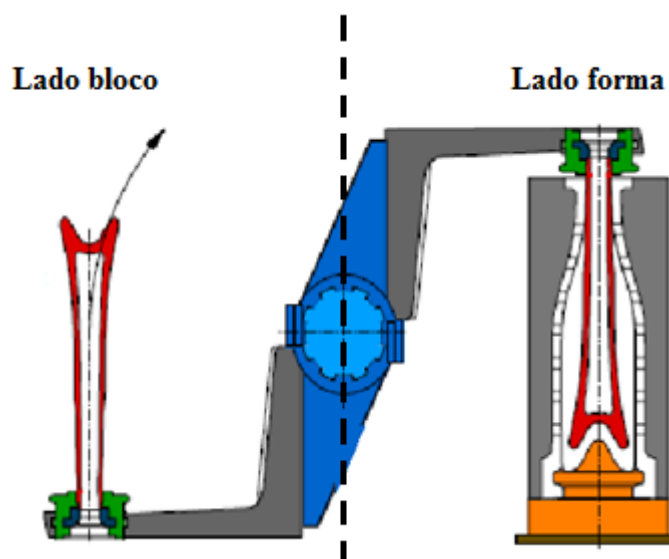


Figura 6 – Esquemática da inversão

A operação que sucede a inversão, é a principal do lado forma e é chamada assopro final. Essa operação é ilustrada pela Figura 7 e tem início com a descida da cabeça de assopro sobre o molde da forma. A cabeça de assopro possui um tubo em seu interior pelo qual o ar comprimido será ejetado dentro do parison, pressionando, assim, o vidro contra as paredes do molde da forma e contra o fundo da forma, o que permite a obtenção da forma final do artigo, esse é o assopro final.

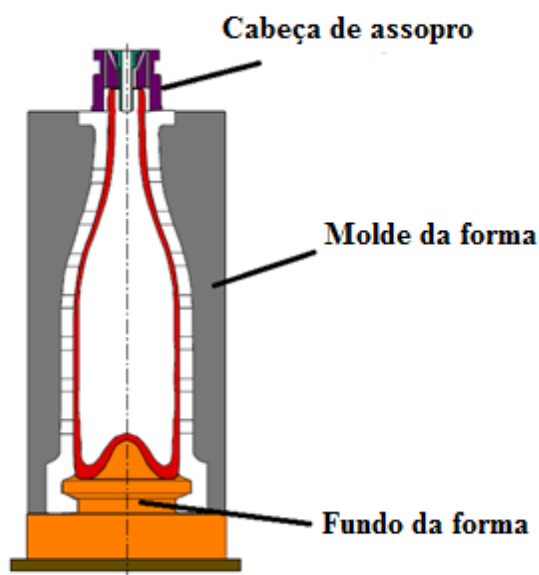


Figura 7 – Disposição das peças durante o assopro final

A cabeça de assopro possui também pequenos furos em torno de toda sua circunferência. Esses furos tem a função de permitir a realização de uma outra

operação do lado forma chamada resfriamento do gargalo, que é realizada simultaneamente ao assopro final. Ela consiste na injeção de ar comprimido pelos pequenos furos da cabeça de assopro, para diminuição da temperatura do gargalo e evitar que a elevada pressão interior do artigo, consequente do assopro final, o deforme.

Ao fim do assopro final, é dado início à última operação da máquina IS, a extração. Essa operação é iniciada pela saída da cabeça de assopro, seguida da abertura do molde da forma e da entrada de um mecanismo chamado *take out*, na qual suas pinças agarram o gargalo do produto, em seguida esse mecanismo transfere o artigo para a placa de repouso, onde ele é resfriado para uma temperatura de em média 500° C, antes ser levado à esteira pelos empurradores.

2.2.4 Esteira

A esteira é o último mecanismo da área quente por onde o produto passa, sua função é transportá-lo das máquinas IS à archa de recozimento, onde os artigos são esquentados à uma temperatura de em média 550 °C e resfriados bem lentamente a uma temperatura de em média 100°C.

Dentro do trajeto que o artigo faz sobre a esteira, os primeiros controles de qualidade são feitos, seja por um sensor laser, seja por um aparelho chamado XPAR. O resultado desse controle de qualidade é que todos os produtos que possuem algum defeito de conformação são descartados por pequenos bocais de ar comprimido.

Em seguida, os artigos passam por um tratamento de superfície, chamado tratamento a quente, no qual uma camada de oxido metálico é depositada sobre a superfície do vidro com o objetivo de reforçá-la e criar uma boa aderência para o tratamento de superfície que será realizado na área fria.

Enfim o produto chega à archa de recozimento, que é uma etapa muito importante para a qualidade do produto, pois de um lado ela reduz as tensões residuais resultantes do processo de conformação e por outro lado evita a reaparição dessas tensões, que podem fragilizar os artigos, durante seu resfriamento.

2.3 Área Fria

As funções e processos da área fria serão explicadas resumidamente nessa seção, pois ela não faz parte do trabalho que foi desenvolvido nesse projeto.

Assim que o produto sai da archa de recozimento ele passa pelo tratamento a frio, evocado na seção anterior, que tem os objetivos de aumentar a resistência dos produtos aos arranhões e de preparar sua superfície para a colagem de etiquetas e decorações.

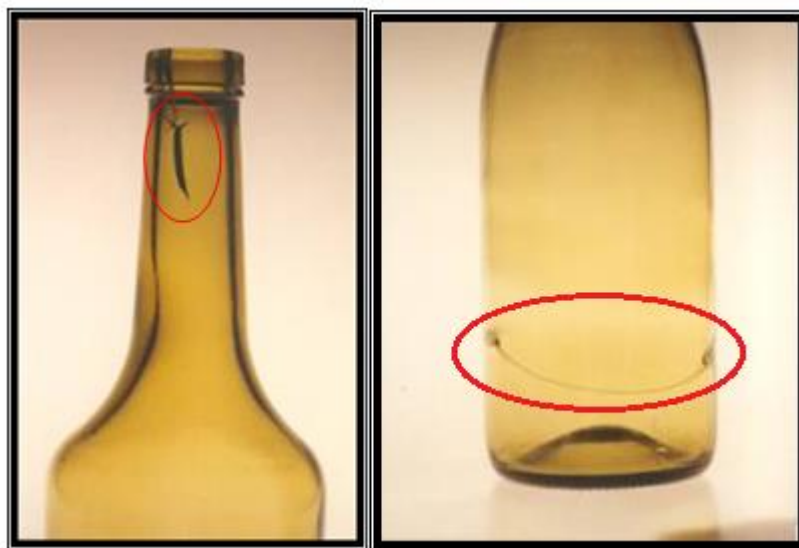


Figura 8 – Exemplos de artigos defeituosos

Em seguida os artigos vão passar por uma série de controles automáticos e manuais para tentar identificar a presença de defeitos que pedem uma mudança nos ajustes da área quente além de descartar todos os artigos defeituosos (Figura 8). Alguns exemplos desses controles são: o controle visual de operários, o controle automático do diâmetro interior do gargalo, o controle da resistência a pressão interna e a choque térmico e o controle manual da qualidade de superfície dos artigos.

Enfim, também é realizado automaticamente na área quente o empilhamento e empacotamento dos artigos, o que resulta em pacotes como o mostrado na Figura 9.



Figura 9 – Configuração da saída de artigos da área fria (Vie de l'exploitation, 2014)

3 MEDIDAS DO CONSUMO DE AR COMPRIMIDO NA ÁREA QUENTE

Para a validação final e parcial dos modelos desenvolvidos e apresentados nesse trabalho, e em alguns pontos para sua complementação, medidas realizadas e fornecidas pela empresa Verallia foram utilizadas. De modo geral elas podem ser categorizadas em dois grupos: medidas de operações individuais e medidas do consumo global da linha de produção.

3.1 Medidas de consumo global da linha de produção

A categoria que será tratada primeiramente nesse trabalho é a que se refere as medidas do consumo global da linha de produção, pois seus equipamentos são utilizados, eventualmente, para efetuar medidas de operações individuais, logo seu conhecimento será necessário para uma boa compreensão da próxima categoria.

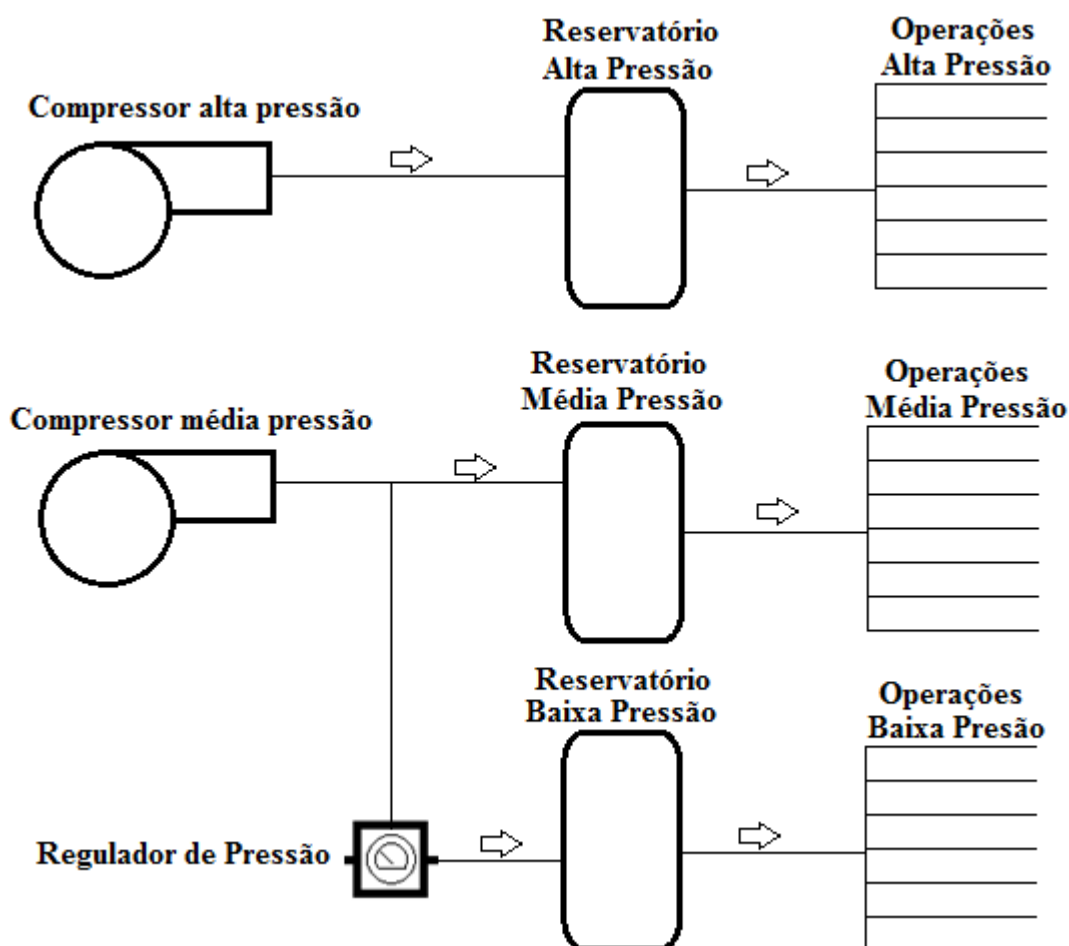


Figura 10 – Representação da rede de ar comprimido de uma linha de produção

Uma linha de produção de embalagens de vidro geralmente precisa de 3 níveis de pressão diferentes para seu funcionamento, logo cada linha de produção está ligada

a 3 reservatórios de ar comprimido. Isso se deve ao fato que os diversos equipamentos presentes na área quente não trabalham de forma ótima na mesma faixa de pressão.

Os níveis de pressão dos reservatórios variam de uma usina para a outra, porém o intervalo dessa variação é de 2,1 à 2,5 bar nos reservatórios de baixa pressão, de 3,1 a 3,5 bar nos reservatórios de média pressão e de 5 a 7 bar nos reservatórios de alta pressão.

Os reservatórios são alimentados por dois compressores, como mostrado na Figura 10. Um compressor produz ar comprimido a alta pressão e é usado para alimentar somente o reservatório de alta pressão. O outro compressor produz ar comprimido a média pressão e alimenta diretamente o reservatório média pressão, além de alimentar o reservatório baixa pressão através de um regulador de pressão.

As medidas de consumo global são realizadas para cada uma das redes pressão, ou seja, para cada linha existem três medidas de consumo. E sua obtenção é efetuada a partir de um captor instalado em uma região onde existem condutos retos com mais de 2 metros de comprimento, localizados entre o reservatório de pressão e ramificação do tubo principal para as diversas operações. Essa especificação do comprimento de conduto reto está ligada ao princípio de funcionamento do captor e às suas exigências para medidas de boa qualidade.

O tipo de captor utilizado pela empresa para realização dessas medidas é um VPFlowScope (VAN PUTTEN INSTRUMENTS, 2011), produzido pela empresa VP Instruments. Esse captor é capaz de medir o fluxo mássico, a temperatura e a pressão do ar que passa por ele com uma precisão de 2% após calibrado.

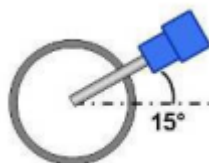


Figura 11 – Ilustração do ângulo de instalação exigido pelo captor (VAN PUTTEN INSTRUMENTS, 2011)

Entre os principais cuidados de instalação desse aparelho estão o ângulo do captor com a horizontal (Figura 11), que deve ser de pelo menos 15°, o ângulo do captor com a superfície do tubo, que deve ser de $90^\circ \pm 3^\circ$, e, como já citado, o comprimento reto do tubo no qual ele será instalado, todos que foram bem levados em

conta e obedecidos na realização das medidas apresentadas nesse trabalho. Quanto a calibração do equipamento, ela é feita anualmente pelo próprio fabricante.

Um exemplo de medidas globais do consumo de ar comprimido realizadas com esse equipamento é mostrado na Figura 12.

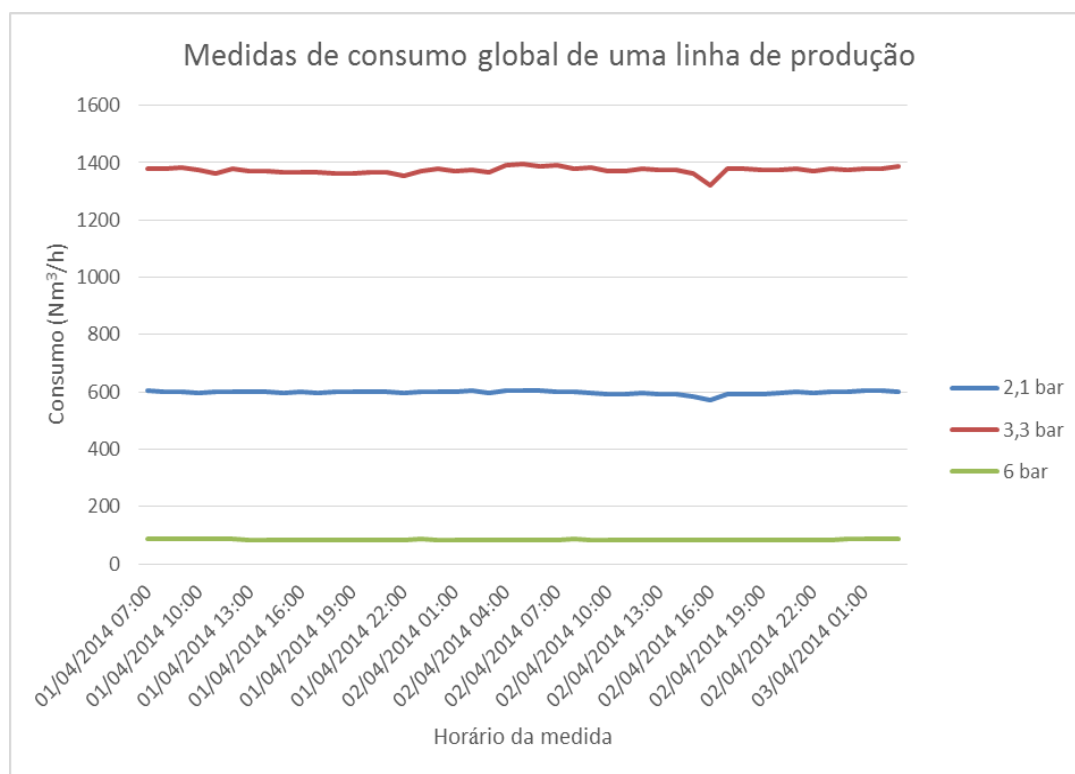


Figura 12 – Exemplo de medidas globais de ar comprimido

As medidas de consumo global foram utilizadas nesse trabalho principalmente como base de comparação para avaliar a qualidade dos resultados finais do programa desenvolvido. Contudo através da análise dessas medidas algumas conclusões importantes para a evolução do trabalho puderam ser obtidas:

- Como mostrados na Figura 13, pode-se observar que não é possível prever o consumo das linhas de produção apenas através da análise das medidas em função dos principais parâmetros de produção (velocidade de produção e massa dos artigos);
- Algumas usinas tem o consumo até duas vezes maior que o de outras produzindo artigos similares (Figura 14), o que foi atribuído principalmente a diferença no nível de vazamento de cada uma dessas empresas, pois as usinas onde a manutenção é melhor o consumo é inferior;

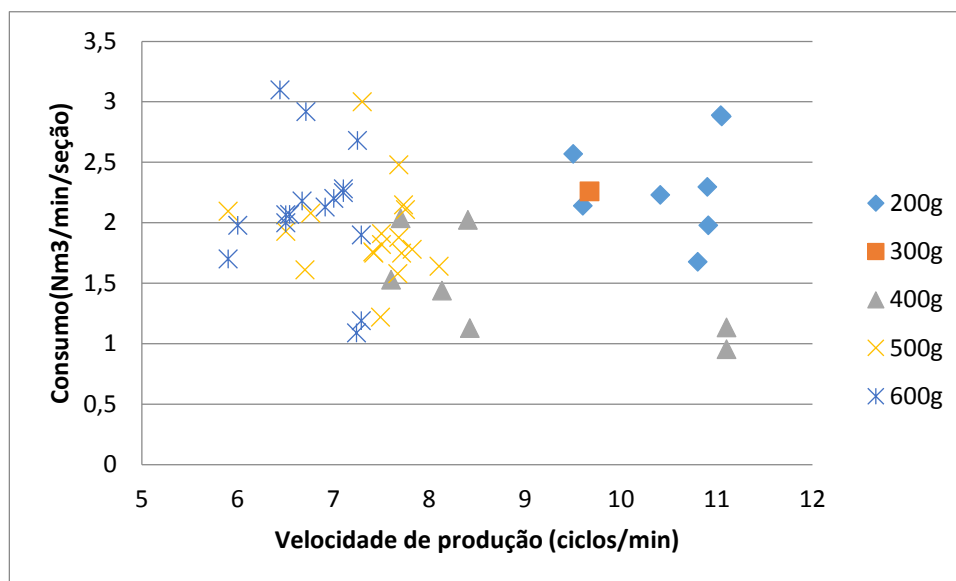


Figura 13 – Representação das medidas de consumo global em função da velocidade de produção e da massa do artigo

- Os vazamentos da linha de produção são bem mais pronunciados quando a massa do artigo é superior (o que corresponde a velocidades de produção menores), pois, como observado na Figura 14, quando a massa do artigo é inferior o consumo das usinas com pouco e muito vazamento tendem ao mesmo valor, mas quando a massa do artigo aumenta o consumo começa a se tornar bastante distinto.

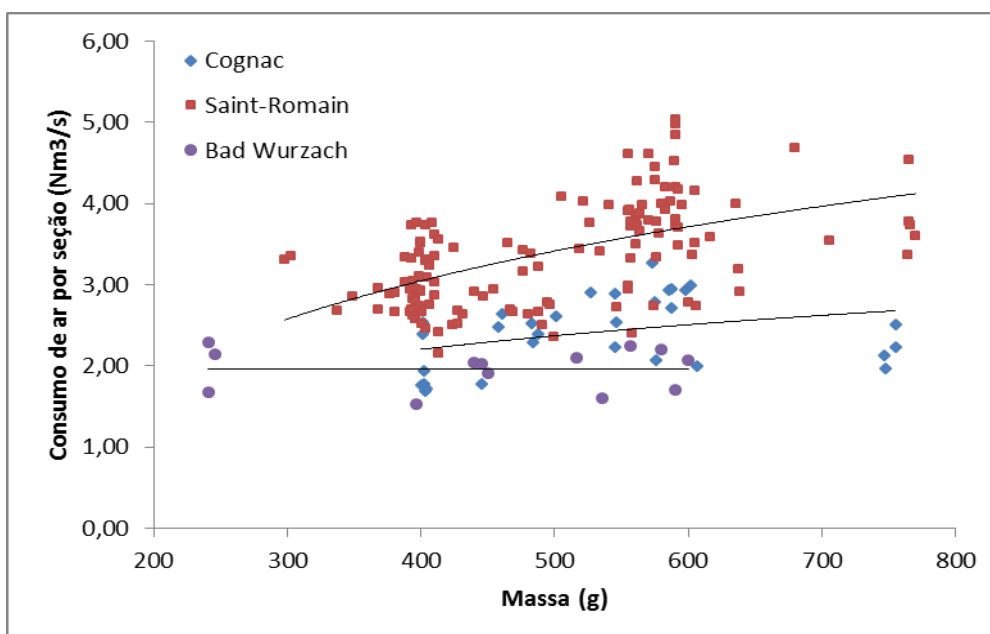


Figura 14 – Consumo das linhas de produção em três usinas diferentes

3.2 Medidas de operações individuais

Para a realização das medidas de operações individuais dois métodos foram utilizados. Um primeiro que consiste na montagem da operação a ser medida em uma bancada de testes e um segundo que se baseia no monitoramento da variação das medidas globais quando uma determinada operação é parada.

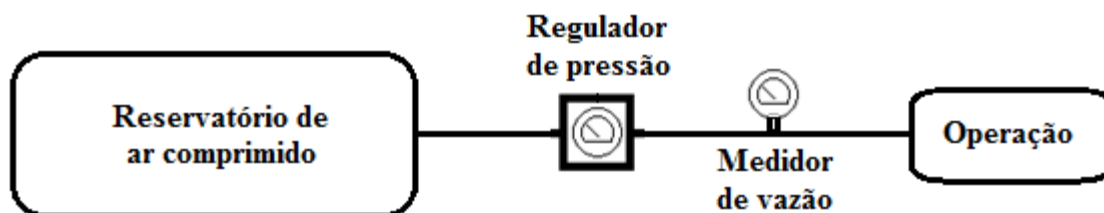


Figura 15 – Esquema da montagem da bancada de medidas

A bancada utilizada no primeiro método (Figura 15) é constituída por um reservatório de ar comprimido, por um regulador que permite modificar o nível de pressão de entrada no equipamento, por um medidor de vazão e por um suporte onde os equipamentos da operação são montados.

O medidor de vazão empregado nesse caso foi um medidor dimensionado para a medição de vazão de ar comprimido a 4 bar de pressão, porém seu manual contém uma tabela de conversão da vazão para outros níveis de pressão, e como a pressão do ar é sempre conhecida devido ao regular de pressão, a vazão mássica poder ser corrigida para qualquer medida realizada. A Figura 16 mostra um exemplo de medida realizada nessa bancada (o eixo horizontal é a pressão em bar e o eixo vertical é a vazão em Nm^3/h), assim como a correção que deve ser efetuada para pressões diferentes de 4 bar.

O segundo método é usado principalmente para avaliar operações que não podem ser montadas sobre a bancada de testes ou quando não se tem acesso a bancada (caso de usinas não situadas na França). Ele consiste em colocar a linha de produção para funcionar em vazio, ou seja, sem alimentação de vidro, monitorar o consumo de ar comprimido medido pelos medidores de vazão globais e em seguida fechar a válvula de alimentação de ar comprimido de uma operação específica, por exemplo o assopro final. Esse fechamento causa uma queda brusca nas medidas de uma rede de pressão específica, e calculando a diferença de consumo antes e depois da queda obtém-se o consumo da operação cuja válvula foi fechada.

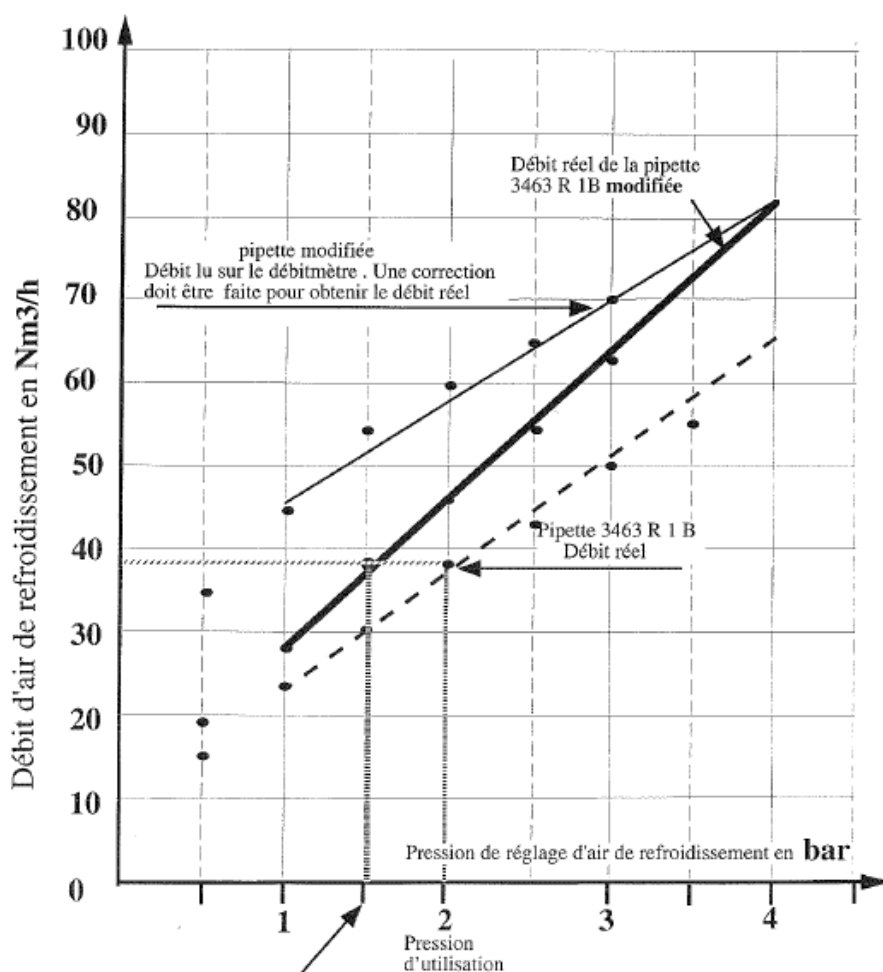


Figura 16 – Exemplo de medida realizada na bancada de testes⁴ (CLEMENT, 1997)

A Figura 17 mostra um a aplicação desse método para avaliar o consumo de diversas operações, onde cada número representa o fechamento de uma operação diferente, o eixo horizontal é o horário da medida e o eixo vertical é a vazão de ar comprimido da linha de produção dividido pelo seu número de sessões.

Esse segundo método é relativamente menos confiável para avaliar o consumo de ar de uma operação que o primeiro, pois ele não garante que apenas o consumo da operação está sendo aferido, também podem estar englobados nessas medidas fenômenos como vazamentos. Contudo em vários casos ele é o único método que pode ser utilizado para medição.

⁴ A linha pontilhada representa a vazão real do bocal testado antes de modificações geométricas, a linha cheia fina mostra a vazão medida na bancada desse bocal após uma modificação para aumentar sua vazão, e a linha cheia grossa mostra a vazão do bocal modificado medida na bancada após a correção que deve ser realizada por causa do nível de pressão diferente de 4bars.

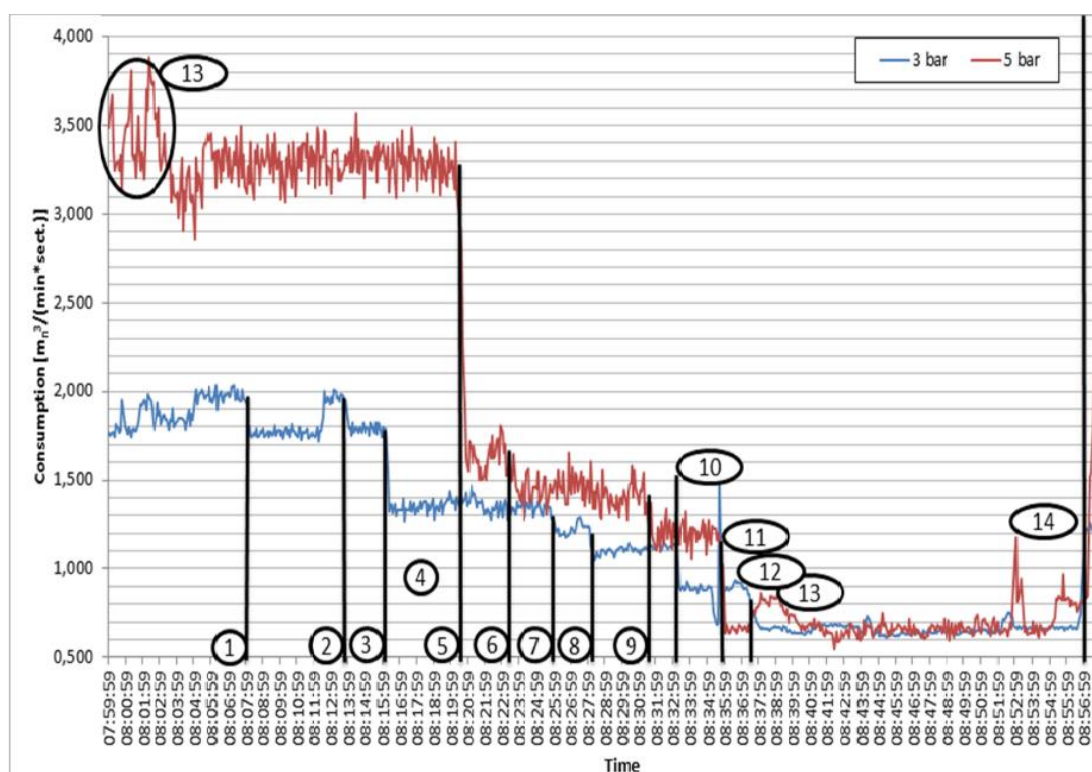


Figura 17 – Exemplo de medida realizada com o segundo método de medidas individuais (FLEURY, 2013)

As medidas de operações individuais foram utilizadas nesse projeto principalmente para avaliar a qualidade e a coerência dos submodelos desenvolvidos no seu decorrer, como é mostrado no capítulo 10 desse trabalho.

4 IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DA ÁREA QUENTE

A primeira etapa do desenvolvimento desse projeto foi a identificação dos mecanismos que precisam de ar comprimido para seu funcionamento, seguida da definição de uma área quente teórica, necessária pois na realidade existem alguns equipamentos utilizados apenas em algumas fábricas, outros que vem sendo substituídos por equipamentos elétricos e existem ainda diversas empresas que produzem esses equipamentos, o que gera algumas diferenças entre eles.

Para a análise de quais equipamentos tem seu funcionamento baseado na utilização de ar comprimido os planos pneumáticos de algumas fábricas francesas da empresa Verallia foram analisados, e algumas inspeções presenciais para entrevistar os operários também foram realizadas na usina de Chalon-sur-Saône na França.

Tradicionalmente os equipamentos consumidores de ar comprimido da área quente são classificados em quatro categorias⁵ baseado na função que o ar comprimido desempenha em cada um dos mecanismos. Essa classificação foi adotada nesse projeto para facilitar a comparação dos resultados com valores indicados pelos fabricantes dos equipamentos quando possível. Essas categorias são:

- *Operating air* (Tabela 1) – é o conjunto de mecanismos da máquina IS que utiliza o ar comprimido como base para seu movimento, ou seja, equipamentos com funcionamento baseado em cilindros pneumáticos. Ex.: mecanismos para abertura do molde do bloco, subida da cabeça de assopro e inversão.
- *Forming air* ou *process air* (Tabela 2) – é o conjunto de mecanismos que utiliza o ar comprimido diretamente para a conformação e resfriamento dos artigos. Ex.: mecanismo para assopro final, assopro do parison e resfriamento do gargalo.
- *Upstream air* (Tabela 2) – é o conjunto de mecanismo que utiliza o ar comprimido para formar e conduzir a gota de vidro as máquinas IS. Ex.: resfriamento do tubo giratório, extensão e retração do interceptor.

⁵ A nomenclatura dessas categorias não tem tradução oficial para o português, logo a nomenclatura original (inglesa) será adotada.

- *Ware handling air* (Tabela 2) - é o conjunto de mecanismo que utiliza o ar comprimido para selecionar e transportar os artigos até a archa de recozimento.

Uma vez que todos os mecanismos consumidores de ar comprimido foram identificados e alocados em suas respectivas categorias, foi necessário eliminar os equipamentos que não pertencem a área quente teórica, que foi definida com base nas linhas de montagem existentes atualmente (2014) em diversas fábricas da empresa Verallia. O resultado final desse processo é mostrado nas Tabela 1 e Tabela 2, onde são mostradas todas operações que consomem ar comprimido e que pertencem a área quente teórica.

Tabela 1 – operações pertencentes à categoria *operating air*

Operações da categoria <i>Operating air</i>		
Fechamento do molde do bloco	Abertura da forminha	Entrada do <i>take out</i>
Abertura do molde do bloco	Fechamento do molde da forma	Saída do <i>take out</i>
Descida do funil	Abertura do molde da forma	Repouso do <i>take out</i>
Descida do fundo do bloco	Acionamento da ventilação esquerda da forma	Subida do timble
Subida do fundo do bloco	Acionamento da ventilação direita da forma	Subida do punção
Acionamento da ventilação esquerda do bloco	Descida da cabeça de assopro	Descida do punção
Acionamento da ventilação direita do bloco	Subida da cabeça de assopro	Fechamento das pinças
Inversão	Abertura do <i>vertiflow</i>	
Reversão	Fechamento do <i>vertiflow</i>	

Na Tabela 1, pode-se observar que várias das operações do *operating air* foram listadas duas vezes (abertura/fechamento, subida/descida), isso foi feito pois nesses

casos embora o mecanismo seja o mesmo⁶, muitas vezes a quantidade de ar utilizada em um sentido é diferente da quantidade no outro sentido.

Tabela 2 – operações das categorias forming, upstream e ware handling air

<i>Forming air</i>	<i>Upstream air</i>	<i>Ware handling air</i>
Compressão	Resfriamento do tubo giratório	Guia de ar
Assopro do parison	Barreira de fumaça	Bocais de ejeção
Resfriamento do punção	Pulverização das tesouras	Acionamento da placa de repouso
Resfriamento do fundo do bloco	Pulverização das colheres	
Assopro final	Pulverização do interceptor	
Resfriamento do gargalo	Extensão do interceptor	
Resfriamento do fundo da forma		

⁶ São mecanismo baseados em um pistão pneumático do tipo duplo efeito.

5 NÍVEL PADRÃO DE PRESSÃO DAS OPERAÇÕES

Um último aspecto que foi analisado antes do início da modelagem propriamente dita das operações de produção de embalagens em vidro é os estabelecimentos de níveis de pressão padrão para essas operações.

Cada operação pode operar em um intervalo de pressão bastante largo, entre 1 bar e 3 bar para o assopro final. Isso se deve a existência de dois conceitos distintos para pressão de uma operação: sua pressão de alimentação e sua pressão de utilização.

A pressão de alimentação representa a pressão do reservatório pelo qual a operação é alimentada, que, como explicado no capítulo 3, pode ser de alta, média ou baixa pressão, entretanto os mecanismos de produção normalmente não usam diretamente essa pressão. Como mostrado na Figura 18 parte dos mecanismos possui um regulador de pressão no circuito que os liga ao reservatório de pressão, o que permite ajustar e otimizar a pressão da operação para cada artigo que está sendo produzido. Essa pressão ajustada no regulador é a chamada pressão de utilização.

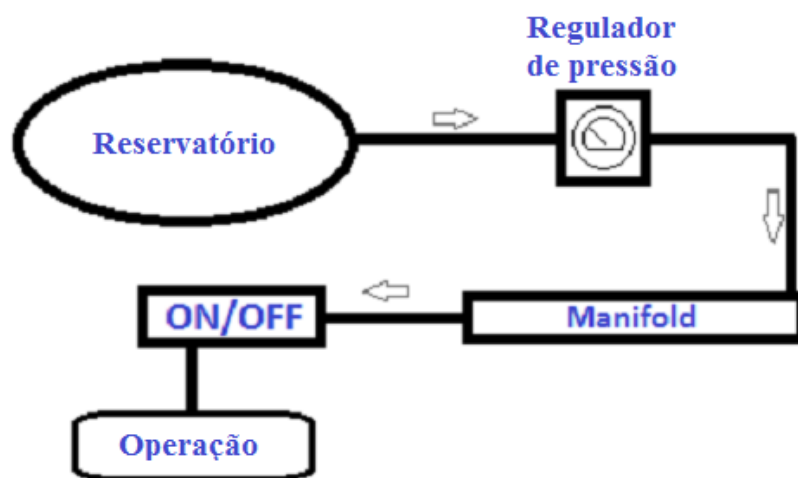


Figura 18 – Circuito pneumático padrão que liga o reservatório a um mecanismo da máquina IS

A pressão de alimentação das operações é utilizada no desenvolvimento desse trabalho para identificar a qual reservatório o consumo calculado é ligado, o que permite a comparação entre os resultados do modelo com as medidas globais obtidas, visto que elas são fornecidas para rede de pressão.

A avaliação desse tipo de pressão é relativamente simples, pois elas são as mesmas para a maioria das linhas de produção, mesmo de diferentes usinas. Logo para essas operações bastou a realização de uma análise dos planos pneumáticos do lado

quente da empresa Verallia e, para algumas operações particulares, visitas à usina de Chalon-sur-Saône para catalogar a pressão de alimentação de quase todos mecanismos estudados nesse trabalho.

Para as quatro operações (inversão/reversão, fechamento do bloco, compressão e resfriamento do punção) que variam de uma usina para a outra foi adicionado no programa um campo onde o usuário deve preencher o valor da pressão de alimentação.

Em relação a pressão de utilização, seu valor é em grande parte dos casos igual ao valor da pressão de alimentação, contudo existe uma dezena de casos para os quais essa afirmação não se verifica. Para esses casos, após a análise de uma grande quantidade de planos de fabricação⁷ da empresa Verallia, foi estabelecida uma pressão padrão de fabricação de todos artigos e também foram adicionados campos no programa onde o usuário pode especificar esses valores, ignorando os valores padrão.

⁷ Um plano de fabricação é um documento existente para cada artigo produzido onde todos os ajustes da pressão e da duração de cada uma das operações da máquina IS são detalhados.

6 APRESENTAÇÃO DO MODELO GLOBAL

Como explicado sucintamente na introdução desse trabalho, o objetivo desse projeto é o desenvolvimento de um modelo teórico que calcule uma boa estimativa da quantidade de ar comprimido necessária para fabricação de diversos tipos diferentes de embalagens de vidro.

O método usado para atingir esse objetivo foi a criação de uma espécie de programa em excel que dê uma série de resultados em função de alguns parâmetros de entrada que o utilizador deve preencher (Figura 19). Assim o programa possui duas planilhas acessíveis ao utilizador (Interface e Advanced), nas quais ele pode entrar os parâmetros para o cálculo e modificar alguns valores default e hipóteses do modelo, e possui mais 7 planilhas acessíveis ao desenvolvedor onde as equações dos modelos e os dados de base das operações são armazenados.

Como mostrado na Figura 19, os dados de entrada do modelo, acessíveis na planilha Interface, são a quantidade de máquinas IS presentes na linha (*Machines quantity*), o número de artigos que são formados por seção⁸ da máquina IS (*Gobs per section*), a quantidade de seções por máquina IS (*Sections per machine*), o tipo de processo (*Process type*), que deve ser escolhido entre soprado-soprado, prensado-soprado abertura estreita (garrafas) e prensado-soprado abertura larga (potes), a velocidade de produção de cada seção da máquina IS (*Cycles/min*), o peso do artigo (*Article weight*) e o volume do artigo (*Article volume*). E como resultado dos cálculos realizados pelo programa é obtido o consumo de ar comprimido total, separado por rede de pressão⁹ e por categoria de consumo, apresentados em consumo total e em consumo por seção.

⁸ Uma seção é uma parte da máquina IS capaz de realizar todas as operações da conformação de um artigo. A máquina IS é apenas um conjunto dessas seções trabalhando juntas para aumentar a produtividade e é constituída normalmente por 6 a 12 seções.

⁹ Normalmente, nas fábricas de embalagens de vidro existem reservatórios com três níveis de pressão diferentes para a operação de todos seus equipamentos: um a 2,1 bar, um a 3,2 bar e um entre 5 bar e 7 bar em função da escolha da fábrica.

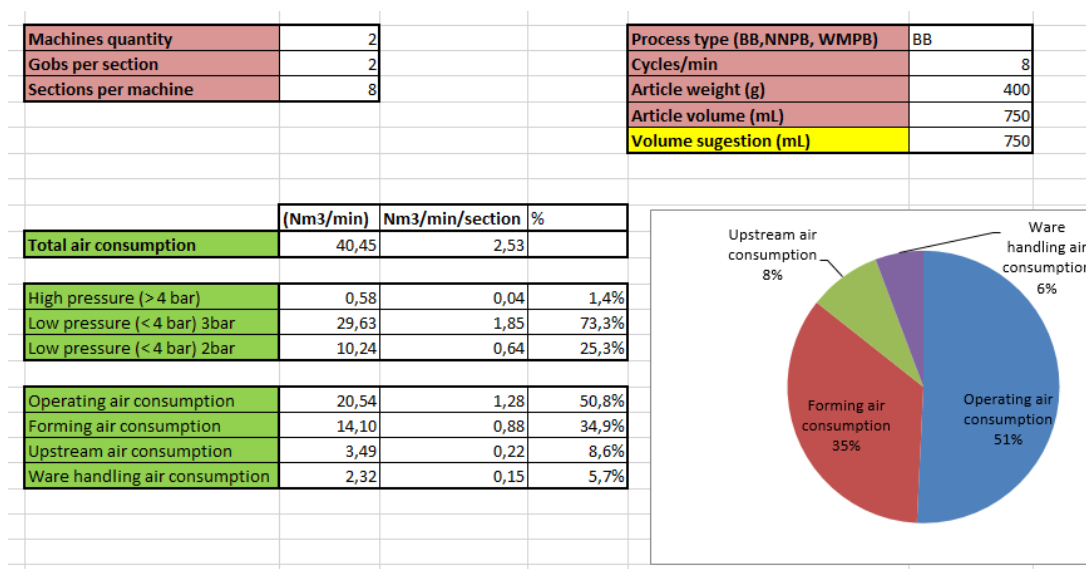


Figura 19 –Planilha Interface do programa desenvolvido

Os cálculos realizados nas 7 planilhas que são inacessíveis para o utilizador são baseados numa série de modelos diferentes. Como a quantidade de mecanismos e operações a serem modeladas é bastante elevada foram criados grupos de mecanismos com o funcionamento similar e um método de modelagem foi utilizado para cada um desses grupos. Para que os cálculos do programa fossem mais compreensíveis para os utilizadores, a regra para a criação dos modelos é que eles seriam o mais simples possível desde que seus resultados fossem aceitáveis.

7 MODELO DE CILINDROS PNEUMÁTICOS

O primeiro grupo criado foi o de mecanismos com o funcionamento baseado em cilindros pneumáticos. O modelo desenvolvido para esse mecanismo consiste no cálculo da quantidade de ar comprimido necessária para deslocar o pistão dentro do cilindro, ou seja, para gerar o movimento do mecanismo. Considera-se que o intervalo de tempo entre ativação e desativação do mecanismo é longo o suficiente para que a pressão interior do cilindro se estabilize e não é levado em conta a existência de vazamentos.

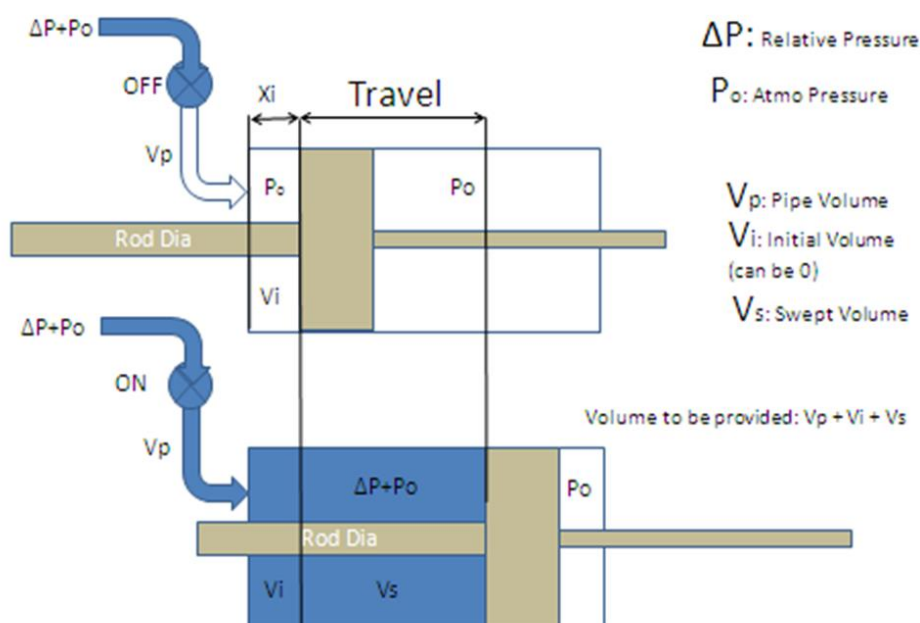


Figura 20 – Esquema do modelo de cilindros pneumáticos (NICOLAS, 2013)

A Figura 20 ilustra de maneira simplificada como o cálculo é realizado. Na região superior da figura pode-se observar a situação inicial do equipamento, a válvula de acionamento está fechada, a pressão interior do cilindro e do tubo que o liga a válvula é P_0 (pressão atmosférica) e o pistão se encontra na sua posição inicial (a X_i de distância da base do cilindro). E na região inferior da figura está representado a posição final do equipamento (após o movimento), a válvula de acionamento está aberta, o pistão se deslocou uma distância X_s e tanto a parte esquerda do cilindro quanto o tubo que o liga a válvula estão preenchidos por ar comprimido a uma pressão relativa ΔP , logo o volume de ar comprimido necessário para a realização do

movimento (volume de ativação) é o volume do tubo (V_p) adicionado ao volume inicial do cilindro (V_i) e ao volume do deslocamento do pistão (V_s).

O cálculo do volume do tubo entre a válvula e o pistão é dado simplesmente pela formula do volume de um cilindro, onde D_p é o diâmetro do tubo e L_p é seu comprimento:

$$V_p = \frac{\pi D_p^2 L_p}{4} \quad (1)$$

O cálculo do volume inicial do cilindro é dado pelo volume do cilindro subtraído do volume do eixo do pistão no comprimento X_i :

$$V_i = \frac{\pi(D_c^2 - D_e^2)X_i}{4} \quad (2)$$

E o cálculo do volume do deslocamento do pistão é dado pela mesma formula do volume inicial, apenas substituindo o comprimento X_i por X_s :

$$V_i = \frac{\pi(D_c^2 - D_e^2)X_s}{4} \quad (3)$$

Uma vez que o volume de ativação do mecanismo foi calculado, ele deve ser convertido para uma unidade padrão de volume que leva em conta o nível de pressão interior do cilindro – Nm^3 , que é a unidade utilizada industrialmente para a medida de vazão mássica. Para realizar essa conversão a seguinte formula deve ser utilizada:

$$V_N = V_a \frac{(P_0 + \Delta P) T_0}{P_0 T_a} \quad (4)$$

Onde:

- V_N é o volume em Nm^3 ;
- V_a é o volume de ativação calculado (m^3);
- P_0 é a pressão atmosférica (Pa)
- ΔP é a pressão de utilização do mecanismo (Pa)
- T_0 é a temperatura padrão em K (288 K)
- T_a é a temperatura do ar no interior do pistão em K (considerado 288K em todos mecanismos)

Feita a conversão, o modelo nos permite calcular o consumo ideal por ciclo das operações baseadas em cilindros pneumáticos, bastando apenas identificar as pressões de utilização de cada um deles e suas dimensões. Para obter o consumo em fluxo de ar

comprimido (Nm^3/min) basta multiplicar o valor encontrado pela velocidade de operação da seção, que é um dado de entrada do programa.

7.1 Obtenção das dimensões dos diversos cilindros pneumáticos

Como citado no parágrafo anterior, para a implementação do modelo de cilindro pneumáticos no modelo global, é necessário obter as dimensões dos cilindros e pistões de todas as operações representadas por esse modelo.

A maior dificuldade para isso é o fato que para cada fabricante de máquinas IS as dimensões desses equipamentos variam um pouco, e diferenças são notadas mesmo entre máquinas do mesmo fabricante, porém de gerações diferentes. Para tentar contornar esse problema, a dimensão da maior parte dos mecanismos foi retirada do fabricante GPS, que é o fabricante pertencente ao grupo Saint-Gobain, ao qual a empresa Verallia pertence, pois de acordo com o diretor do centro técnico internacional, Jean-Marc Nicolas, essas dimensões correspondem bem as dimensões médias de todos fabricantes de máquinas IS.

Para os cilindros pneumáticos da fabricante GPS, uma lista com as dimensões de boa parte das operações (cerca de 80%) já estava disponível na empresa devido a um trabalho de medidas realizada, há alguns anos (NICOLAS, 2013), nas máquinas desse fabricante. Quanto, aos 20% das operações que ainda não possuíam as dimensões, um estudo foi realizado em Chalon-sur-Saône para obtê-las com base em planos e medidas diretas de equipamentos de máquinas IS dos fabricantes Ehmart e Bottero, únicos disponíveis nessa usina.

7.2 Implementação de um modelo de vazamentos

Como um dos objetivos do programa que foi desenvolvido é prever o consumo real de uma máquina IS para auxiliar no dimensionamento de compressores para novas usinas, foi necessário a implementação de um modelo de vazamentos no modelo de cilindros pneumáticos, que de acordo medidas comparativas realizadas em diversas usinas da empresa Verallia, podem representar até 50% do consumo total nesses mecanismos.

Tendo em mente que um trabalho de formatura poderia ser dedicado inteiramente a criação de um bom modelo de vazamentos para cilindros pneumáticos e que o objetivo do trabalho aqui desenvolvido tem um caráter mais geral, um modelo

bastante simplificado foi utilizado para a previsão do consumo de ar comprimido devido a esse fenômeno.

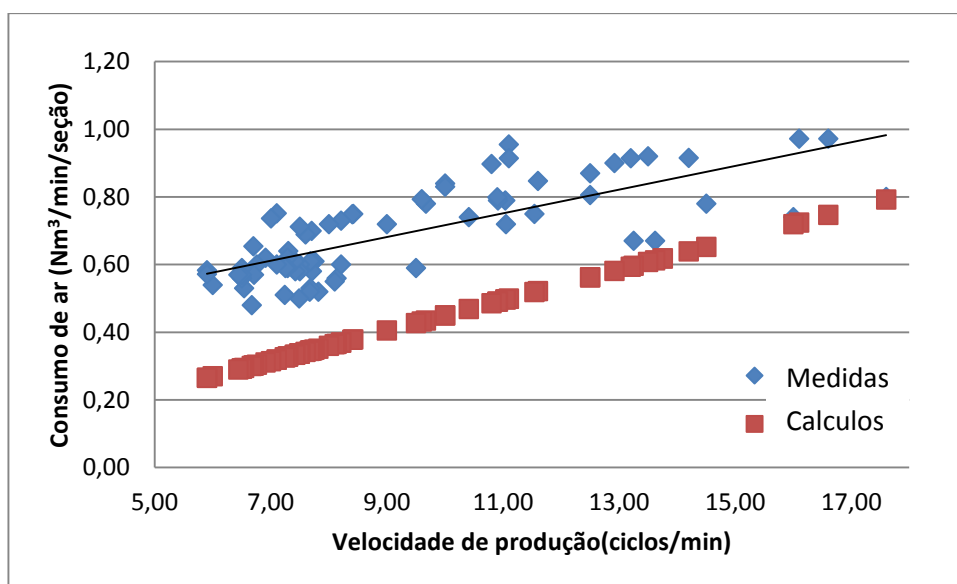


Figura 21 – Comparação entre medidas globais e cálculos do modelo sem vazamento para a rede de baixa pressão

Sabe-se que as operações baseadas em cilindro pneumáticos são únicas que utilizam a rede de ar comprimido a baixa pressão (2,1 bars) para seu funcionamento, embora parte dessas operações utilizem a rede a média pressão. Logo para avaliar o nível de vazamento das operações que trabalham a baixa pressão, uma comparação entre o resultado do modelo de cilindros sem vazamento, apresentado anteriormente nesse capítulo, e medidas globais realizadas sobre a rede de baixa pressão foi efetuada (Figura 21) e o que pôde ser observado é que, supondo que a diferença entre os resultados do modelo e as medidas pode ser totalmente atribuída a vazamentos, esse fenômeno varia entre 20 e 50% do consumo total dos cilindros pneumáticos e que quanto maior a velocidade de produção menor é seu efeito.

Usando um segundo gráfico (Figura 22), que mostra diretamente a diferença entre os valores medidos e os valores calculados sem vazamentos, pode-se fazer uma análise ainda mais detalhada: existe uma dispersão importante entre os valores medidos (até 70% do valor da média), o que pode ser explicado em parte pelo fato diversos produtos podem ser produzidos a uma mesma velocidade, ou seja, os níveis de pressão das operações podem ser diferentes levando a consumos diferentes, mas provavelmente a maior parte dessa dispersão é associada ao fato de que essas medidas

são provenientes de linhas diferentes, e a diferença de idade e da qualidade de manutenção dessas linhas pode gerar vazamentos muito intensos em alguns casos e pouco acentuados em outros.

Então para criar um modelo de vazamento que represente bem e de forma simples tanto linhas mais recentes quanto linha mais antigas e com bom ou ruim nível manutenção, criou-se um modelo com 3 níveis de vazamentos, o qual é representado por 3 retas:

- A reta de vazamento médio (preta), que foi obtida por regressão linear da diferença entre as medidas e os resultados do modelo sem fugas (Figura 22);
- A reta de vazamento baixo (verde), que foi obtida através de uma translação da reta média de modo que ela passasse sobre os pontos mínimos da Figura 22;
- E a reta de vazamento alto (vermelha), que foi obtida através de uma translação da reta média de modo que ela passasse sobre os pontos máximos da Figura 22.

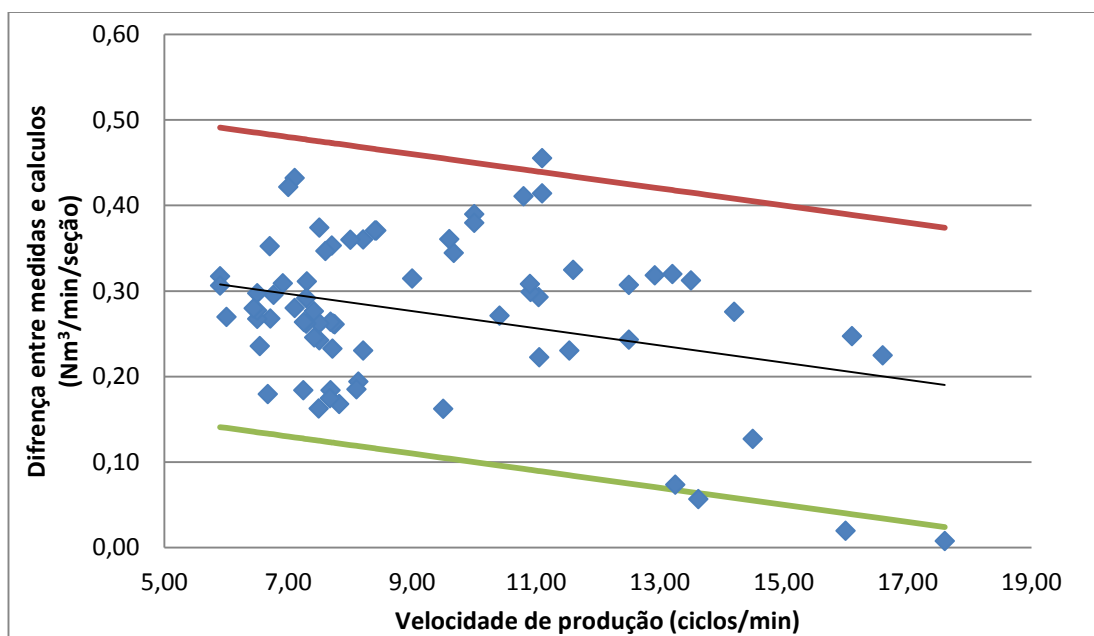


Figura 22 – Os três níveis de vazamentos do modelo

Em relação aos cilindros pneumáticos que operam em 3,2 bar, não se pode aplicar a mesma metodologia, pois as medidas globais de média pressão incorporam o

consumo de uma série de outros mecanismos, como os pertencentes ao *forming air* e *upstraim air*.

Então para avaliar os vazamentos nesse caso utilizou-se as retas obtidas para a baixa pressão e multiplicou-se os valores por um fator relativo ao aumento de pressão. Para isso considerou-se que o ar proveniente dos vazamentos dos cilindros de baixa pressão sai a velocidade do som (Mach 1) a partir das folgas e dos defeitos dos cilindros, então como a velocidade de saída do ar não poderia aumentar com o aumento da pressão (folgas/defeitos bloqueados) o aumento da vazão mássica é proporcional apenas ao aumento da densidade do ar na cavidade, que é proporcional ao aumento da pressão no cilindro. Logo o fator utilizado para multiplicar as retas estabelecidas a baixa pressão para avaliar os vazamentos a média pressão foi 4,2 bar (absolutos) dividido por 3,1 bar (absolutos) que corresponde a 1,35.

8 MODELO DE ENXIMENTO DE RECEPIENTES

Um outro grupo de operações similares que foi criado é o de mecanismos baseados no enchimento de uma cavidade com ar comprimido. Esse grupo é constituído por apenas 3 operações: compressão, assopro do parison e primeira etapa do assopro final¹⁰.

O modelo desenvolvido para esse grupo de operações é bastante similar ao modelo de pistões, com a diferença que ao invés de calcular o volume necessário para preencher o cilindro com ar comprimido, deve-se calcular o volume necessário para preencher a cavidade da operação com ar comprimido (regiões vermelhas da Figura 23).

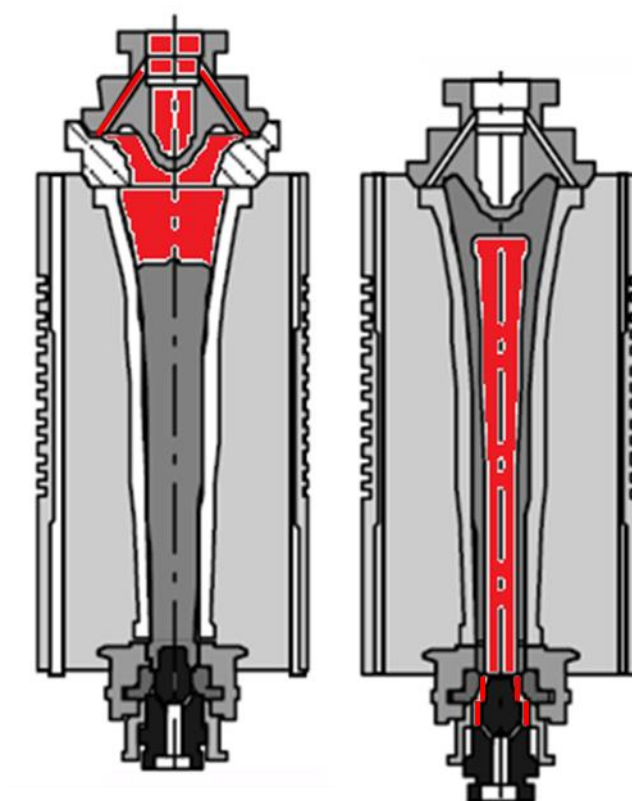


Figura 23 – Cavidades que devem ser preenchidas nas operações de compressão e assopro do parison

¹⁰ Para a modelagem do assopro final ele foi dividido em duas etapas, a primeira que consiste apenas no enchimento do vidro para moldá-lo na forma do artigo e a segunda que se refere ao resfriamento do artigo já formado dentro dos moldes.

O cálculo do volume das cavidades foi feito através da análise dos principais planos das peças utilizadas durante cada operação. Em seguida uma função linear foi introduzida para representar o consumo de cada operação em função do volume do artigo a ser produzido.

Nesse modelo admite-se que não existe vazamentos de ar pelas juntas das diversas peças utilizadas durante as operações, o que pode não ser verdadeiro para peças muito desgastadas ou quando a pressão de utilização da operação está além do valor máximo de projeto. Mas como essas não são as condições usuais de operação, e não existem medidas disponíveis para a criação de um modelo simples como feito para os modelos de cilindros, um modelo de vazamentos não foi desenvolvido.

9 GRUPO DE OPERAÇÕES BASEADAS NO ESCOAMENTO DE AR COMPRIMIDO

O último grupo de operações similares criado para o reagrupamento de todas operações do lado quente do processo de fabricação de embalagens de vidro é o grupo que se baseia no escoamento de ar para atmosfera. Esse grupo é composto pela maior parte das operações do *forming air e ware handling air*, e para criação de seus modelos foi necessário calcular/estimar duas grandezas: o fluxo mássico de ar durante o funcionamento do mecanismo e o tempo de funcionamento de cada mecanismo.

9.1 Estimativa do tempo de operação do mecanismo

Para a estimativa do tempo de operação de cada mecanismo uma análise de dados foi realizada sobre uma média de 50 artigos de diversos pesos, volumes e velocidades de produção, produzidos em usinas francesas e italianas da empresa Verallia. Essa análise consistiu em verificar o tempo de funcionamento de um ciclo de cada processo do grupo de operações baseadas em escoamento para cada um dos artigos e encontrar uma maneira de relacionar esse tempo de funcionamento com o seu volume, seu peso ou sua velocidade de produção.

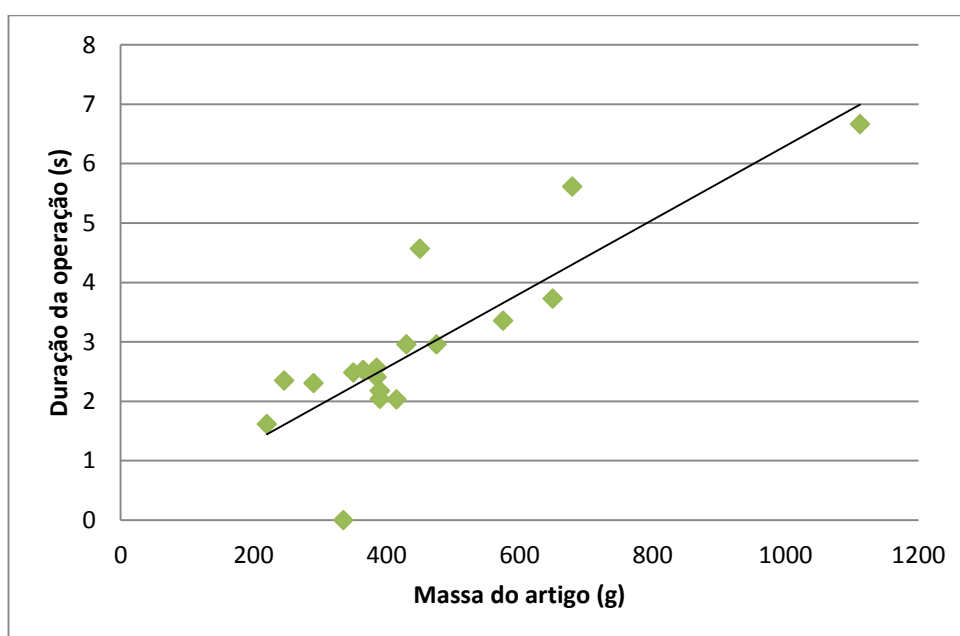


Figura 24 – Exemplo de uma correlação tempo x massa do artigo

De um modo geral a melhor correlação era obtida quando o tempo de funcionamento era descrito em função do peso do artigo (Figura 24), o que faz sentido visto que a maior parte das operações estudadas são ligadas ao resfriamento do artigo

e que quanto maior a massa a ser resfriada maior é o tempo necessário para resfriá-la. Porém em alguns casos, como o do resfriamento do punção do processo soprado-soprado, a melhor correlação encontrada foi com o volume do artigo e em outros casos como o das pulverizações não existia nenhuma correlação viável, o que nos levou a adotar um valor médio como o valor fixo para o tempo da operação.

9.2 Cálculo do fluxo de ar durante o funcionamento do mecanismo

Como o objetivo do desenvolvimento dos modelos desse trabalho é a obtenção de estimativas representativas das operações a partir da metodologia mais simples possível, foram utilizados ao total três métodos distintos para calcular o fluxo de ar do grupo de operações tratado nesse capítulo:

- Escoamento compressível isentrópico: o método mais simples e utilizado para o maior número de operações;
- Escoamento de Fanno: um método um pouco mais complexo que o anterior e utilizado para as operações que não obtiveram um bom resultado com o escoamento isentrópico;
- Cálculos CFD: um método bastante complexo, que exige bastante tempo para a obtenção de bons resultados, cuja utilização foi necessária para algumas operações com o escoamento muito complexo para um cálculo analítico.

9.2.1 Modelo de escoamento compressível isentrópico

O modelo de escoamento compressível isentrópico é bastante conhecido na literatura e é geralmente introduzido como o modelo mais simples para o escoamento de fluido compressíveis. Ele se baseia nos princípios de conservação de massa, conservação da quantidade de movimento sem atrito e conservação da energia, além de empregar as hipóteses de regime permanente, escoamento unidimensional e adiabático, e fluido de estudo representado como um gás perfeito. As equações resultantes desse modelo estão apresentadas abaixo (SHAPIRO, 1953).

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) M^2 \quad (5)$$

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) M^2\right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (6)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) M^2 \right]^{\frac{1}{k-1}} \quad (7)$$

Onde:

- M é o número de Mach;
- k é a razão de calores específicos;
- T é a temperatura do fluido e T₀ é a temperatura de estagnação do fluido;
- P é a pressão do fluido e P₀ é a pressão de estagnação do fluido;
- ρ é a densidade do fluido e ρ₀ é a densidade de estagnação do fluido.

Tabela 3 – Operações modeladas usando escoamento isentrópico

Operações	
Pulverização do interceptor	Bocais de ejeção
Pulverização das tesouras	Barreira de fumaça
Pulverização das colheres	Guia de ar

Um modelo que representa bem as operações para as quais esse método será utilizado dentro desse trabalho (Tabela 3) é o de um reservatório a uma pressão p₀, com um pequeno furo por onde o ar comprimido escoar, conforme mostrado na Figura 25. Como esse pequeno furo é a secção mínima por onde o escoamento passa, sabe-se que o maior número de Mach admissível nele é 1, a menos que o escoamento a montante dele seja supersônico, o que não se aplica no caso estudado. Utilizando a equação 6, pode-se mostrar que a condição para que isso ocorra, usando as propriedades do ar, é que p₀ seja maior que 1,89 bar em pressão absoluta ou 0,89 bar em pressão relativa, o que é verificado para todas as operações estudadas nesse subcapítulo.

Com base nos fatos apresentados, a expressão derivada da equação 6, da condição de Mach 1 no furo e da equação da vazão mássica (equação 8) utilizada para modelar o escoamento de ar comprimido nesse modelo é a equação abaixo (equação 9).

$$\dot{m} = \rho A V \quad (8)$$

$$\dot{m} = \frac{0,5282 p_0}{\sqrt{0,8333 T_0 R}} A \sqrt{k} \quad (9)$$

Onde:

- \dot{m} é a vazão mássica;
- V é a velocidade do fluido;
- A é a área do furo pela qual o fluido deve passar;
- R é a constante dos gases.

Em resumo, os parâmetros de entrada desse modelo são a área do furo, a temperatura e a pressão de estagnação do ar no reservatório e as propriedades do ar k e R .

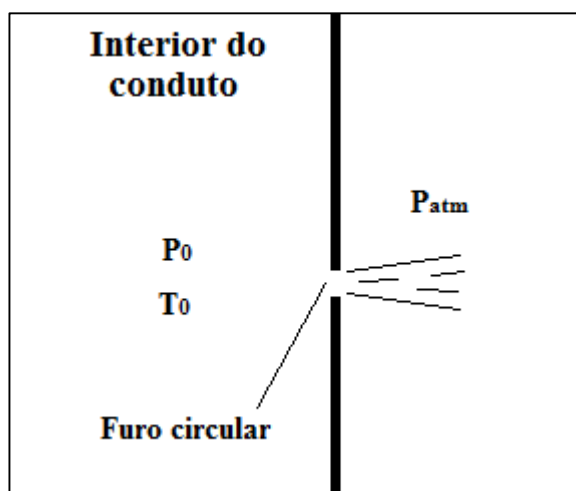


Figura 25 – Representação do modelo usado para o modelo isentrópico

Em relação as operações de pulverização, como não foi possível descobrir exatamente a proporção de óleo e ar pulverizado, e como considerou-se a modelagem do escoamento de um fluido bifásico desnecessariamente complexa para essas operações de consumo relativamente baixo, a equação 9 foi aplicada com o uso de apenas metade da área do furo real do mecanismo.

9.2.2 Modelo de escoamento de Fanno

O modelo de escoamento de Fanno é outro método bastante conhecido na literatura para a modelagem de fluidos compressíveis. Ele se baseia nas mesmas equações e hipóteses do modelo de escoamento isentrópico, com a diferença que ele também leva em conta o atrito entre as paredes do conduto e o fluido e que ele faz a hipótese adicional de que a área do conduto permanece constante no comprimento do escoamento. As equações provenientes desse modelo que foram utilizadas nesse trabalho são mostradas abaixo.

$$\frac{4 f L_{12}}{D_h} = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{M_1^2} - \frac{1}{M_2^2} \right) + \frac{k+1}{2k} \ln \left[\frac{M_1^2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_2^2 \right)}{M_2^2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right)} \right] \quad (10)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{M_2}{M_1} \sqrt{\frac{2 + (k-1)M_2^2}{2 + (k-1)M_1^2}} \quad (11)$$

Onde:

- M_1 e M_2 são os números de Mach na entrada e na saída do conduto, respectivamente;
- P_1 e P_2 são as pressões na entrada e na saída do conduto, respectivamente;
- f é o coeficiente de atrito da parede (obtido através do diagrama de Moody);
- D_h é o diâmetro hidráulico do conduto;
- L_{12} é o comprimento do conduto.

Em relação a coerência das hipóteses desse modelo com as operações na qual ele será aplicado (Tabela 4), a maioria delas representa bem a realidade, porém a hipótese de escoamento adiabático não parece muito plausível, visto que algumas dessas operações são de resfriamento das peças. Contudo devido à dificuldade em estimar a troca de calor nessas peças e ao fato que o uso dessa hipótese superestima o fluxo de ar para essas operações, o que aumenta o nível de segurança para o dimensionamento de compressores, optou-se pelo uso desse modelo ao invés de um outro que levasse em conta a troca de calor, como o escoamento de Rayleigh.

Tabela 4 – Operações modeladas usando o Modelo de Fanno

Operações	
Segunda etapa do assopro final em garrafas	Resfriamento do tubo giratório
Resfriamento do fundo do bloco	Resfriamento do punção no soprado-soprado

Enfim, para aplicar esse modelo é necessário substituir as dimensões dos condutos por onde o ar passar (L_{12} e D_h), as pressões de entrada e saída da operação, a rugosidade do tubo e o coeficiente k do ar nas equações 10 e 11 para calcular o valor de Mach na entrada do conduto. Caso a razão de pressões entre a saída e a entrada for

elevada o suficiente (esse valor varia dependendo do diâmetro e do comprimento do conduto) para que o escoamento se torne bloqueado (Mach de saída igual 1), deve-se usar a equação 12 para calcular o valor de M_1 .

$$\frac{4fL_{12}}{D_h} = \frac{1 - M_1^2}{k M_1^2} + \frac{k + 1}{2k} \ln \left[\frac{M_1^2(k + 1)}{2 + (k - 1)M_1^2} \right] \quad (12)$$

Em seguida, é possível calcular o fluxo mássico do ar na entrada do conduto usando sua temperatura de estagnação, o número de Mach e a pressão de entrada do conduto, a área do conduto e a equação 13, deduzida usando a equação 8, a equação 5 e a lei dos gases perfeitos.

$$\dot{m} = A P_1 \sqrt{\frac{k M_1^2}{T_0} \left[1 + \left(\frac{k - 1}{2} \right) M_1^2 \right]} \quad (13)$$

9.2.2.1 Acréscimo de um modelo de perda de carga

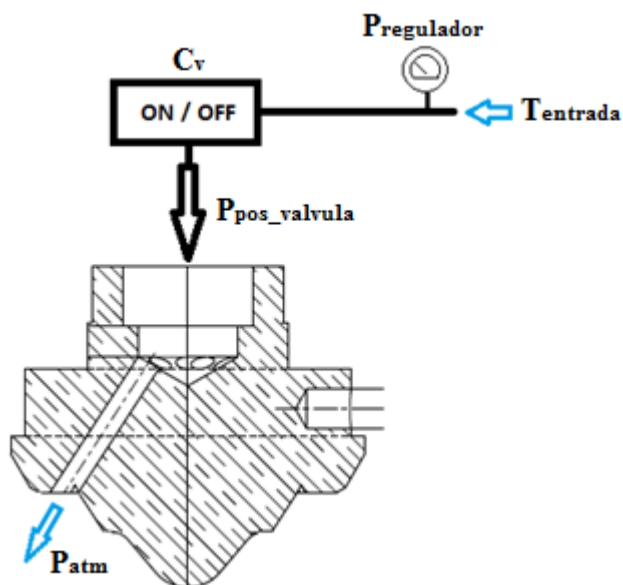


Figura 26 – Circuito pneumático completo das operações calculadas usando o modelo de Fanno

Após uma primeira aplicação desse modelo, percebeu-se que o fluxo de ar obtido era até mesmo uma ordem de grandeza acima do esperado, o que indica que algum fenômeno de grande importância não estava sendo modelado. Então, com uma nova análise completa do escoamento dessas operações como um todo, chegou-se à conclusão que o fenômeno que precisava ser incluído no modelo para melhorar seus

resultados era a perda de pressão causada pela válvula de controle da operação (ilustrada na Figura 26).

Para a inclusão desse fenômeno no modelo, foram utilizadas as equações recomendadas pelo fabricante de válvulas Swagelok, que usam um coeficiente de perda de carga conhecido como C_v para o estimar a perda de pressão em válvulas. Essas equações são apresentadas abaixo (SWAGELOK).

Para $p_2 > 0,5 p_1$:

$$q = N_2 C_v p_1 \left(1 - \frac{2 \Delta p}{3 p_1}\right) \sqrt{\frac{\Delta p}{p_1 G_g T_1}} \quad (14)$$

Para $p_2 < 0,5 p_1$:

$$q = 0,471 N_2 C_v p_1 \sqrt{\frac{1}{G_g T_1}} \quad (15)$$

Onde:

- q é a vazão de ar em Nm^3/s ,
- G_g é uma constante do gás (vale 1 para o ar);
- N_2 é uma constante de unidades (vale 0,1158 para Nm^3/s , bar e Kelvin);
- p_1 e p_2 são as pressões de entrada e saída da válvula, respectivamente;
- T_1 é a temperatura de entrada do ar na válvula;
- Δp é a diferença entre a pressão de entrada e saída da válvula.

Usando as equações 14 e 15 em conjunto com as equações 13 e 10 os parâmetros de entrada para o cálculo da vazão mássica serão: as pressões de entrada e saída da operação, a temperatura de estagnação do ar, as dimensões dos condutos, o coeficiente de perda de carga da válvula (C_v), o coeficiente de rugosidade do conduto e o coeficiente k do ar.

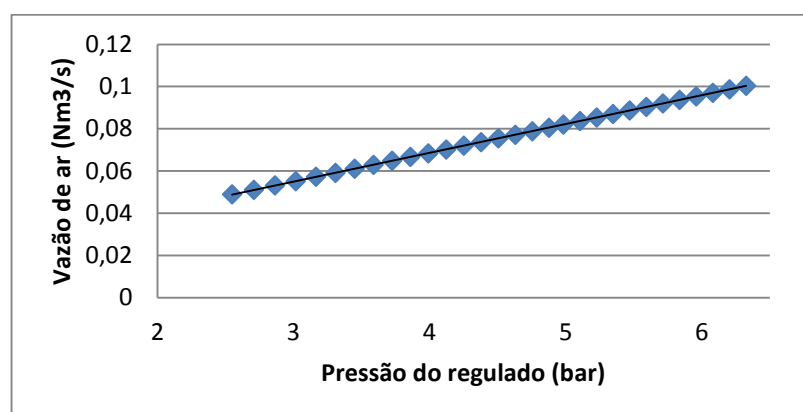


Figura 27 – Resultado do uso do modelo de Fanno acoplado com as equações de perda de carga para o resfriamento do bloco

Os resultados obtidos usando o modelo de escoamento de Fanno associado com o modelo de perda de carga descrito acima foram bem mais próximos do que se esperava em relação aos resultados sem uso de perda carga, porém devido à falta de medidas das operações calculadas não é possível fazer uma validação desse modelo. Um exemplo desse cálculo é mostrado na Figura 27.

9.2.2.2 Diagrama suplementar para a estimativa do assopro final

No que diz respeito a operação de assopro final, existe uma dificuldade suplementar para o cálculo da vazão mássica que se apresenta: o fato que pressão de entrada nos condutos, que deve ser utilizada para o cálculo, é diferente da pressão do regulador de pressão. Isso ocorre pois o valor do regulador corresponde a pressão de entrada do ar no artigo, P_m na Figura 28, e o valor que nos interessa para o cálculo usando escoamento de Fanno é a pressão na entrada dos condutos de exaustão da cabeça de assopro, P_i na Figura 28. A diferença dessas duas pressões se deve ao fato do ar precisar circular dentro do artigo e depois subir no sentido contrário a sua entrada antes ser evacuado pelos condutos da cabeça de assopro, o que gera uma grande perda de carga.

O método encontrado para determinar a pressão na entrada dos condutos de evacuação da cabeça de assopro, que possibilitou o uso do modelo de Fanno nessa operação, foi a utilização de um diagrama baseado em medidas que faz a correlação entre a pressão do regulador de pressão e a pressão interior da cabeça de assopro durante a operação do assopro final (Figura 29).

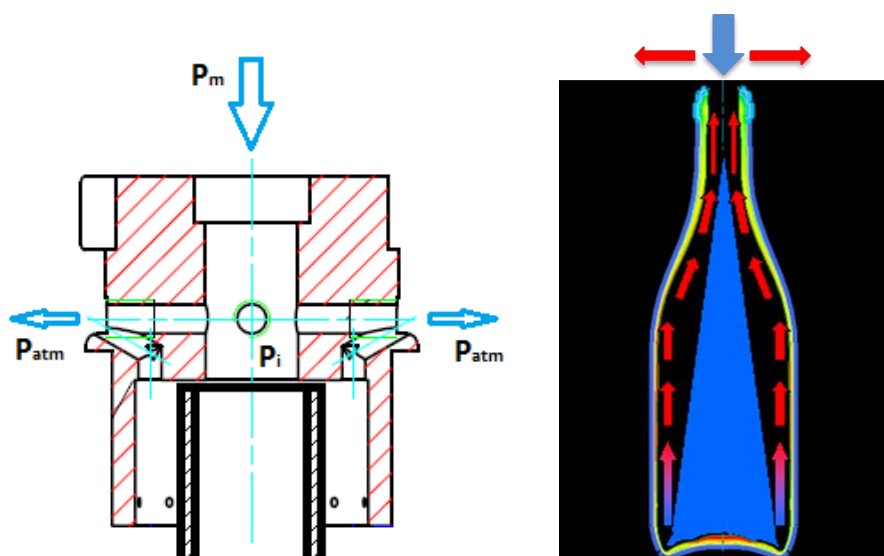


Figura 28 – Representação das pressões e fluxo de ar durante a segunda etapa do assopro final

Esse diagrama foi criado durante um estudo realizado pela empresa Dr Martin Buss & Partner para a empresa Verallia sobre a eficiência de um novo tipo de cabeça de assopro que estava sendo testada. O equipamento de medida que eles utilizaram é chamado POD100. Mais informações sobre esse estudo estão disponíveis em (DR MARTIN BUSS & PARTNER, 2004).

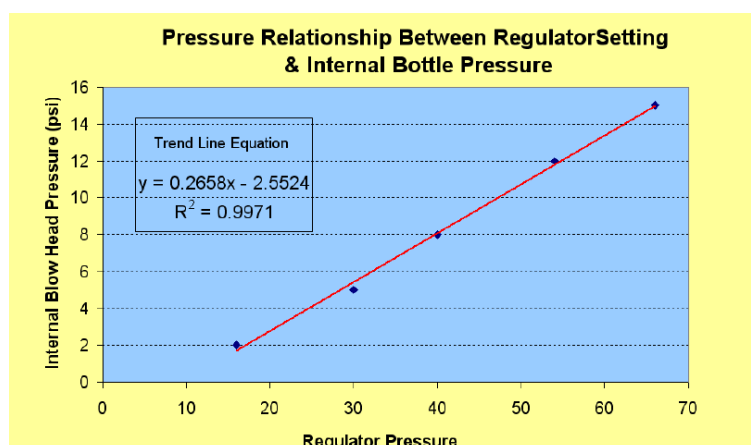


Figura 29 – Diagrama da pressão interna da cabeça de assopro em função da pressão do regulador (DR MARTIN BUSS & PARTNER, 2004)

Como a abcissa do diagrama é a pressão do regulador e não a pressão de entrada da cabeça de assopro, não será necessário acrescentar a parte do cálculo de perda de carga devido a válvula de acionamento da operação, visto que ela já está contida na transformação realizada pelo diagrama. Então para o cálculo da vazão mássica do assopro final basta substituir a equação do diagrama (convertida para bar), apresentada

abaixo (equação 16), na pressão de entrada (P_1) da equação 11, calcular M_1 e então aplicar a equação 13, também usando o valor de P_1 vindo da equação 16.

$$P_i = 0,2658 P_m - 0,1760 \quad (16)$$

Os resultados da aplicação desse método de cálculo comparados com algumas medidas disponíveis para a operação do assopro final são mostrados na Figura 30. Observa-se nessa comparação que a ordem de grandeza dos resultados é a mesma das medidas, e que para alguns pontos eles se aproximam bastante.

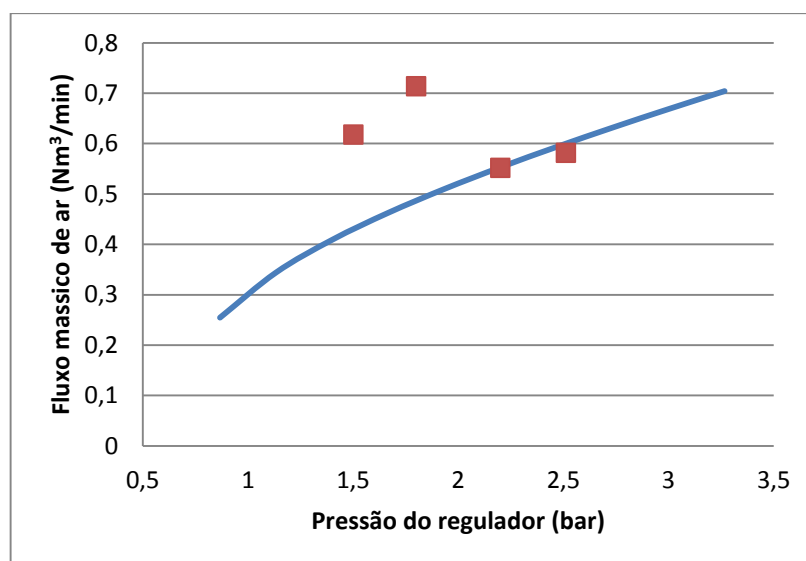


Figura 30 – Comparação entre resultados do método de Fanno e medidas para a segunda etapa do assopro final

Em relação a dispersão das medidas, os pontos mostrados são referentes a dois artigos diferentes, que provavelmente usam duas cabeças de assopro com dimensões distintas, logo uma diferença em seus fluxos mássicos não é surpreendente. E o que explicaria a proximidade dos resultados do cálculo com dois pontos das medidas e a distância mais pronunciada com os outros dois seria uma escolha das dimensões para a aplicação do cálculo mais próximas das dos pontos próximos.

9.2.3 Modelos de cálculos CFD

Os modelos de cálculos em CFD (*Computational Fluids Dynamiques*) são cálculos numéricos baseados no método dos volumes finitos que vem sendo usado cada vez mais em aplicações de engenharia e que se bem parametrizados podem produzir ótimos resultados em diversas áreas de estudo, tanto para fluidos incompressíveis quanto para fluidos compressíveis. Nesse trabalho eles foram usados

como um recurso para o cálculo da vazão mássica dentro de peças com geometrias muito complexa, nas quais os cálculos analíticos se mostravam muito complicados.

Nesse trabalho, devido a uma questão de disponibilidade de licenças, foram utilizados dois softwares para realização desses cálculos:

- O Code Saturne: Software open source desenvolvido pela empresa de energia francesa EDF utilizado na parte inicial do projeto devido a indisponibilidade de licenças de softwares comerciais;
- O Fluent: Software comercial desenvolvido pela ANSYS, utilizado no final do projeto para a simulação do assopro final em potes devido a possibilidade de realizar cálculos compressíveis com troca de calor.

9.2.3.1 Code Saturne

Esse é um software bastante respeitado na França com a capacidade para modelagem de uma grande quantidade de fenômenos, como combustão, arcs elétricos, escoamentos multifase, etc. Entre todos esses fenômenos ele também disponibiliza um módulo de cálculos para fluidos compressíveis, porém como esse módulo é relativamente novo no programa, além dele não permitir o uso de acoplamento pressão-velocidade do tipo *density based*, ele também não permite a introdução de trocas térmicas no modelo, o que acaba nos trazendo o mesmo problema encontrado com o uso do modelo de Fanno. Contudo, como esse era o único software disponível para uso nesse estágio do trabalho, preferiu-se realizar alguns cálculos e em seguida verificar se os resultados eram representativos da realidade apesar das limitações do software.

Tabela 5 – Operações modeladas usando Code Saturne

Operações	
Resfriamento do fundo da forma	Resfriamento do gargalo de garrafas
Resfriamento do punção prensado-soprado potes	Resfriamento do punção prensado-soprado garrafas

O conjunto de operações modeladas com esse software estão apresentadas na Tabela 5.

Um grande limitante para a realização dos cálculos CFD nesse trabalho foi o custo computacional dos modelos, pois o computador disponível para os cálculos, apesar de possuir configurações razoáveis, era apenas um modelo convencional de notebook. A consequência disso é que cada cálculo podia levar até 2 ou 3 dias para atingir a convergência. Logo para tentar minimizar esse custo computacional todos os modelos foram feitos usando dois planos de simetria e as malhas criadas foram as mais grosseiras possíveis que garantissem a convergência do cálculo (Figura 31).

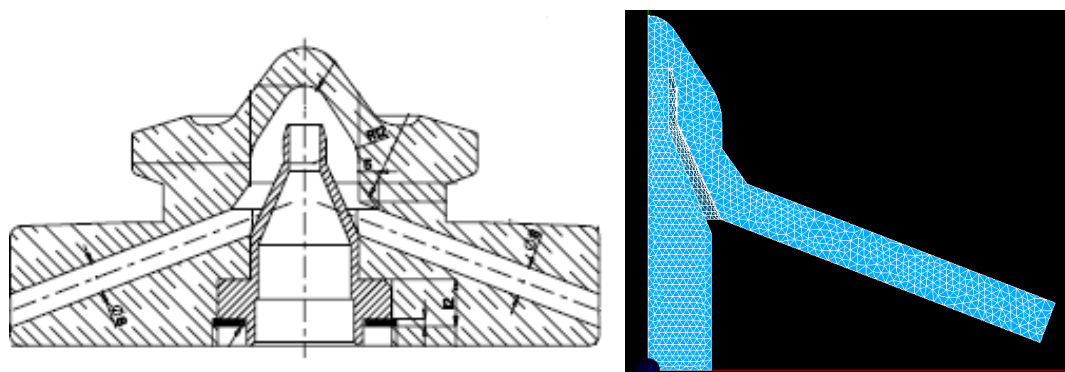


Figura 31 - Exemplo de uma malha desenvolvida para o modelo de resfriamento do fundo da forma

As malhas utilizadas nos modelos foram criadas usando um software, também de origem francesa, chamado Salome. Elas foram construídas usando elementos tetragonais, devido as geometrias complexas das peças, com o tamanho dos elementos variável em função da curvatura da superfície. A dimensão característica do menor elemento da malha era geralmente entre um quinto e um décimo do menor diâmetro da geometria (o mais grosseiro possível que garanta a convergência do cálculo), e a dimensão característica do maior elemento era geralmente 5 vezes esse valor.

Apesar do Code Saturne propor uma grande quantidade de modelos de turbulência ($k-\epsilon$, $k-\omega$, LES, etc), como o uso desses modelos podia até mesmo dobrar o custo computacional do cálculo e o interesse desse trabalho é sobretudo a vazão mássica, não necessariamente o perfil de velocidade/pressão, optou-se por sempre utilizar a opção de escoamento laminar nos modelos.

O algoritmo escolhido para a solução de todas as grandezas difusivas foi o Upwind de primeira ordem, com tolerância para os resíduos de 10^{-5} . Em relação ao acoplamento pressão-velocidade e a solução da equação da energia o software disponibiliza apenas o uso do algoritmo SIMPLC modificado para fluidos

compressíveis com discretização temporal explícita, visto que o módulo compressível só permite soluções transitórias (EDF).

Quanto a definição das condições de contorno elas foram:

- Para a entrada do modelo uma imposição de temperatura de 300K e uma condição de pressão variável, na qual o valor da pressão iniciava-se a pressão atmosférica e aumentava progressivamente até o valor escolhido de pressão de utilização da operação;
- Para a saída do modelo a imposição de uma pressão de saída constante e igual a pressão atmosférica;
- Para as paredes, uma condição de paredes adiabáticas perfeitamente lisas;
- E condições de simetria nas regiões necessárias.

Enfim para as condições iniciais do modelo, a temperatura escolhida foi de 300K, a pressão foi a pressão atmosférica e para as velocidades, o modelo foi dividido em três ou quatro partes e a cada região foi imposta uma velocidade de módulo 50m/s na direção aproximada que o escoamento deveria tomar após a convergência do cálculo.

Os últimos ajustes que devem ser feitos no modelo são os chamados parâmetros numéricos do programa, que são usados para calcular a evolução do passo de tempo durante simulação, como as equações de Navier-Stokes e dos gradientes. Esses parâmetros são os mais complicados de se definir visando a convergência do cálculo, logo para cada modelo um processo iterativo bastante intenso foi realizado para escolhê-los de forma ótima. O quadro geral com os resultados desse processo iterativo é apresentado no Apêndice 1.

Com relação a convergência, o programa garante apenas a convergência de cada passo de tempo, mas, como o cálculo é sempre transitório, ele não indica automaticamente quando os resultados podem ser considerados de um cálculo em regime permanente. Em consequência, para identificar a “convergência” da simulação, foi feita uma análise da vazão mássica tanto na entrada quanto na saída do modelo e a condição utilizada para considerar que o a simulação evoluiu o bastante para ser considerada em regime permanente foi a igualdade das vazões, fato que deve ser respeitado devido a equação da continuidade, como ilustrado na Figura 32.

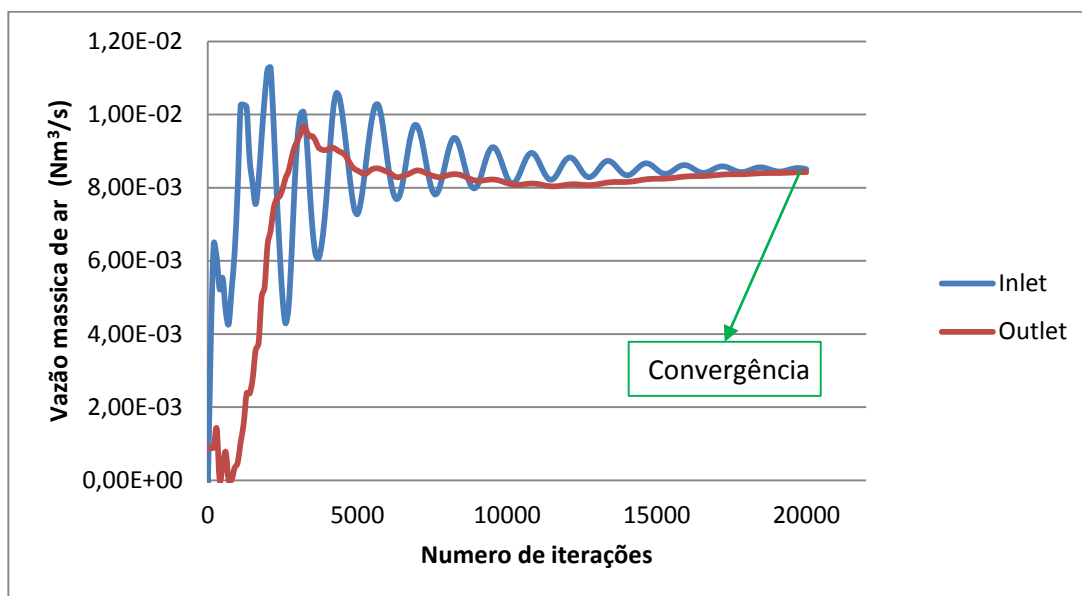


Figura 32 – Evolução das vazões de entrada e saída do cálculo do resfriamento do fundo da forma

Com o intuito de encontrar expressões analíticas para a vazão mássica de cada uma das operações estudadas, uma série de quatro ou cinco cálculos foi realizada para cada operação, modificando-se apenas a pressão de utilização de cada um dos casos. Os resultados foram empregados em conjunto com as equações 14 e 15 de perda de carga para determinar a pressão real no regulador correspondente a vazão resultante dos cálculos CFD, o que permitiu a aplicação de regressões de leis lineares ou logarítmicas sobre o conjunto de resultados de cada operação, como mostrado na Figura 33.

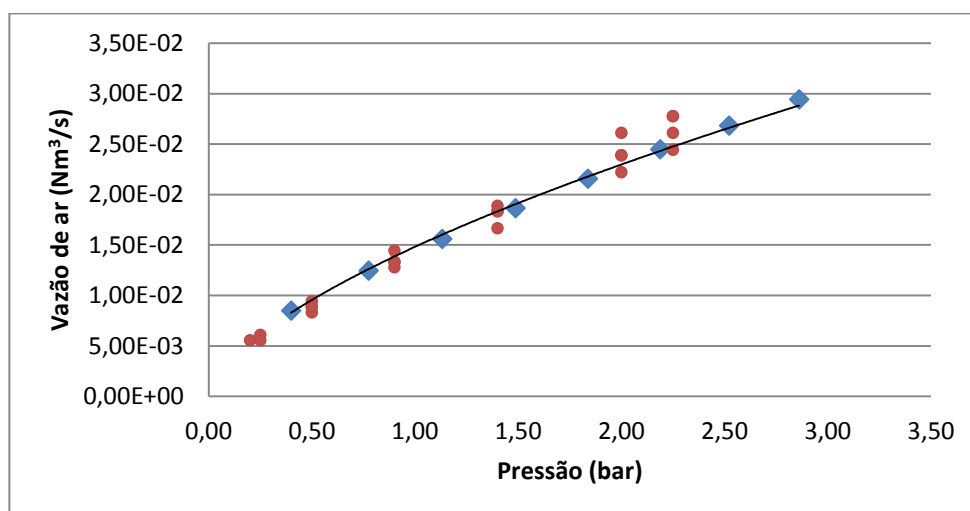


Figura 33 – Resultados do cálculo CFD para o resfriamento do fundo da forma em comparação com medidas

A Figura 33 faz a comparação entre os resultados do método de cálculos apresentado nessa seção do capítulo e de medidas de vazão realizadas na mesma operação. Algo que pode ser observado nessa comparação é que o modelo desenvolvido fornece resultados bastante coerentes com as medidas.

Um outro aspecto que deve ser explicado é o fato que as medidas apresentadas são referentes a produção de três artigos diferentes, o que explica sua dispersão, e a configuração da operação simulada é referente ainda a um outro artigo.

Um último ponto que deve ser discutido é o fato que a partir de 1,2 ou 1,5 bar a vazão tem um comportamento linear em função da pressão, o que é explicado pelo fato que a partir desse nível de pressão as simulações mostram uma região (área vermelha Figura 34) onde o escoamento se encontra bloqueado ($Mach = 1$), ou seja, a velocidade de escoamento nesse região passa a ser invariável com o aumento da pressão, logo a vazão mássica é influenciada apenas pela densidade do ar naquela região, a qual é proporcional a pressão de entrada da operação.

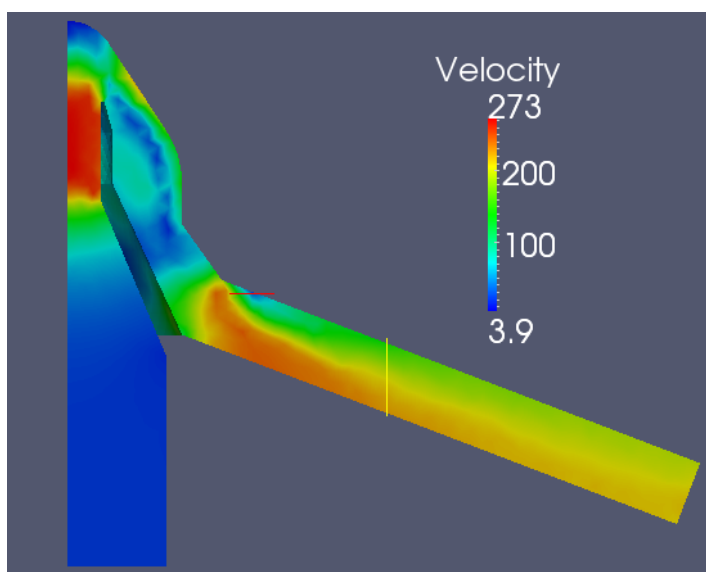


Figura 34 – Perfil de velocidades para um resultado de CFD para o resfriamento do fundo da forma

9.2.3.2 Fluent

Fluent é um software comercial de CFD desenvolvido pela ANSYS e bastante conhecido e respeitado no meio da dinâmica dos fluidos computacional. O maior motivo da escolha de utilizá-lo na criação de modelos nesse trabalho, é o fato que além de possuir algoritmos do tipo *densisty based*, que são mais indicados para solução de

escoamentos compressíveis, ele permite a criação de modelos compressíveis com troca de calor, algo que não é possível no Code Saturne.

A única operação que foi modelada usando esse software foi a segunda etapa do assopro final em potes de vidro, pois, diferente do caso do assopro final em garrafas, não foi encontrado nenhum estudo que permitisse a avaliação da pressão dentro da cabeça de assopro em função da pressão de entrada da operação, o que impossibilitou o uso do modelo de escoamento de Fanno nesse caso.

Como para o Code Saturne, o custo computacional foi um gargalo para o desenvolvimento desse modelo, mesmo após todas otimizações que foram feitas, cada simulação leva em média 4 a 7 dias para a convergência.

As malhas para o modelo foram criadas novamente no software Salome. Sua estrutura foi constituída de elementos tetragonais, e três malhas foram criadas para o estudo de independência de malhas. Todas elas possuíam a dimensão característica mínima de elementos 0,4 mm e para a dimensão característica máxima 10 mm, 5 mm e 2 mm respectivamente.

O estudo feito para convergência de cada uma das malhas mostrou que a única malha que resultou num cálculo estável foi a de 2mm, o que não significa que esse nível de refinamento seja bom o suficiente, porém não seria possível refinar mais ainda a malha devido ao tempo de cálculo absurdo que seria necessário para a simulação.

As configurações utilizadas nesse modelo são:

- Acoplamento pressão-velocidade do tipo *density based*;
- Escoamento transitório, pois a convergência do modelo não foi possível usando as opções de regime permanente ou pseudo-permanent;
- Escoamento do tipo laminar, pois o estudo de turbulência com o modelo $k-\omega$ mostrou que esse é um parâmetro que não tem grande influência na qualidade do resultado, porém aumenta consideravelmente o custo computacional;
- Formulação do tipo implícito, pois ajuda na estabilidade do problema em relação a solução explícita;
- Tipo de fluxo: ROE-FDS (opção default do software, não houve tempo de fazer um estudo quanto a essa opção);

- Discretização espacial com gradiente baseado em mínimos quadrados (opção default do software) e solução do escoamento do tipo Upwind de segunda ordem, pois incorpora os benefícios da formulação upwind (estabilidade da solução), reduzindo os problemas de difusão falsa e permitindo uma malha mais rudimentar que o método de diferenças centradas;
- Fator de sub-relaxação 0,7 que é um valor típico para essa propriedade;
- Resíduos admissíveis 10^{-3} ;
- Passo de tempo variável, com valor mínimo de 10^{-6} (observou-se uma convergência mais rápida com esse valor mínimo);
- No máximo 10 iterações por passo tempo (para limitar o custo computacional mantendo uma relativa boa precisão);
- Para a inicialização do problema utilizou-se um valor um pouco inferior a velocidade de entrada na direção y (90m/s) e zero para as velocidades em x e z, uma pressão 15% inferior a pressão de entrada e temperatura de 300K.

Quanto a definição das condições de contorno elas foram:

- Para a entrada do modelo uma imposição de temperatura de 300K, uma condição de pressão de estagnação fixa igual a pressão de utilização da operação e uma condição de pressão estática inicial 15% inferior a pressão de estagnação;
- Para a saída do modelo a imposição de uma pressão de saída constante e igual a pressão atmosférica;
- Para as paredes, uma condição de paredes sem escorregamento e com uma temperatura de 1100K na região do modelo correspondente ao vidro e 300K nas outras regiões;
- E condições de simetria nas regiões necessárias.

Em relação ao método de convergência, adotou-se o mesmo método adotado para o Code Saturne, ou seja, analisou-se as vazões mássicas de entrada e saída da simulação e quando elas se igualaram decidiu-se pela “convergência” do modelo (Figura 35). Também aplicou-se o mesmo método citado na seção sobre Code Saturne

para levar em conta a perda de carga devido a válvula de controle da operação, seguido da regressão linear sobre os resultados, como mostrado na Figura 36.

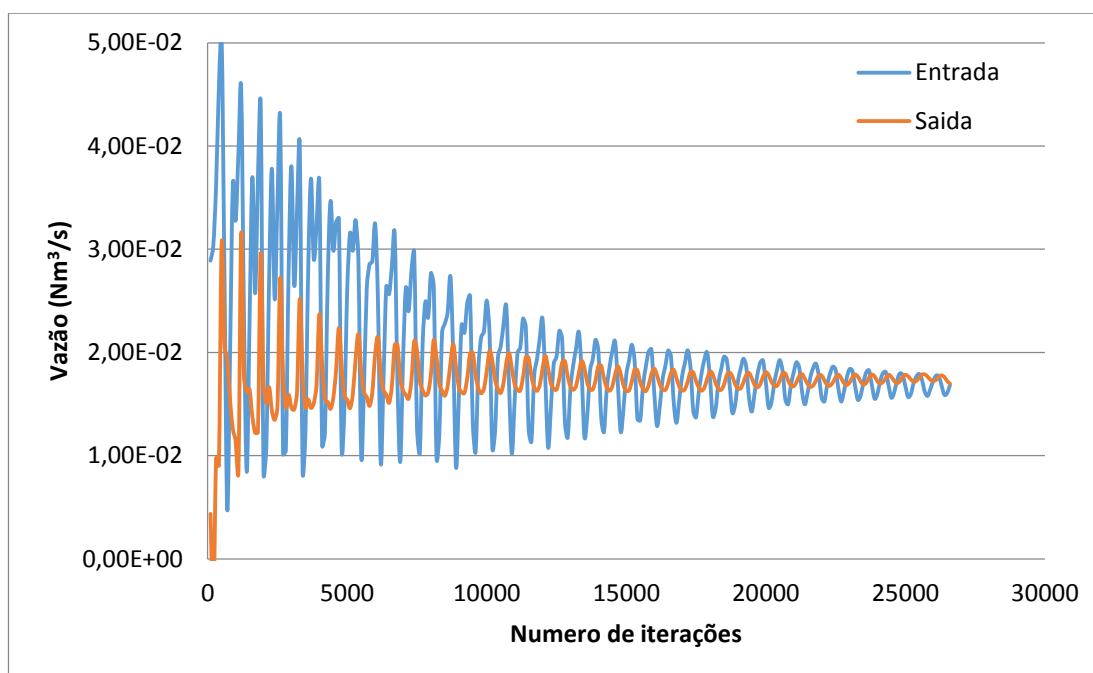


Figura 35 – Análise de convergência para o modelo de assopro final em potes

Essa operação não possui medidas para base de comparação e validação dos resultados calculados, porém o valor de uma medida foi encontrado na documentação da empresa Verallia, $0,0219 \text{ Nm}^3/\text{s}$, embora não se sabia a que pressão de utilização essa vazão foi medida, porém esse dado permite constatar que pelo menos a ordem de grandeza dos resultados é condizente com a medida.

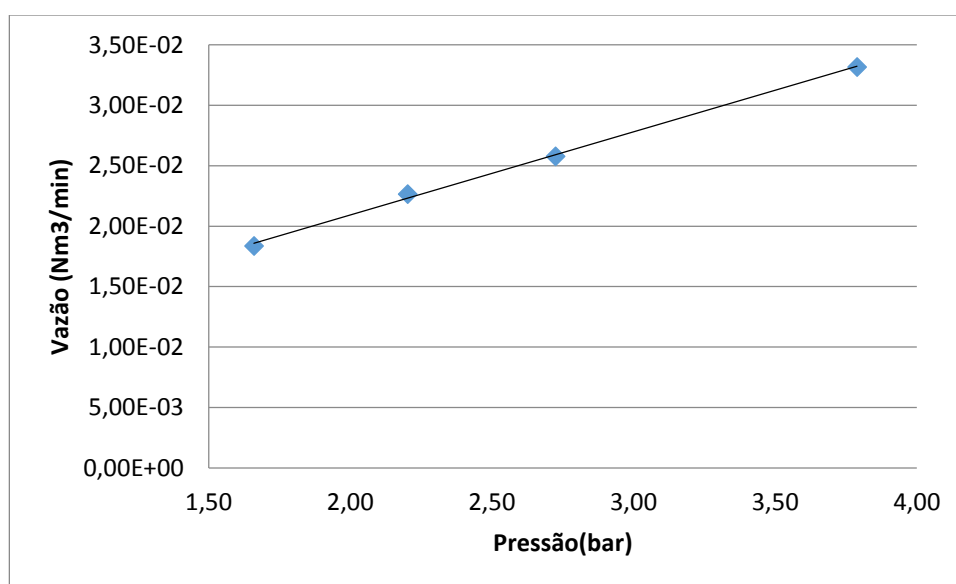


Figura 36 – Regressão linear dos resultados do assopro final em potes

9 INCOMPORAÇÃO DOS RESULTADOS DOS SUB-MODELOS NO MODELO GLOBAL

Todos os dados coletados e sub-modelos desenvolvidos foram agrupados em uma única tabela Excel, o que permitiu o desenvolvimento do modelo global, como explicado no capítulo 6. As planilhas que contem todos esses dados são as chamadas planilhas do desenvolvedor.

Para cada tipo de processo de fabricação (soprado-soprado, prensado-soprado estreita abertura e prensado-soprado larga abertura) foram criadas duas planilhas de cálculos sendo a primeira chamada *Process Parameters*. Nessa planilha todas as dimensões e parâmetros dos cálculos são armazenados, além de todas as formulas de vazão mássica e de duração das operações. Exemplos dessa planilha são mostrados na Figura 37 e na Figura 38.

Process	Cylinder diameter (mm)	Rod diameter (mm)	Filling length (mm)
Blank closing	190,5	50,8	124,7
Blank wind right	41,28		19,05
Blank wind left	41,28		19,05

Figura 37 – Dimensões dos modelos de cilindro pneumáticos da planilha *Process Parameters*

=0,5282*('Calcul WMPB'!L19+1)*100000/RAIZ(0,83333*300*287/1,4)*0,0000031415/2		
	Process time (s/cycle)	Process flow rate (Nm ³ /s)
Scoop pulverisation	0,5	1,47E-03
Shear pulverisation	0,5	1,10E-03
Interceptor pulverisation	0,5	1,47E-03

Figura 38 – Formulas da vazão mássica e duração da planilha *Process Parameters*

A outra planilha de cálculos para cada processo é a chamada *Calcul*, na qual as pressões de alimentação e de utilização são definidas, os dados disponíveis na planilha *Process Parameters* são utilizados para calcular o consumo de cada operação por ciclo da fabricação e os resultados de todas as operações são agrupados e ligados a velocidade de produção, ao número de seções, ao número de gotas e ao número de máquinas para gerar o consumo total da linha de fabricação. Exemplos dessa planilha são mostrados na Figura 39.

A planilha interface, já explicada no capítulo 6 é quem busca os resultados dos cálculos da planilha *Calcul* para apresentá-los ao usuário. E de forma simplificada é

assim que o programa de cálculo foi montado e desenvolvido. Existem aspectos mais complexos, como a identificação da categoria das operações com base num código de cores ou o agrupamento das operações para cada rede de pressão de alimentação, contudo esses detalhes técnicos não parecem realmente relevantes para a compreensão do trabalho.

Total			43,84
		High pressure	23,99
		Low presssure 3 bar	19,85
		Low presssure 2 bar	0,00
		Operating	0,00
		Forming	42,10
		Upstream	0,36
		Ware handling	1,37
		Functional	43,08
		Piping	0,76
Variable gob quantity			
Process	Feeding pressure (bar)	Utilisation pressure (bar)	Consumption/gob/cycle
Final blow volume	3,5	1,5	6,624E-04
Final blow exhaustion	3,5	1,5	5,284E-02
Plunger cooling	7	5,5	8,484E-02
Finish cooling	3,5	2	1,920E-02

Figura 39 – Organização dos dados na planilha Calcul

10 RESULTADOS DO MODELO GLOBAL

Uma vez que todos os submodelos estavam desenvolvidos e implementados dentro do “programa” desenvolvido em Excel uma grande quantidade de cálculos e análises poderiam ser realizados para localizar as regiões da área quente que mais consomem e para a otimização das usinas. Mas antes de começar essas análises mais aprofundadas desses resultados decidiu-se fazer comparações entre as medidas globais disponíveis e os resultados do modelo global para verificar a qualidade dos resultados e eventualmente localizar pontos de melhora para desenvolvimentos futuros.

10.1 Resultados do soprado soprado

Como existe uma grande dispersão entre as medidas, mesmo para uma mesma velocidade de fabricação e um mesmo peso de artigo, para viabilizar as comparações entre resultados do modelo e medidas, será colocado em uma tabela os valores máximo, médio e mínimo¹¹ de consumo para um determinado peso e velocidade de produção do artigo, assim como os resultados do cálculo para esse peso e velocidade.

Tabela 6 – Comparação entre medidas e cálculos para dois artigos fabricados pelo processo soprado-soprado

	Velocidade	Massa	2,1 bar	3,2 bar	7 bar
Medida min	7	500	0,52	1,58	0,10
Medida média			0,62	2,01	0,32
Medida max			0,64	3,00	0,51
Calculo sem resf. Fund.			0,61	1,85	0,08
Calculo com resf. Fund.			0,61	3,05	0,08
Medida min	10,5	225	0,79	2,14	0,18
Medida média			0,76	2,33	0,31
Medida max			0,79	2,89	0,53
Calculo sem resf. Fund.			0,73	2,06	0,11
Calculo com resf. Fund.			0,73	3,26	0,11

No caso do soprado-soprado ainda há um parâmetro mais que deve ser levado em consideração: a existência ou não de resfriamento do fundo da forma e do bloco. Isso se deve ao fato que essas operações são opcionais e apenas utilizadas em alguns produtos específicos, mas como não se sabe se eles foram utilizados ou não durante as

¹¹ Os valores máximo, médio e mínimo levam em conta o consumo total de ar comprimido, ou seja, consumo 2,1 bar + consumo 3,2 bar + consumo 7 bar

medidas foram incluídos na tabela comparativa um caso com resfriamento de fundos e um segundo caso sem para cada produto.

A Tabela 6 apresenta os valores do consumo de ar comprimido avaliado por medidas¹² (em vermelho) e calculados pelo programa desenvolvido nesse trabalho (azul) dividido entre três redes de pressão da linha de fabricação. O que pode ser observado com base nessa comparação é que no geral o consumo nas redes de baixa pressão (2,1 bar) e média pressão (3,2 bar) para o caso sem resfriamento dos fundos do bloco e da forma está bem próximo (menos de 15% de diferença) do valor mínimo das medidas e igualmente próximo do valor médio das medidas, o que mostra que o modelo é capaz de prever de forma aproximada o consumo mínimo/médio dessas redes de pressão. No caso com resfriamento do fundo do bloco e da forma o cálculo também pode ser observado que os cálculos se aproximam do valor máximo das medidas, pelo menos para os artigos mais pesados¹³, o que nos mostra que o programa também é capaz de prever o consumo máximo da linha de produção, embora ela superestime um pouco esse valor.

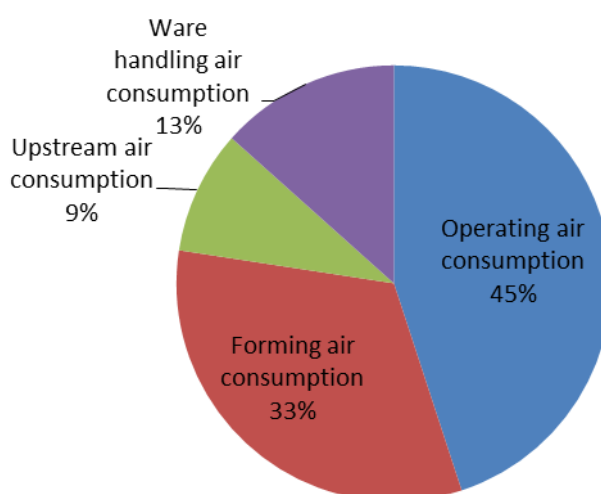


Figura 40 – Repartição do consumo do soprado-soprado, 500g e 7ciclos/min

Quanto a rede de alta pressão, os valores calculados estão próximos do valor mínimo, porém estão bastante distantes dos valores médio e máximo. Não se conhece exatamente a razão disso, mas acredita-se que ela está ligada ao uso de alguns

¹² As medidas utilizadas são vindas das usinas Alemãs que aparentam ter um nível de vazamentos baixos em relação as outras usinas analisadas.

¹³ Artigos mais leves usam com menos frequência o resfriamento de fundos do bloco e da forma, e quando usam devem usar parâmetros menos intensos do que os colocados no modelo

equipamentos usando a rede de alta pressão, pois é sabido que algumas usinas preferem utilizar as operações de transferência e compressão na rede de alta pressão, embora normalmente elas sejam utilizadas na rede de média pressão. Outra razão que pode ser associada a essa diferença é a existência de vazamentos particulares na rede de alta pressão que não foram levados em conta dentro de nosso modelo, mas para obter uma resposta definitiva uma investigação deve ser realizada.

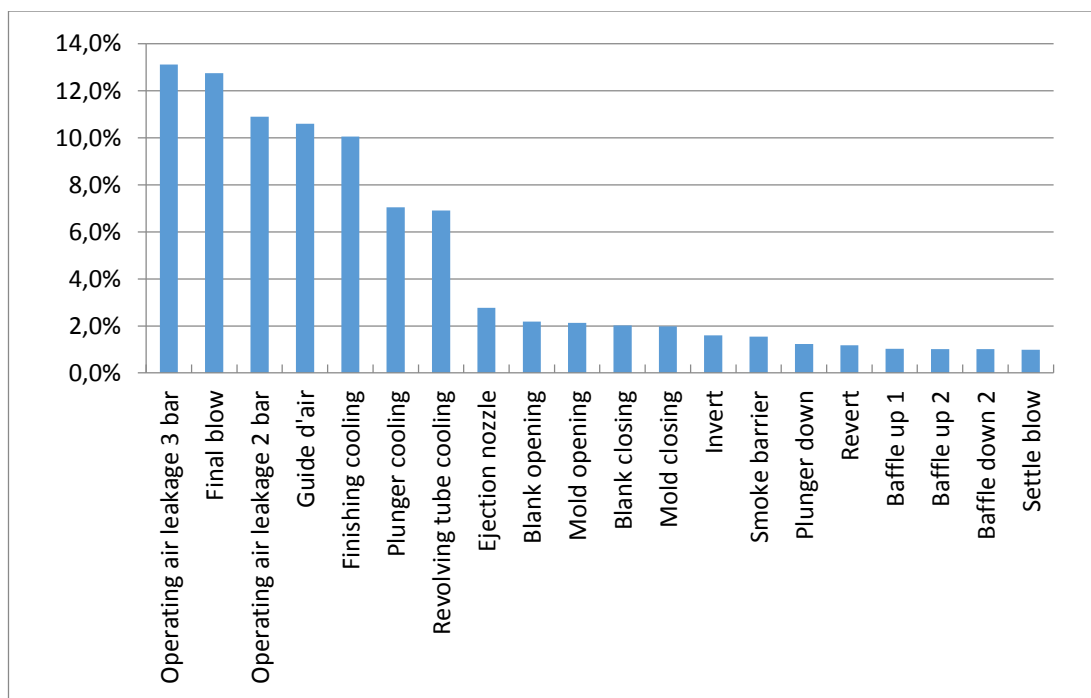


Figura 41 – Participação das operações no consumo total de linha de produção Soprado-Soprado¹⁴

Um outro resultado interessante que pode ser obtido a partir do modelo global é a repartição do consumo de ar comprimido em função da categoria à qual as operações pertencem (*air handling*, *operating*, *forming* e *upstream air*). Essa repartição para o caso de 7 ciclos/min e massa do artigo 500g sem resfriamento dos fundos é mostrado na Figura 40. O que pode ser observado é que o *operating air* é o maior consumidor de ar comprimido para esse processo, seguido de perto pelo *forming air*. Quanto ao *ware handling air* e o *upstream air*, eles têm um consumo bem menos importante em relação às outras duas categorias.

¹⁴ A figura está em inglês, pois o programa foi todo desenvolvido em inglês, para que ele pudesse ser compreendido e utilizado em diversos países. Uma tabela com a tradução das operações está disponível no Anexo 1.

O último comportamento que o programa desenvolvido permite analisar é a participação das 20 operações que mais consomem ar comprimido no consumo total da linha de produção (Figura 41). Observa-se que para o processo de fabricação soprado-soprado os maiores consumidores são os vazamentos dos cilindros pneumáticos (1° e 3°), o assopro final (2°), o guia de ar (4°) e o resfriamento do gargalo (5°).

10.2 Resultados do prensado-soprado de estreita abertura

As mesmas mostradas na seção anterior foram realizadas nessa seção para os cálculos do processo prensado-soprado de estreita abertura, contudo a tabela de comparação tem uma pequena modificação ligada ao fato que nesse tipo de processo não existe o uso de resfriamento dos fundos do bloco e da forma, logo apenas um valor dos cálculos será apresentado.

Tabela 7 - Comparação entre medidas e cálculos para dois artigos fabricados pelo processo prensado-soprado estreita abertura

	Velocidade	Massa	2,1 bar	3,2 bar	7 bar
Medida min	10,5	270	0,83	0,91	1,20
Medida média			0,84	0,98	1,18
Medida max			0,85	0,98	1,27
Calculo			0,72	1,60	2,24
Medida min	13,5	170	0,92	2,67	-
Medida média			0,75	2,96	-
Medida max			0,67	3,35	-
Calculo			0,82	3,14	0,14

A primeira coisa que pode ser percebida na Tabela 7 é que o primeiro produto tem um grande consumo em alta pressão, tanto nas medidas quanto no cálculo, e o segundo não. Isso se deve ao fato de que as medidas do primeiro produto vêm da Alemanha, onde a resfriamento do punção (ou pino) é feito utilizando a rede de alta pressão, e as medidas do segundo produto vêm da Espanha, onde o resfriamento do punção é feito utilizando a rede de média pressão.

Em relação ao primeiro produto da tabela (vel. 10,5 ciclos/min e massa 270g) o que percebe-se é que, com exceção da rede de baixa pressão, a predição de consumo é bastante ruim (60% de dispersão na média pressão e 100% na alta pressão).

Para a alta pressão o problema está ligado a predição do tempo da operação de resfriamento do punção. A lei que faz essa predição foi montada com base em planos

de fabricação franceses e italianos, onde utiliza-se resfriamento do punção em média pressão, e quando o resfriamento de punção é feito em alta pressão o tempo da operação é bastante reduzido, o que é uma das vantagens desse método. Logo seria necessário a obtenção de um grande número de planos de fabricação alemães para criar uma lei de predição para o tempo de operação dessa operação em alta pressão.

Quanto a média pressão, não se sabe exatamente porque o modelo superestima o consumo, uma hipótese é que isso pode estar relacionado com a existência de um mecanismo especial nas linhas de fabricação alemãs que realiza o resfriamento dos produtos durante seu transporte do lado da forma para a placa de repouso, o que permite uma redução no tempo de operação do assopro final, gerando eventualmente uma redução do consumo de ar comprimido a média pressão. Contudo, não se sabe se apenas esse fato seria o suficiente para explicar a diferença constatada entre medidas e cálculos para média pressão.

Para o caso do segundo produto, observa-se uma correlação entre resultados do cálculo e medidas bastante boa (os valores estão entre as medidas mínimas e máximas com menos de 10% de diferença das medidas médias). O que pode parecer estranho são as medidas para o 7 bar, mas o traço se refere a ausência de medidas, não a ausência de consumo. Logo pode-se concluir que o programa prediz bem o consumo do prensado-soprado estreita abertura, desde que o resfriamento do punção seja feito usando a rede de média de pressão e não a de alta pressão.

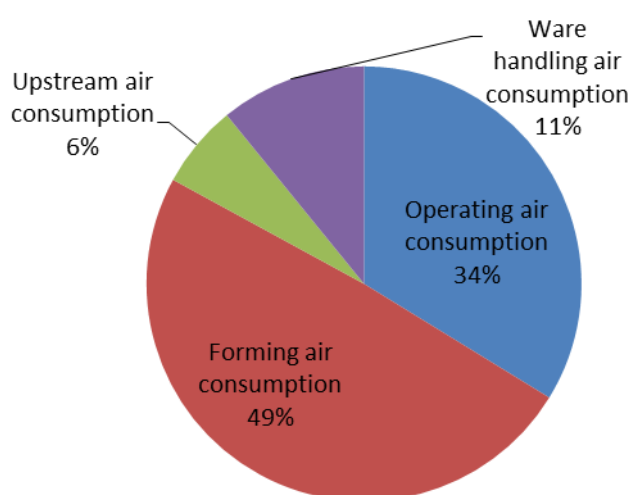
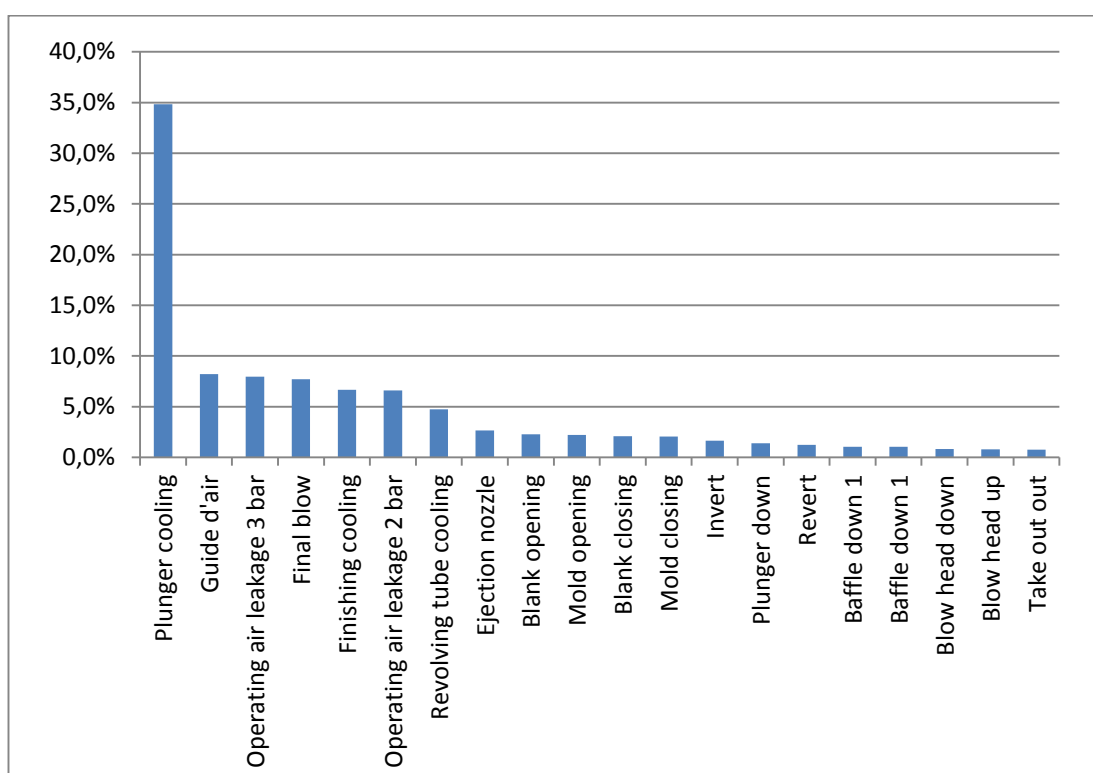


Figura 42 - Repartição do consumo do prensado-soprado estreita abertura, 170g e 13,5 ciclos/min

No que diz respeito a distribuição de consumo nas quatro categorias de operações (Figura 42), observa-se um grande aumento no consumo das operações do *forming air* em relação ao soprado-soprado, o que está ligado principalmente ao grande consumo do resfriamento do punção. A manutenção da proporção do consumo do *ware handling air* perante o *operating* e o *upstream air* sofreram uma redução é explicada pelo aumento da velocidade de produção, que aumenta o consumo das operações do *ware handling*, praticamente não afetam as operações do *upstream air* e afetam as operações do *operating air* menos intensamente, principalmente pela redução do nível de vazamento.



**Figura 43 - Participação das operações no consumo total de linha de produção
Prensado-Soprado Estreita Abertura¹⁵**

A Figura 43 mostra um grande aumento no consumo do resfriamento do punção (1°) chegando a 35% do consumo total da linha de produção do prensado-soprado estreita abertura. As outras operações se mantêm relativamente nas mesmas posições de consumo: a guia de ar passa a 2°, pois seu consumo aumenta bastante com o aumento da velocidade, os vazamentos caem um pouco (3° e 6°), pois o seu consumo

¹⁵ Tradução das operações no Anexo 2

reduz com o aumento da velocidade, e o assopro final (4°) cai um pouco no ranking devido a diminuição de sua duração, causada pela diminuição de massa do artigo.

10.3 Resultados do prensado-soprado larga abertura

Para o caso do prensado-soprado larga abertura, devido à escassez de medidas, foi possível obter apenas uma medida para cada massa/velocidade do artigo, então três artigos escolhidos aleatoriamente (porém todos alemães, pois eram os únicos disponíveis) para tabela de comparação (Tabela 8). Observa-se nessa comparação que com exceção do primeiro produto os cálculos estão razoavelmente próximos das medidas (menos de 20% de diferença). Um detalhe é que o valor calculado da média pressão está sempre superior ao valor das medidas e o valor calculado da alta pressão está sempre inferior às medidas, logo talvez existam equipamentos que normalmente operam em média pressão que estão sendo empregados em alta pressão nesses produtos.

Para o primeiro produto existe uma diferença significativa entre a medida e o cálculo na média pressão. Isso pode ser explicado pelo uso de parâmetros diferentes no modelo de cálculo e na linha de produção onde a medida foi realizada. É importante lembrar que os valores de duração e pressão das operações utilizados no modelo são médias de um conjunto de casos estudados, e que em casos específicos a diferença entre essas médias e os valores reais pode ser bastante elevada.

Tabela 8 - Comparação entre medidas e cálculos para dois artigos fabricados pelo processo prensado-soprado larga abertura

	Velocidade	Massa	2,1 bar	3,2 bar	7 bar
Medida	16,6	83	0,97	1,67	1,39
Calculo			0,94	2,45	1,17
Medida	14,5	155	0,78	2,68	1,75
Calculo			0,87	2,71	1,39
Medida	8,21	405	0,60	1,82	1,84
Calculo			0,65	2,20	1,50

A divisão de consumo nas quatro categorias das operações (Figura 44) teve um novo aumento na fração do *forming air* em relação ao caso do prensado-soprado estreita abertura, novamente devido ao aumento do consumo do resfriamento do

punção, porém, diferente da Figura 42, desta vez houve uma grande diminuição do *ware handling air*, pois a velocidade de produção é relativamente baixa.

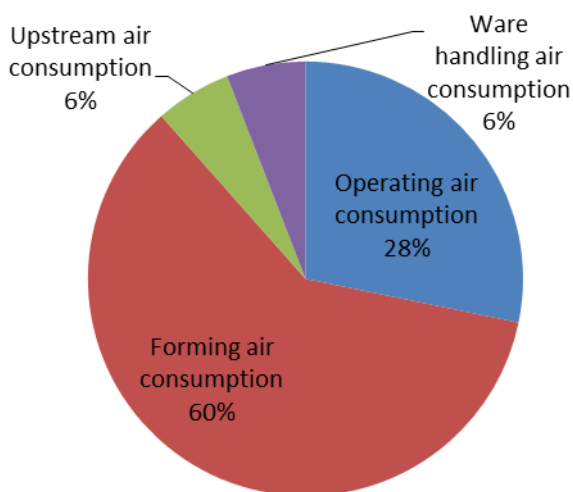


Figura 44 - Repartição do consumo do prensado-soprado larga abertura, 405g e 8,21 ciclos/min

E quanto aos mecanismos que mais consomem ar comprimido, como observado na Figura 45, novamente o maior consumidor é o resfriamento do punção (1°), seguido do assopro final (2°), do resfriamento do gargalo (4°) e dos vazamentos dos cilindros pneumáticos (3° e 5°).

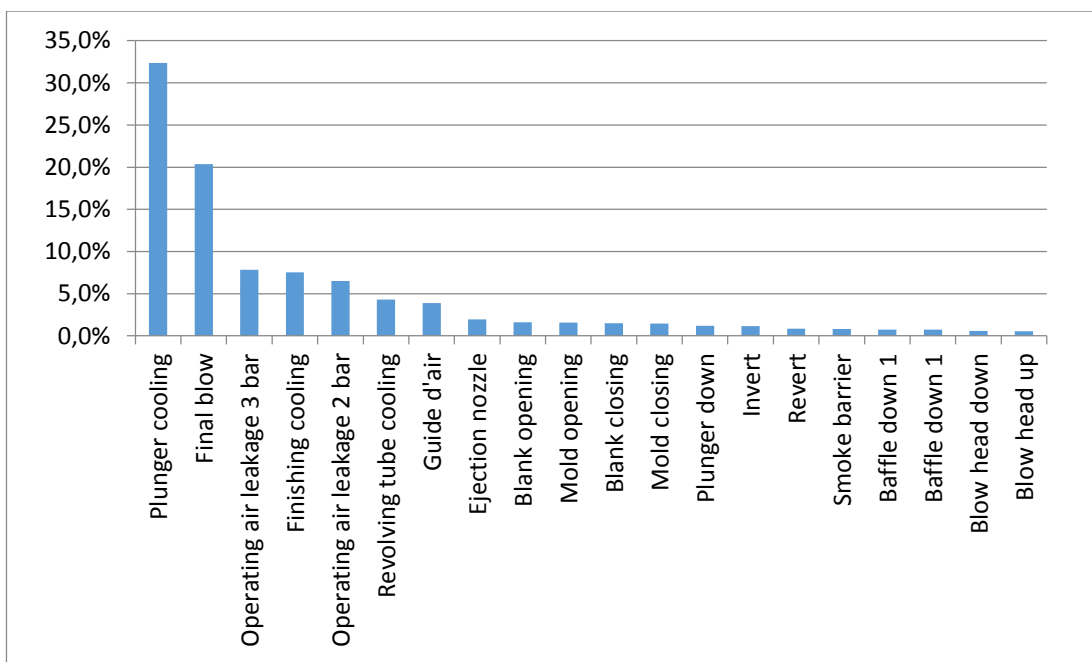


Figura 45 - Participação das operações no consumo total de linha de produção Prensado-Soprado Larga Abertura (tradução Anexo 3)

11 CONCLUSÃO

O objetivo inicial desse projeto era o desenvolvimento de programa capaz de prever o consumo de ar comprimido de uma linha de fabricação de embalagens de vidro a partir da entrada de alguns parâmetros principais do produto em questão. Lembrando que as utilidades desse programa são o estabelecimento de uma referência para avaliação da performance em relação ao consumo de ar comprimido de usinas já em funcionamento e o estabelecimento de curvas de consumo para o dimensionamento de compressores de novas usinas.

Pode-se dizer que esse objetivo foi atingido, visto que ele permite uma predição razoavelmente precisa do consumo na maior parte dos casos testados, gerando valores de consumo próximo dos obtidos em usinas com baixo nível de vazamentos, o que permite a identificação de usinas com níveis de vazamentos mais elevados. Quanto as curvas de consumo para o dimensionamento, o programa consegue gerar essas curvas em valores de consumo mínimos, contudo adicionando alguns coeficientes de segurança com base em medidas realizadas em outras usinas, consegue-se fazer um dimensionamento bastante confiável para novos compressores (algo que já foi realmente feito).

Uma outra utilidade que o programa oferece é a identificação das categorias de operações que mais consomem ar comprimido e, mais especificamente, dos mecanismos que mais consomem, o que permite um trabalho de otimização do consumo mais eficiente através da priorização das áreas/mecanismo nos quais deve-se trabalhar.

Contudo, o programa também apresenta algumas falhas, que já foram, em grande parte, discutidas no decorrer desse documento:

- Os resultados dos cálculos para o processo soprado-soprado apresentam uma dispersão bastante pronunciada na rede alta pressão em alguns casos, o que por enquanto tem causa desconhecida, embora existam hipóteses;
- Para o prensado-soprado estreita abertura, as comparações mostram que não existe uma boa correlação entre medidas e cálculos quando o resfriamento do punção é feito usando a rede de alta pressão;

- E quanto ao processo prensado-soprado larga abertura, sempre existe uma diferença de até 20% entre as medidas e os resultados do cálculo, contudo em alguns casos particulares essa diferença pode ser bem maior chegando até a 50%. Além do fato de que os valores de média pressão do cálculo são sistematicamente superiores às medidas e os valores de alta pressão do cálculo são sistematicamente inferior às medidas.

Para tentar corrigir essas falhas e para uma melhoria na qualidade do programa em geral, existem uma lista de medidas que eu acredito importantes para a continuação desse trabalho:

- A averiguação dos motivos dados para as falhas do modelo, assim como a investigação dos casos, cujos motivos das falhas não foram identificados;
- Realização de um estudo mais aprofundado para os níveis de pressão de utilização das operações, gerando modelos de predição dessas grandezas, como foi feito para a duração das operações;
- Criação de um modelo teórico para os vazamentos nos cilindros pneumáticos, para averiguar se a diferença entre as medidas e o modelo sem vazamentos é devida realmente apenas a esse fenômeno;
- Realização de uma bateria de cálculos CFD para o processo de resfriamento do gargalo em potes, pois esse é a única operação que ainda tem seu consumo baseado apenas em medidas;
- Desenvolvimento de um modelo mais robusto para a segunda etapa do assopro final em garrafas, pois até o momento o modelo é baseado em um diagrama de conversão de pressões construído para uma única garrafa, e como é bem provável que esse diagrama seja diferente para duas garrafas diferentes, o modelo atual não é suficiente para os objetivos do programa;
- Melhoria do modelo CFD do resfriamento do punção em potes, que gerou alguns problemas de convergência.

12 CRONOGRAMAS

Cronograma de atividades 1° semestre			
Numero da semana	Início da Semana	Fim da semana	Atividade
Semana 1	24-fev	2-mar	Estudo da linha de produção
Semana 2	3-mar	9-mar	Estudo da linha de produção
Semana 3	10-mar	16-mar	Identificação dos mecanismos
Semana 4	17-mar	23-mar	Níveis padrão de pressão
Semana 5	24-mar	30-mar	Modelo cilindros pneumaticos
Semana 6	31-mar	6-abr	Modelo cilindros pneumaticos
Semana 7	7-abr	13-abr	Modelo de vazamentos
Semana 8	14-abr	20-abr	Modelo de enximento
Semana 9	21-abr	27-abr	Busca dimensões mecanismos
Semana 10	28-abr	4-mai	Modelo de Fanno
Semana 11	5-mai	11-mai	Modelo de Fanno + CFD
Semana 12	12-mai	18-mai	Modelo isentropico + CFD
Semana 13	19-mai	25-mai	Análise medidas + CFD
Semana 14	26-mai	1-jun	Análise medidas + CFD
Semana 15	2-jun	8-jun	Investigações medidas + CFD
Semana 16	9-jun	15-jun	Modelo global + CFD
Semana 17	16-jun	22-jun	Modelo global + CFD
Semana 18	23-jun	29-jun	Apresentação + preparação 1° relatorio
Semana 19	30-jun	6-jul	Preparação primeiro relatorio
Semana 20	7-jul	13-jul	Preparação primeiro relatorio
Semana 21	14-jul	20-jul	Apresentação + preparação 1° relatorio

Cronograma de atividades 2° semestre			
Numero da semana	Início da Semana	Fim da semana	Atividade
Semana 1	11-ago	17-ago	Preparação relatorio parcial
Semana 2	18-ago	24-ago	Preparação relatorio parcial
Semana 3	25-ago	31-ago	Preparação relatorio parcial
Semana 4	1-set	7-set	Preparação relatorio parcial
Semana 5	8-set	14-set	Autorização NDF uso computadores
Semana 6	15-set	21-set	Aprendizado Fluent
Semana 7	22-set	28-set	Testes convergência CFD
Semana 8	29-set	5-out	Testes convergência CFD
Semana 9	6-out	12-out	Otimização modelo CFD
Semana 10	13-out	19-out	Preparação relatorio final + CFD
Semana 11	20-out	26-out	Preparação relatorio final + CFD
Semana 12	27-out	2-nov	Preparação relatorio final + CFD
Semana 13	3-nov	9-nov	Preparação artigo científico
Semana 14	10-nov	16-nov	Preparação artigo científico
Semana 15	17-nov	23-nov	Preparação poster + apresentação oral
Semana 16	24-nov	30-nov	Apresentação

13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAR-MEIR, G. **Fundamentals of Compressible Fluid Mechanics**. [S.l.]: [s.n.], 2007.

BOTTERO. **Manuel des instructions Machine I.S.** . 2010.

CHAMPION, T. **Etude refroidissement fond finisseur champenoise - Oiry - Ligne 13.** . 1993.

CLEMENT, R.; DUMAS, R. **Relation debit d'air de refroidissement avec la temperature des poinçons**. [S.l.]. 1992.

CLEMENT, R. **Debit du refroidissement poinçon sur machine.** . 1991.

CLEMENT, R. **Modification de perçage de la pipette utilisée pour la fabrication des Biere P 26,5.** . 1997.

CLEMENT, R. **Modification de perçage de la pipette utilisée pour la fabrication des Bourgogne 300.** . 1997.

CLEMENT, R. **Modification de perçage de la pipette utilisée pour la fabrication des Eva all 26,5.** . 1997.

CLEMENT, R.; DUMAS, R. **Influence de la pression de soufflage sur la temperature de l'article en fin de cycle de formage.** . 1992.

CLEMENT, R.; DUMAS, R. **Refroidissement des poinçons - Repartion de la temperature sur la hauteur.** . 1992.

CLEMENT, R.; DUMAS, R. **Refroidissement des poinçons pour la fabrications des bieres P. 26,5 de Saint-Romain.** . 1992.

CLEMENT, R.; DUMAS, R.; ALEGOET, C. **Refroidissement des poinçons - Essais de differents modèles de pipettes pour fabrication P 26,5.** . 1992.

CLEMENT, R.; EGRON, J. M. **Comparaison de deux pipettes de refroidissement de poinçon, venant de fournisseurs differents.** . 1991.

DR MARTIN BUSS & PARTNER. **Telescopic Blow Head Trial**. [S.l.]. 2004.

EDF. Documentation | Code_saturne. Disponivel em: <<http://code-saturne.org/cms/documentation>>. Acesso em: 2014.

FLEURY, N. **Power Point - Compresse air - IS machines consumption.** : . 2013.

NICOLAS, J.-M. **Power Point - Compressed air consumption on I.S. Machines.** . . 2013.

RICHARD, J. **Specifications air comprime pour machine IS.** . 1994.

SAINT-GOBAIN EMBALLAGE. **Procede AGA de refroidissement de l'air de soufflage.** . 1988.

SAINT-GOBAIN. Saint-Gobain | Le Groupe. Disponivel em: <<http://www.saint-gobain.com/fr/groupe>>. Acesso em: 01 Juillet 2014.

SAULNIER, R.; SILVA, H. D. **Essai tête de soufflage télescopique Oiry _ Projet MSP Ovalistion.** . 2008.

SHAPIRO, A. **The dynamics e thermodynamics of Compressible Fluid Flow.** New York: Ronald Press Company, v. I, 1953.

SWAGELOK. Valve Sizing - Technical Bulletin. Disponivel em: <<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/EN/ms-06-84.pdf>>. Acesso em: 2014.

VAN PUTTEN INSTRUMENTS. **VP FlowScope (dP) Manual.** Delft. 2011.

VAZQUEZ, D.; BESSON, P.; CLEMENT, R. **Essais d'améliorations du refroidissement des fonds finisseurs champenoises 75 cl.** . 1997.

VERALLIA. **Stage C1 - Techniques de soufflage de base.** . 2008.

VERALLIA. **Stage C2 - Technique de Soufflage, Le procédé soufflé-soufflé.** . 2008.

VERALLIA. **Stage C3 - La thermique de soufflage.** . 2008.

VERALLIA. **Stage P.S. - Le procédé pressé-soufflé.** . 2008.

VERALLIA. **Panorame de Verallia.** Chalon-sur-Saône. 2012.

VERALLIA. **Stage d'insertion.** . 2012.

VERALLIA. Verallia - Processo de Fabricação. **Site da Verallia,** 2014. Disponivel em: <<http://br.verallia.com/o-vidro/processo-de-fabricacao>>. Acesso em: Setembro 2014.

VERALLIA. Portal Verallia. Disponivel em: <<http://portal.saint-gobain.com/web/verallia>>. Acesso em: 01 Juillet 2014.

VIE de l'exploitation, 2014. Disponivel em: <<http://www.champagne-merreux.com/rubrique-65-cuverie.html>>. Acesso em: Setembro 2014.

APÊNDICE 1

Gradient calculation method	Iterative handling of non-orthogonalities
Velocity-Pressure algorithm sub-iterations on Navier-Stokes	1
Reference time step	10^{-5} s (gets lower for finer meshes)
Number of iterations	30000 (gets higher for lower reference steps)
Maximal CFL number	0.4
Maximal Fourier number	10
Minimal time step factor	10^{-3}
Maximal time step factor	100
Time step maximal variation	0.1

ANEXO 1

Tradução ranking de operações soprado-soprado	
Inglês	Português
Operating air leakage 3 bar	Vazamento dos cilindros pneumáticos 3 bar
Final blow	Assopro final
Operating air leakage 2 bar	Vazamento dos cilindros pneumáticos 2 bar
Guide d'air	Guia de ar
Finishing cooling	Resfriamento do gargalo
Plunger cooling	Resfriamento do punção
Revolving tube cooling	Resfriamento do tubo giratório
Ejection nozzle	Bocais de ejeção
Blank opening	Abertura do bloco
Mold opening	Abertura da forma
Blank closing	Fechamento do bloco
Mold closing	Fechamento da forma
Invert	Inversão
Smoke barrier	Barreira de fumaça
Plunger down	Descida do punção
Revert	Reversão
Baffle up 1	Subida do fundo do bloco 1
Baffle up 2	Subida do fundo do bloco 2
Baffle down 2	Descida do fundo do bloco 2
Settle blow	Compressão

ANEXO 2

Tradução ranking de operações prensado-soprado estreita abertura	
Inglês	Português
Plunger cooling	Resfriamento do punção
Guide d'air	Guia de ar
Operating air leakage 3 bar	Vazamento dos cilindros pneumáticos 3 bar
Final blow	Assopro final
Finishing cooling	Resfriamento do gargalo
Operating air leakage 2 bar	Vazamento dos cilindros pneumáticos 2 bar
Revolving tube cooling	Resfriamento do tubo giratório
Ejection nozzle	Bocais de ejeção
Blank opening	Abertura do bloco
Mold opening	Abertura da forma
Blank closing	Fechamento do bloco
Mold closing	Fechamento da forma
Invert	Inversão
Plunger down	Descida do punção
Revert	Reversão
Baffle down 1	Descida do fundo do bloco 1
Baffle down (up) 1	Subida do fundo do bloco 1
Blow head down	Descida da cabeça de assopro
Blow head up	Subida da cabeça de assopro
Take out	Take out

ANEXO 3

Tradução ranking de operações prensado-soprado larga abertura	
Inglês	Português
Plunger cooling	Resfriamento do punção
Final blow	Assopro final
Operating air leakage 3 bar	Vazamento dos cilindros pneumáticos 3 bar
Finishing cooling	Resfriamento do gargalo
Operating air leakage 2 bar	Vazamento dos cilindros pneumáticos 2 bar
Revolving tube cooling	Resfriamento do tubo giratório
Guide d'air	Guia de ar
Ejection nozzle	Bocais de ejeção
Blank opening	Abertura do bloco
Mold opening	Abertura da forma
Blank closing	Fechamento do bloco
Mold closing	Fechamento da forma
Plunger down	Descida do punção
Invert	Inversão
Revert	Reversão
Smoke barrier	Barreira de fumaça
Baffle down 1	Descida do fundo do bloco 1
Baffle down (up) 1	Subida do fundo do bloco 1
Blow head down	Descida da cabeça de assopro
Blow head up	Subida da cabeça de assopro