



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DO PROCESSO DE SECAGEM INDUSTRIAL DE
ESPAGUETE EM SECADORA DE FLUXO CONTÍNUO E A
INFLUÊNCIA DA MATÉRIA-PRIMA SOBRE A QUALIDADE DO
PRODUTO FINAL**

JOSÉ JORGE SILVA SANTOS JÚNIOR

Salvador – Bahia

2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DO PROCESSO DE SECAGEM INDUSTRIAL DE
ESPAGUETE EM SECADORA DE FLUXO CONTÍNUO E A
INFLUÊNCIA DA MATÉRIA-PRIMA SOBRE A QUALIDADE DO
PRODUTO FINAL**

Autor: José Jorge Silva Santos Júnior

Orientador: Prof.^o Dr. Samuel Luporini

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Bahia, Mestrado em Engenharia Química, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Salvador – Bahia

2014

R182 Santos Júnior, José Jorge Silva.

Análise do processo de secagem industrial de espaguete em secadora de fluxo contínuo e a influência da matéria-prima sobre a qualidade do produto final / José Jorge Silva Santos Júnior. – Salvador, 2014.

182 f. : il. color.

Orientadora: Prof. Doutor Samuel Luporini
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2014.

1. Alimento. 2. Calor. 3. Massa. 4 Temperatura. 5 Umidade. I. Luporini, Samuel. II. Universidade Federal da Bahia. II. Título.

CDD: 664.9029

TERMO DE APROVAÇÃO
JOSÉ JORGE SILVA SANTOS JÚNIOR

**ANÁLISE DO PROCESSO DE SECAGEM INDUSTRIAL DE
ESPAGUETE EM SECADORA DE FLUXO CONTÍNUO E A
INFLUÊNCIA DA MATÉRIA-PRIMA SOBRE A QUALIDADE DO
PRODUTO FINAL**

Dissertação aprovada submetida à Comissão Julgadora do Programa de Mestrado em Engenharia Química da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Comissão Julgadora:

Prof.º Dr.º Samuel Luporini
Doutor em Engenharia Química, UNICAMP
Orientador

Prof.º Dr.ª Janice Izabel Druzian
Doutora em Ciências de Alimentos, UNICAMP
Banca examinadora

Prof.º Dr.º Pablo Fica Pires
Doutor em Engenharia Química, UFRJ
Banca examinadora

Salvador, 21 de março de 2014

Dedico este trabalho:

À Deus, pela energia para vida e sustento, fazendo-me acreditar que n'Ele, meus sonhos são possíveis. À minha amada esposa Larissa Novais, pelo aconchego e companheirismo mesmo nos momentos em que não cria ser possível. Aos meus pais, irmãos e amigos, pela confiança e força em todos os momentos de luta.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, Mestre Maior, onde estão escondidos todos os tesouros da ciência e sabedoria.
- A Larissa, minha esposa, por ser meu ombro forte e minha maior companheira em todo este tempo em que a conclusão do mestrado parecia intangível, e aos meus pais e irmãos, a família Miranda e Novais, pode demonstrar confiança em meus sonhos.
- Ao meu orientador, Prof.^o Dr. Samuel Luporini, por acreditar em mim e enxergar valor neste trabalho, fortalecendo-me nos momentos mais difíceis.
- A todos os professores do Mestrado em Engenharia Química, em especial a Prof.^a Dr. Silvana Mattedi, por no início apresentar-me este projeto de mestrado com muito entusiasmo.
- Ao Prof. Dr. Kil Jin Park que, apesar de distante fisicamente, motivou-me e sempre esteve disposto nas sugestões, críticas e ideias, sendo que com muita paciência, humildade e incentivo.
- Aos amigos do mestrado, em especial Milton, Horacimone, Leonardo e Raigenis, pelas horas de estudo e troca de aprendizado, especialmente a Maurício Sales, um amigo e colega que sempre esteve ao meu lado, auxiliando-me nas dificuldades das disciplinas e pesquisa.

- Ao meu amigo Ricardo por todo auxílio, força e motivação em todo este tempo, além de juntamente com André, pelo labor virtuoso quando na execução dos experimentos em campo.
- A Roque Silva, conhecedor e operador de secagem de espaguete, pois me ensinou muito do que hoje entendo de fabricação desta maravilhosa massa, com a mesma paixão com a qual lida com o processo.
- Aos analistas de qualidade Emanuel, Lidiane, Elcimara e Izadora, por todo auxílio nas análises de farinha de trigo, água e espaguete relacionados a este trabalho; a Bárbara, técnica do laboratório da UEFS, pela realização de outras análises do espaguete; ao meu amigo Raigenis Fiuza, pela análise de microscopia eletrônica de varredura no Instituto de Química da UFBA.
- Ao Roberto da fabricante Italiana Pavan Groups, pelo norte dado ao desenvolvimento desta pesquisa em muitas das lacunas para mim existentes.
- A Universidade Federal da Bahia, pela possibilidade de estudar e conhecer mais profundamente a engenharia química e seu universo de conhecimento, bem como em especial Sara e Néia, secretárias deste curso que muito me estimularam a seguir em frente.
- A todos que, ao longo destes anos, contribuíram direto e indiretamente para finalização deste trabalho. Com muita estima e gratidão, meu muito obrigado.



***“Confia a Deus as tuas obras,
e terão êxito os teus Projetos.”***

(Provérbio de Salomão 16-3)

RESUMO

Desde os primórdios o homem tem buscado formas de racionalizar recursos disponíveis a fim de propiciar a transformação e conservação de alimentos. Processos como a salga, o congelamento, a acidificação e a *secagem* têm sido historicamente utilizados conferindo ao alimento maior vida útil. Esta última decorre da redução da atividade de água (A_w), que leva à redução microbiológica e ao retardamento da deterioração. Parâmetros como a temperatura, umidade relativa, velocidade de escoamento do ar de secagem e do alimento, umidade de equilíbrio, bem como as características físico-químicas da matéria-prima, terão influências sobre a qualidade do produto. Na indústria este processo é realizado em secadoras de fluxo contínuo (para o caso do espaguete). A fim de obter um produto com as características físico-químicas e organolépticas almejadas - além de um rigoroso controle da qualidade da matéria-prima, é necessário controlar as variáveis nas zonas da secadora, permitindo trocas de calor e massa sem comprometer a estabilidade do alimento. A importância do estudo da influência da matéria-prima e secagem sobre as características do produto decorre do aumento no consumo de massas no Brasil, demandando das indústrias a oferta de volumes elevados com manutenção de altos padrões de qualidade. Um estudo experimental foi realizado visando identificar a influência do processo sobre a qualidade do produto em comparação com a curva padrão de secagem. Foram obtidos dados de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido ao longo do processo, cuja duração medida foi de 09:45 h, através da utilização de sensores TMC50-HD conectados ao *software* Data Logger HOBO U12-006 (sistema de aquisição de dados). Amostras das matérias-primas e produto foram coletadas em diferentes zonas para posterior análise. A massa obtida apresentou umidade de 11,110% (inferior ao recomendado pela literatura); tempo de cocção próximo ao limite máximo estipulado, correspondente a 592 s; coeficiente de incremento de volume e peso, respectivamente, 3,21 e 2,42; e sólidos solúveis iguais a 10,685%, resultando em massa com alta viscosidade sensorial e consistência mediana. A aparência foi definida como regular devido variação no comprimento e a presença de grânulos de remoído na superfície; alta pastosidade (massa flácida) e viscosidade sensorial (pela alta pegajosidade apresentada após cocção); de sabor e odor (consequentemente flavor) satisfatórios em relação ao padrão mínimo e textura e consistência medianas (tendendo a desagregar-se, amontoando após manipulação). O corpo da massa apresentou-se insatisfatório devido ao aumento de peso e volume abaixo do esperado, além da elasticidade mediana (abaixo do esperado) resultante de massa pouco resistente. Estas características resultam da não aplicação de parâmetros estabelecidos para o processo de secagem. Estes resultados demonstram que a qualidade da matéria-prima conjugada ao processo de secagem, com a determinação prévia do diagrama ideal para aplicação em secadora de fluxo contínuo de espaguete, constitui-se como requisito estratégico para a produção de massa com qualidade e características desejadas.

Palavras-chave: alimento, calor, massa, temperatura, umidade.

ABSTRACT

Since the beginnings man has sought ways to rationalize the available resources in order to provide food processing and preservation. Processes such as salting, freezing, drying and acidification have been historically used, giving to the food longer lifetime. The latter arises from the reduction of water activity (A_w), which leads to microbial reduction and the postponement of deterioration. Parameters such as temperature, relative humidity, velocities of the drying air and the food, balance humidity, as well as physical-chemical properties of the raw material will influence the final product quality. In industry this process is achieved utilizing continuous-flow drying machines (specifically for spaghetti). In order to obtain a product with the physical-chemical and organoleptic desired properties, besides a rigorous control of the raw material quality, it is necessary to control the variables in the different dryer machine areas, allowing exchange of heat and mass without compromising the stability of the food. The importance of studying the influence of raw material and drying process on the characteristics of the product derives from the increase in pasta consumption in Brazil, requiring from the industries a release of great volumes maintaining high quality standard. This is an experimental study was conducted to identify the influence of process on the product quality comparing this with the standard drying curve. Data from dry and wet bulb temperature were obtained in the course of process, whose duration was measured 09:45h, using TMC50-HD sensors connected to Data Logger HOBO U12-006 *software* (data acquisition system). Samples of the raw material and final product were collected in different zones for posterior analysis. The pasta obtained had 11,110% humidity (less than literature recommendations); cooking time near the maximum threshold, corresponding to 592 seconds; weight and volume increasing coefficients of 3,21 and 2,42, respectively; and soluble solids percentage of 10,685, resulting in pasta with high viscosity and median consistency. The appearance was defined as regular due to variation in the length and the presence of granules on the surface; high pastiness (flaccid pasta) and viscosity (given the high stickiness found after cooking time); satisfactory flavor regarding the minimum desired standard and median texture and consistency (tending to disintegrate, becoming huddle after manipulation). The pasta body was not satisfactory due to rise in weight, volume and elasticity below the expected, resulting in pasta little resistant. These characteristics result from the non-application of established parameters for the drying process. These results show that the quality of the raw material, added to the drying process with the previous determination of the ideal diagram for application in continuous-flow spaghetti drying machines, is the strategic requirement for the production of pasta with the desired quality and characteristics.

Keywords: food, heat, mass, temperature, humidity.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
SUMÁRIO	I
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VI
NOMENCLATURA	VIII
LISTA DE SIGLAS	X
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
2.1 OBJETIVO GERAL	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 NATUREZA DO TRIGO.....	6
3.2 QUALIDADE DA ÁGUA.....	8
3.3 COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES DA FARINHA DE TRIGO.....	9
3.4 ESPAGUETE.....	35
3.4.1 <i>Processo e Fluxograma</i>	40
3.4.2 <i>Produto</i>	47
3.5 PSICROMETRIA	48
3.6 PROCESSO DE SECAGEM	51
3.6.1 <i>Curvas de Secagem</i>	54
3.6.1.1 Período Inicial.....	55
3.6.1.2 Período de Taxa Constante	56
3.6.1.3 Período de Taxa Decrescente.....	57
3.6.1.4 Transferência de umidade em sólido no período de taxa decrescente.....	58
3.6.2 <i>Cinética de Secagem</i>	60
3.6.3 <i>Métodos de Secagem</i>	65
3.6.4 <i>Secagem de Espaguete</i>	65
3.7 SECADOR.....	66
3.7.1 <i>Principais Elementos</i>	67
4. MATERIAL E MÉTODOS	71
4.1 MATERIAL	71
4.2 MÁQUINA	72
4.2.1 <i>Equipamentos e Softwares</i>	72
4.3 MÉTODOS	73
4.3.1 <i>Coletas e Medições</i>	73
4.3.2 <i>Caracterização das Matérias-primas</i>	76
4.3.2.1 Densidade.....	77

4.3.2.2	Umidade.....	77
4.3.2.3	Cinzas	78
4.3.2.4	Cor.....	78
4.3.2.5	Análise de Glúten	79
4.3.2.6	Análise de Proteínas.....	81
4.3.2.7	Determinação de Lipídeos Totais (Método Soxhlet)	82
4.3.2.8	Determinação do Falling Number	82
4.3.2.9	Granulometria	83
4.3.3	Caracterização do Produto (Instrumental)	83
4.3.3.1	Umidade.....	83
4.3.3.2	Cor.....	84
4.3.3.3	Comprimento e Espessura	84
4.3.3.4	Tempo de Cocção	85
4.3.3.5	Coeficiente de Incremento de Peso e Volume	85
4.3.3.6	Sólidos Solúveis	86
4.3.3.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	87
4.3.4	Caracterização Físico-química e Avaliação Sensorial do Produto.....	88
4.4	DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO	89
4.4.1	<i>Vazão mássica de água evaporada por zona de secagem</i>	<i>90</i>
4.4.2	<i>Calor utilizado para evaporação da água por zona de secagem.....</i>	<i>92</i>
4.4.3	<i>Calor utilizado para aquecimento (ou) resfriamento da massa por zona de secagem</i>	<i>93</i>
4.4.4	<i>Calor utilizado para aquecimento das trocas de ar por zona de secagem</i>	<i>94</i>
4.4.5	<i>Calor fornecido pelos ventiladores</i>	<i>99</i>
4.4.6	<i>Calor total do processo</i>	<i>99</i>
4.4.7	<i>Taxa de Secagem</i>	<i>100</i>
4.4.8	<i>Umidade Livre Crítica.....</i>	<i>101</i>
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	103
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	103
5.1.1	<i>Densidades das Matérias-primas</i>	<i>103</i>
5.1.2	<i>Umidades em Base Úmida e Base Seca</i>	<i>103</i>
5.1.3	<i>Cor das Matérias-primas e Produto.....</i>	<i>105</i>
5.1.4	<i>Teor de cinza dos ingredientes e da massa elaborada</i>	<i>106</i>
5.1.5	<i>Efeitos da Composição da Farinha sobre o Produto</i>	<i>107</i>
5.1.6	<i>Tamanho Médio dos Grânulos da Farinha de Trigo</i>	<i>109</i>
5.1.7	<i>Resultados das Variáveis Reológicas da Farinha de Trigo</i>	<i>110</i>
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO ESPAGUETE	112
5.2.1	<i>Umidade Final do Espaguete</i>	<i>112</i>
5.2.2	<i>Cor do Espaguete.....</i>	<i>112</i>
5.2.3	<i>Características Dimensionais do Espaguete Produzido</i>	<i>112</i>
5.2.4	<i>Coeficiente de Incremento de Peso e Volume.....</i>	<i>114</i>
5.2.5	<i>Tempo de Cocção.....</i>	<i>115</i>
5.2.6	<i>Qualidade da Massa X Sólidos Solúveis.....</i>	<i>115</i>
5.2.7	<i>Efeitos do Processo de Secagem e Farinha sobre a Estrutura do Espaguete.....</i>	<i>117</i>
5.3	ANÁLISES SENSORIAL DO ESPAGUETE	118
5.4	DETERMINAÇÕES DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SECAGEM.....	120
5.4.1	<i>Vazão mássica de água evaporada</i>	<i>120</i>
5.4.2	<i>Calor de evaporação da água.....</i>	<i>122</i>
5.4.3	<i>Calor de aquecimento (ou) resfriamento da massa.....</i>	<i>124</i>
5.4.4	<i>Calor de aquecimento das trocas de ar</i>	<i>128</i>

5.4.5	<i>Calor fornecido pelos ventiladores</i>	132
5.4.6	<i>Calor total absorvido pelo processo</i>	133
5.4.7	<i>Taxa de secagem</i>	134
5.4.1	<i>Umidade Livre Crítica, X_{Cr}</i>	137
5.5	QUADROS GERAIS DA MATÉRIA-PRIMA, PROCESSO E ESPAGUETE OBTIDO	140
6.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	145
6.1	CONCLUSÕES	145
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	148
7.	REFERÊNCIAS	149
8.	ANEXO	155

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CARIOPSE DO TRIGO (QUAGLIA, 1991).....	7
FIGURA 2 – RETENÇÃO DE UMIDADE (PARK, NOGUEIRA, 1992 APUD PARK <i>ET AL.</i> , 2007).....	11
FIGURA 3 – VELOCIDADE DAS REAÇÕES EM FUNÇÃO DA ATIVIDADE DE ÁGUA (LABUZA, 1968 APUD PARK <i>ET AL.</i> , 2008). ..	12
FIGURA 4 – A MOLÉCULA DO CAROTENOIDE LUTEÍNA (BUREAU, 2012)	14
FIGURA 5 – IMAGENS DO AMIDO DE TRIGO (A) AMIDO DE TRIGO NORMAL,.....	17
FIGURA 6 – AMILOSE (FRAÇÃO LINEAR) COMPOSTO POR D-GLICOSES UNIDAS EM A-(1-4) (A) AMILOPECTINA (FRAÇÃO RAMIFICADA) COMPOSTO POR D-GLICOSES UNIDAS EM A-(1-4) E A-(1-6) (B) (DENARDIN E SILVA, 2009).	17
FIGURA 7 – PENEIRAS COM MALHAS DE DIFERENTES DIÂMETROS UTILIZADAS NA ANÁLISE DE GRANULOMETRIA DA FARINHA DE TRIGO (A) PLANSISTER LABORATORIAL CEMEC MODELO CPL 6/20 (B) PESAGEM DE AMOSTRAS.....	28
FIGURA 8 – MODELO DE CURVA ALVEOGRÁFICA COM AS RESPECTIVAS VARIÁVEIS (PIZZINATTO, 1999).	29
FIGURA 9 – ALVEOGRAMAS DE FARINHAS DE TRIGO (A) CURVAS X DIFERENTES PROPRIEDADES DE EXTENSÃO DA MASSA (PIZZINATTO, 1999), (B) ALVEOGRAMAS TÍPICOS PARA DIFERENTES PRODUTOS DERIVADOS DA FARINHA DE TRIGO (JÚNIOR E OLIVEIRA, 1998).	30
FIGURA 10 – CURVAS FARINOGRÁFICAS (A) CURVAS X DIFERENTES PRODUTOS DERIVADOS DA FARINHA DE TRIGO (JÚNIOR E OLIVEIRA, 1998), (B) FARINOGRAMAS DE FARINHAS COM DIFERENTES FORÇAS: FRACA - A, MÉDIA - B, FORTE - C E MUITO FORTE - D (DA ESQ. À DIR.) (PIZZINATTO, 1999).....	31
FIGURA 11 – CURVAS EXTENSOGRAFICAS (A) EXTENSOGRAMA COM INDICAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS (PIZZINATTO, 1999), (B) EXTENSOGRAMAS TÍPICOS DE DIFERENTES PRODUTOS (JÚNIOR E OLIVEIRA, 1998).	33
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO DE FABRICAÇÃO DO ESPAGUETE.....	40
FIGURA 13 – MISTURADOR DA LINHA ML PAVAN 2000 KG/H (A) VISTA EXTERNA (B) VISTA INTERNA DO EQUIPAMENTO. ..	41
FIGURA 14 – ROSCA EXTRUSORA (PAVAN, 2010).	43
FIGURA 15 – FORMAÇÃO DOS FIOS DO ESPAGUETE NA PASTILHA (A) PASTILHA UTILIZADA COMO MOLDE PARA OS FIOS DO ESPAGUETE, (B) EFEITO DA FRICÇÃO NA SUPERFÍCIE DO FIO EXTRUSADO (CIACCO E CHANG, 1986).	44
FIGURA 16 – ESPAGUETE NA SAÍDA DA SECADORA (A) MASSA SECA APÓS SECAGEM, (B) MASSA EM ESTEIRA PARA CORTE. ..	46
FIGURA 17 – OCORRÊNCIA DO PROCESSO DE SECAGEM (PARK <i>ET AL.</i> , 2007).....	53
FIGURA 18 – ESTÁGIOS DA CURVA DE SECAGEM (PARK <i>ET AL.</i> , 2007).	54
FIGURA 19 – CURVA TÍPICA DE SECAGEM DO ESPAGUETE (PAVAN, 2010).	60
FIGURA 20 – ESTÁGIOS DA SECAGEM E ESTABILIDADE DE MASSAS (PAVAN, 2010).....	62
FIGURA 21 – TÍPICA TAXA DE SECAGEM DE ESPAGUETE (PAVAN, 2010).....	62
FIGURA 22 – PERFIS DE TEMPERATURA DURANTE A SECAGEM (PAVAN, 2010).....	64
FIGURA 23 – VENTILADORES DA SECADORA PAVAN ML 2000 KG/H, (A) VENTILADORES MV1, (B) VENTILADOR MV2... ..	68
FIGURA 24 – RADIADORES NA PARTE SUPERIOR DOS TÚNEIS DA SECADORA INDICADOS NA SETA AMARELA, (A) RADIADORES DO ENCARTAMENTO, (B) RADIADORES DO 1º PISO.....	69
FIGURA 25 – DEFLETORES NA PARTE INFERIOR DA PRÉ-SECAGEM (LUCATO, 2009).	70
FIGURA 26 – DUTOS DE EXAUSTÃO DE EXTRAÇÃO DE UMIDADE, (A) DUTOS NA PARTE SUPERIOR DE CADA ZONA DO ENCARTAMENTO, (B) EXAUSTOR CENTRAL DO ENCARTAMENTO.....	70
FIGURA 27 – REGISTROS DAS TEMPERATURAS DE BULBO SECO E ÚMIDO DO PROCESSO DE SECAGEM (A) INSERÇÃO DOS SENSORES TCM50-HD PARA LEITURA DA TEMPERATURA DE B.U E TCM50-HD PARA LEITURA DA TEMPERATURA DE B.S, (B) IMAGEM DOS SENSORES ENTRE O ESPAGUETE, (C) SENSOR DE BULBO SECO À DIREITA E DE BULBO ÚMIDO À ESQUERDA, (D) IMAGEM AMPLIADA COM VISUALIZAÇÃO DA MECHA DE ALGODÃO NO SENSOR PARA LEITURA DE B.U À ESQUERDA.....	74
FIGURA 28 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DOS SENSORES TCM50-HD DE B.S E B.U (A) REGISTRADOR DATA LOGGER IN DOOR U12-006, (B) TRANSMISSÃO DE DADOS AO SOFTWARE HOBOWARE PRO (BHW LITE HOBOWARE, 2010).	75

FIGURA 29 – VARIAÇÃO DAS TEMPERATURAS DE BULBO SECO (B.S) E ÚMIDO (B.U) NO ENCARTAMENTO DA SECADORA, SENDO VISÍVEL 5 ZONAS DE SECAGEM COM 5 PICOS DE TEMPERATURA.....	76
FIGURA 30 – ANÁLISE DA COR NO COLORÍMETRO DIGITAL (KONIC MINOLTA).....	79
FIGURA 31 – GLUTOMATIC GLÚTEN INDEX.....	79
FIGURA 32 – ETAPAS APÓS EXTRAÇÃO (A) CENTRÍFUGA GLÚTEN INDEX MODELO 2015, (B) GLÚTEN APÓS CENTRIFUGAÇÃO, (C) E (D) VISTA DE GLÚTEN (E) SECADOR AUTOMÁTICO GLUTORK MODELO 2020, (F) GLÚTEN SECO.....	80
FIGURA 33 – ANÁLISE DE <i>FALLING NUMBER</i> (A) TRANSFERÊNCIA DA FARINHA E ÁGUA DESTILADA PARA OS TUBOS VISCOSÍMETROS, (B) INTRODUÇÃO DOS TUBOS NO APARELHO.....	83
FIGURA 34 – TEMPO DE COCÇÃO DO ESPAGUETE COM VISUALIZAÇÃO DO HILO CENTRAL INDICANDO COCÇÃO TOTAL.....	85
FIGURA 35 – SOLUÇÃO DE SÓLIDOS SOLÚVEIS EXTRAÍDAS APÓS COCÇÃO DO ESPAGUETE.....	87
FIGURA 36 – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA SUPERSCAN SHIMADZU MODELO SS-550 UTILIZADO PARA REGISTRO DE IMAGENS DO ESPAGUETE.....	87
FIGURA 37 – ESQUEMA GERAL DO PROCESSO DA SECADORA PAVAN COM VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA POR ZONA DE SECAGEM (PAVAN, 2010).....	91
FIGURA 38 – CARTA PSICROMÉTRICA NO INTERIOR DE FÁBRICA EM SALVADOR ATRAVÉS DA INSERÇÃO DAS TEMPERATURAS DE B.S E B.U (DB E WB) NO <i>SOFTWARE</i> CYTSOFT PSYCHROMETRIC CHART 2.2 (CYTSOFT PSYCHROMETRIC CHART, 2009).....	95
FIGURA 39 – CARTA PSICROMÉTRICA NO INTERIOR DE FÁBRICA EM SALVADOR ATRAVÉS DA INSERÇÃO DAS TEMPERATURAS DE B.S E DE B.U NO <i>SOFTWARE</i> DA LST LABORATÓRIO DE SISTEMAS TÉRMICOS (MENDES <i>ET AL.</i> , 2007).....	96
FIGURA 40 – MEDIÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO X_{cr} (A) DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DO ESPAGUETE, (B) DETERMINAÇÃO DA ÁREA DA PLACA FORMADA PELOS FILETES.....	102
FIGURA 41 – UMIDADES MÉDIAS EM BASE ÚMIDA E SECA DAS AMOSTRAS.....	105
FIGURA 42 – TEOR DE CINZAS MÉDIO DA FARINHA, REMOÍDO E MASSA ELABORADA.....	107
FIGURA 43 – GRANULOMETRIA DA FARINHA TIPO COMUM UTILIZADA.....	110
FIGURA 44 – COMPRIMENTO DAS AMOSTRAS DE ESPAGUETE PRODUZIDO.....	113
FIGURA 45 – ESPESSURA DAS AMOSTRAS DE ESPAGUETE PRODUZIDO.....	114
FIGURA 46 – COMPARATIVO DO PADRÃO X REAL DAS VARIÁVEIS FÍSICAS DA QUALIDADE DO ESPAGUETE.....	117
FIGURA 47 – MEV DO ESPAGUETE (A) E (B) IMAGEM AUMENTADA EM 40 X, (C) IMAGEM AUMENTADA EM 200 X, (D) IMAGEM AUMENTADA EM 500 X.....	118
FIGURA 48 – APARÊNCIA DO ESPAGUETE (A) ESPAGUETE APÓS COCÇÃO, (B) FOTOGRAFIA DOS FILETES APÓS COCÇÃO.....	119
FIGURA 49 – VAZÃO MÁSSICA DO ESPAGUETE NAS ZONAS DE SECAGEM.....	121
FIGURA 50 – VAZÃO MÁSSICA DE ÁGUA EVAPORADA NAS ZONAS DE SECAGEM.....	122
FIGURA 51 – CALOR DE EVAPORAÇÃO DA ÁGUA X VAZÃO MÁSSICA DE ÁGUA NA ZONAS DE SECAGEM.....	124
FIGURA 52 – CALOR DE EVAPORAÇÃO DA ÁGUA X TEMPERATURA B.S DO AR NA ZONAS DE SECAGEM DO ESPAGUETE.....	124
FIGURA 53 – COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DO ESPAGUETE NO INÍCIO E FINAL DO PROCESSO.....	127
FIGURA 54 – PERCENTUAL DE COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DO ESPAGUETE NAS ZONAS DO PROCESSO.....	127
FIGURA 55 – CALOR DE AQUECIMENTO OU RESFRIAMENTO DA MASSA.....	128
FIGURA 56 – VAZÃO MÁSSICA DE AR SECO POR ZONA DE SECAGEM.....	130
FIGURA 57 – DIAGRAMA DE SECAGEM DO PROCESSO.....	135
FIGURA 58 – CURVA DE SECAGEM DO ESPAGUETE.....	136
FIGURA 59 – CURVA DE SECAGEM DO ESPAGUETE PADRÃO (TEÓRICO) X REAL NA SECADORA.....	136
FIGURA 60 – UMIDADE EM BASE SECA X TEMPO.....	138
FIGURA 61 – CURVA DE SECAGEM R <i>VERSUS</i> UMIDADE EM BASE SECA.....	138
FIGURA 62 – ANÁLISE SENSORIAL DO ESPAGUETE OBTIDO AO FIM DO PROCESSO.....	144

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – TIPOS DE TRIGO UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DOS DIVERSOS TIPOS DE PRODUTOS.	6
TABELA 2 – FAIXAS DE GELATINIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS AMIDOS.	18
TABELA 3 – PARÂMETROS FARINOGRÁFICOS DE FARINHAS COM DIFERENTES FORÇAS.	33
TABELA 4 – NOX X RESPOSTA A AÇÃO DE OXIDANTES.	35
TABELA 5 – PARÂMETROS EXTENSOGRÁFICOS.	35
TABELA 6 – INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS EXTENSOGRÁFICOS.	35
TABELA 7 – MATERIAIS E REAGENTES UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS E ANÁLISES.	72
TABELA 8 – EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS UTILIZADOS NA PESQUISA.	73
TABELA 9 – VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES DA FARINHA E ÁGUA.	103
TABELA 10 - UMIDADES EM BASE ÚMIDA OBTIDAS PELA MÉDIA ARITMÉTICA DAS UMIDADES DE DIFERENTES AMOSTRAS.	104
TABELA 11 - UMIDADES EM BASE SECA (B.S) OBTIDAS PELA MÉDIA ARITMÉTICA DAS UMIDADES PARA DIFERENTES AMOSTRAS.	104
TABELA 12 – COR DA FARINHA E REMOÍDO DE REPROCESSO OBTIDA EM COLORÍMETRO DIGITAL.	106
TABELA 13 - TEORES DE CINZAS EM BASE SECA OBTIDAS PELAS MÉDIAS ARITMÉTICAS DAS DIFERENTES AMOSTRAS.	106
TABELA 14 – VALOR MÉDIO DO TEOR DE GLÚTEN PARA FARINHA DO TIPO COMUM.	107
TABELA 15 – CLASSIFICAÇÃO DA FARINHA QUANTO À QUALIDADE PELO ÍNDICE DE GLÚTEN.	108
TABELA 16 – PERCENTUAL MÉDIO DE PROTEÍNA TOTAL NA FARINHA DE TRIGO TIPO COMUM.	109
TABELA 17 – PERCENTUAL DE GORDURA NA FARINHA DE TRIGO TIPO COMUM.	109
TABELA 18 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA FARINHA PARA PENEIRAS DE DIFERENTES DIÂMETROS.	109
TABELA 19 – FALLING NUMBER DA FARINHA DE TRIGO TIPO COMUM.	110
TABELA 20 – VALORES DE FALLING NUMBER E A ATIVIDADE DA A-AMILASE.	111
TABELA 21 – VARIÁVEIS OBTIDAS NA ANÁLISE ALVEOGRÁFICA DA FARINHA DE TRIGO.	111
TABELA 22 – VARIÁVEIS OBTIDAS NA ANÁLISE FARINOGRÁFICA DA FARINHA DE TRIGO.	111
TABELA 23 – VALORES DA EXTENSOGRAFIA REALIZADA PARA FARINHA DO TIPO.	111
TABELA 24 - VALOR MÉDIO DA UMIDADE (%H ₂ O) EM BASE SECA DO ESPAGUETE COMUM OBTIDO AO FIM DA SECAGEM.	112
TABELA 25 – ANÁLISE DE QUALIDADE DA COR DO ESPAGUETE EM COLORÍMETRO DIGITAL.	112
TABELA 26 – DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DO ESPAGUETE APÓS SECAGEM.	113
TABELA 27 – DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DO ESPAGUETE APÓS SECAGEM.	113
TABELA 28 – VALOR MÉDIO DO PERCENTUAL DOS SÓLIDOS SOLÚVEIS.	116
TABELA 29 – VARIÁVEIS FÍSICAS DE MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO ESPAGUETE.	116
TABELA 30 - VAZÕES MÁSSICAS DE ESPAGUETE NAS ZONAS D SECADORA PAVAN ML 2000 KG/H A PARTIR DAS UMIDADES EM BASE SECA (B.S).	120
TABELA 31 – VAZÕES MÁSSICAS DA ÁGUA EVAPORADA NAS ZONAS DE SECAGEM.	121
TABELA 32 – VALORES DO CALOR NECESSÁRIO PARA EVAPORAÇÃO DA ÁGUA POR ZONA.	123
TABELA 33 – CONSTITUINTES QUÍMICOS DO ESPAGUETE NO INÍCIO (AMBIENTE EXTERNO DE ENTRADA).	125
TABELA 34 – COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DO ESPAGUETE NA ENTRADA DAS ZONAS.	125
TABELA 35 - FRAÇÕES MÁSSICAS DOS CONSTITUINTES E DO ESPAGUETE FINAL OBTIDO.	126
TABELA 36 – CALOR DE AQUECIMENTO (OU) RESFRIAMENTO DA MASSA NAS ZONAS.	128
TABELA 37 – VAZÃO MÁSSICA DE AR SECO POR ZONA PELAS VARIÁVEIS PSICROMÉTRICAS.	129
TABELA 38 – VAZÕES VOLUMÉTRICAS DO AR EXTRAÍDO E INJETADO EM CADA ZONA.	131
TABELA 39 - VALORES DO CALOR ESPECÍFICO DO AR E DA MASSA DE AR PARA AS ZONAS.	131
TABELA 40 – CALOR DE AQUECIMENTO DAS TROCAS DE AR NAS ZONAS DA SECADORA.	132
TABELA 41 – VARIÁVEIS ELÉTRICAS DOS MOTORES DOS VENTILADORES DA SECADORA.	132
TABELA 42 – QUANTIDADE X TIPO DE VENTILADORES EM OPERAÇÃO POR ZONA.	133
TABELA 43 – CALOR FORNECIDO PELOS MOTORES DOS VENTILADORES PARA AS ZONAS.	133

TABELA 44 – CALOR TOTAL ABSORVIDO PELO PROCESSO.	134
TABELA 45 – DETERMINAÇÃO DA TAXA DE SECAGEM DO ESPAGUETE NO PROCESSO.....	135
TABELA 46 – VARIÁVEIS PARA CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE SECAGEM.....	135
TABELA 47 – VARIÁVEIS DA SECADORA PARA COMPARATIVO REAL X TEÓRICO.	136
TABELA 48 – VALOR MÉDIO DA CONSTANTE LS/A	137
TABELA 49 – NÚMERO DE FIOS DAS PLACAS DE ESPAGUETE PARA CÁLCULO DO X_{CR}	137
TABELA 50 – DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE L_s/A	137
TABELA 51 – VALOR MÉDIO DA CONSTANTE L_s/A	137
TABELA 52 – DETERMINAÇÃO DA CURVA DE SECAGEM R.....	138
TABELA 53 - VARIÁVEIS GERAIS DO PROCESSO DE SECAGEM	143
TABELA 54 - VARIÁVEIS GERAIS DO ESPAGUETE OBTIDO APÓS FINALIZAÇÃO DO PROCESSO	144
TABELA 55 - UMIDADES EM BASE ÚMIDA E BASE SECA OBTIDAS DAS AMOSTRAS APÓS ANÁLISE EM ESTUFA.....	160
TABELA 56 – VARIÁVEIS GERAIS DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS.	161

NOMENCLATURA

a^*_-	Tendência da Cor Para Tonalidade Verde	-
a^*_+	Tendência da Cor para Tonalidade Vermelha	-
a_w	Atividade de Água	-
A	Área	[cm ²]
Aa	Atividade de Água	-
Abs	Absorção de água	[%]
AW	Umidade Absoluta	[kg/m ³]
b^*_-	Tendência da Cor para Tonalidade Azul	-
b^*_+	Tendência da Cor para Tonalidade Amarela	-
C	Comprimento	[mm]
C_p	Calor Específico	[kcal/kg.°C]
Cz _{B.S} (%)	Teor de Cinzas em Base Seca	[%]
Cz _{B.U} (%)	Teor de Cinzas em Base Úmida	[%]
d	Densidade de Ar Seco	[kg _{Ar Seco} /m ³]
dm	Densidade de Mistura de Ar	[kg _{Mistura Ar} /m ³]
D	Comprimento	[mm, µm]
D	Número Proporcional	-
D_{AB}	Coefficiente de Difusividade	[m ² /s]
(dX/dt)	Taxa de Secagem	[kg _{H2O} /kg _{Massa Seca} .h]
(∂X/∂t)	Taxa de Secagem	[kg _{H2O} /kg _{Massa Seca} .min]
$\Delta_{I,P}$	Coefficiente de Incremento de Peso	-
$\Delta_{I,V}$	Coefficiente de Incremento de Volume	-
Δ_t	Varição de Tempo	[s]
Δ_T	Varição de Temperatura	[°C]
∇x	Gradiente de Concentração de Água	[kg _{H2O} /kg _{Massa Seca}]
E	Espessura	[mm]
E	Estabilidade	[min]
E	Extensibilidade	[mm]
f	Fator de correção	-
F.N	Falling Number (Número de queda)	[s]
G	Índice de Inchamento	-
G_I	Teor de Glúten Index	[%]
G_S	Teor de Glúten Seco	[%]
G_U	Teor de Glúten Úmido	[%]
%Gordura	Percentual de Gordura	[%]
%Granulométrico	Percentual Granulométrico	[%]
h	Entalpia Específica da Mistura de Ar	[kJ/kg _{Ar Seco}]
H	Entalpia por massa unitária	[kJ/kg]
i	Corrente Elétrica	[A]
I.e	Índice de elasticidade	-
I.T.M	Índice de Tolerância a Mistura	[U.F]
L	Calor Latente de Vaporização	[kcal/kg]
L	Extensibilidade	[mm]
L	Volume	[L]
L_S	Peso do Sólido	[kg]
L^*	Clareza da Amostra	-
M	Massa	[kg]
MM	Massa Molecular	[Da;u]
m	Massa	[kg]
m_c	Fração Mássica	[%]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/h]
n	Número	[uni]
N	Rotação	[rpm]
N	Normalidade	[N]
N_{Fios}	Número de Fios	[uni]
Nox	Número de oxidação	-
v	Volume Específico	[m ³ /kg _{Ar Seco}]

ρ	Densidade	[kg/m ³]
P	Peso da amostra	[g]
P	Pressão	[Pa]
P	Tenacidade ou Pressão Máxima	[mm]
P _E	Potência Elétrica	[W]
pH	Potencial Hidrogeniônico	-
P/L	Índice de Configuração e Equilíbrio da Curva	-
PM	Peso Molecular	[Da;u]
%Proteína Total	Percentual de Proteína Total	[%]
P ₀	Pressão Parcial de Saturação	[Pa]
P _v	Pressão de vapor	[Pa]
Q	Calor transferido por tempo	[kcal/h]
\dot{Q}	Vazão Volumétrica	[m ³ /h]
%Q _C	Percentual de Qualidade do Comprimento dos Fios	[%]
%Q _E	Percentual de Qualidade da Espessura dos Fios	[%]
R	Resistência a Extensão ou Elasticidade	[U.E]
R	Resistência Elétrica	[Ω]
R	Curva da Taxa de Secagem	[kg _w /h.m ²]
RH	Umidade Relativa do Ar	[%]
RM	Resistência Máxima	[U.E]
%S.S	Percentual de Sólidos Solúveis	[%]
t	Tempo	[s]
t _{CC}	Tempo de Cocção	[min]
T	Temperatura	[°C]
T _{B,S}	Temperatura de Bulbo Seco	[°C]
T _{B,U}	Temperatura de Bulbo Úmido	[°C]
T _O	Temperatura do Ponto de Orvalho	[°C]
t _c	Tempo de Chegada	[min]
t _{DM}	Tempo de Desenvolvimento	[min]
t _Q	Tempo de Queda	[min]
t _s	Tempo de Saída	[min]
T _O	Temperatura de Orvalho	[°C]
U _{B,S}	Umidade em Base Seca	[%]
U _{B,U}	Umidade em Base Úmida	[%]
U.F	Unidades Farinográficas	[gf.m]
UR _{AR}	Umidade Relativa do Ar	[%]
V	Velocidade	[cm/s]
V	Volume	[m ³]
V	Tensão Elétrica	[V]
VP	Pressão de Vapor	[Pa]
X	Teor de Água do Produto	[kg _w /kg _{ms}]
X _{BS}	Teor de Água da Base Seca	[%]
X _{BU}	Teor de Água da Base Úmida	[%]
X _{Cr}	Umidade Crítica	[kg _w /kg _{ms}]
X _{Eq}	Umidade de Equilíbrio	[kg _w /kg _{ms}]
W	Força de deformação da Massa	[10 ⁻⁴ J]
W	Relação de Umidade do ar úmido	[g _{água} /kg _{ar seco}]
W	Umidade Absoluta	[g _{H2O} /kg _{Ar Seco}]
WB	Temperatura de Bulbo Úmido	[°C]

LISTA DE SIGLAS

AACC	American Association for Clinical Chemistry
ABIMA	Associação Brasileira das Indústrias de Massas Alimentícias
ALLEN BRADLEY	Fabricante de controles integrados e plataformas de informação
BRABENDER	Empresa fabricante de instrumentos analíticos de cereais
CHOPIN	Empresa fabricante de instrumentos analíticos de cereais
CNNPA	Conselho Nacional de Normas e Padrões para Alimentos
EMBASA	Empresa Baiana de Água e Abastecimento Sanitário S.A
ICC	Associação Internacional de Ciência e Tecnologia Cereal
KONIC MINOLTA	Empresa fabricante de equipamentos de tecnologia ótica
LST	Laboratório de Sistemas Térmicos
NDSU	North Dakota State University, USA
NIELSEN	Empresa global de informações de mercado
OHAUS	Fabricante de equipamentos de precisão de pesagem
ONSET	Fabricante de equipamentos de monitoramento de dados
PACKARD BELL	Fabricante de bens de consumo eletrônicos
PAVAN GROUPS	Fabricante Italiana de Secadoras de Massas
PERTEN INSTRUMENTS	Fabricante de instrumentos analíticos para análises em alimentos
QUIMIS	Fabricante de aparelhos para laboratórios químicos
RAYTEC	Empresa fabricante de dispositivos de medição
SHIMADZU CORPORATION	Empresa fabricante de instrumentos de medição analítico
TECMILL	Empresa de tecnologia em moagem industrial
TECNAL	Empresa fabricante de equipamentos para laboratórios
TRIPETTE & RENAUD	Fabricante de equipamentos para produtos granulados
UEFS	Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia - BR
UFBA	Universidade Federal da Bahia, Bahia – BR
VILMA ALIMENTOS	Indústria Brasileira Alimentícia

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios o homem percebeu a necessidade de desenvolver métodos que fossem capazes de aumentar o tempo de vida dos alimentos. O uso do fogo, congelamento, acidificação, fermentação e *secagem* são alguns procedimentos utilizados há milhares de anos e que ao longo dos tempos foram aperfeiçoadas às formas modernas hoje praticadas pela indústria.

A cocção era percebida desde o uso do fogo nas sociedades primitivas, facilitando a digestão, conferindo atributos sensoriais como sabor e aroma e reduzindo o risco de doenças infecciosas pela contaminação com alimentos in natura. Esta simples operação alargou o tempo de vida dos alimentos, dando maior estabilidade e disponibilidade (Pimentel e Pimentel, 1990).

As várias técnicas de conservação dos alimentos permitiram a racionalização dos recursos e conferiram maior vida útil, redução da atividade de água (A_w), diminuição dos microrganismos e o retardamento da deterioração, motivos pelos quais a secagem constitui-se como método bastante empregado nos processos industriais pela eficiência e aplicação, sendo este processo aplicado na fabricação das massas alimentícias.

A secagem do espaguete consiste na remoção de água até limites predefinidos por lei, sendo que as variáveis físico-químicas das matérias-primas (em especial da farinha de trigo) aliadas as variáveis envolvidas no processo (temperatura; umidade relativa, velocidade de escoamento do ar de secagem e umidades de equilíbrio), são parâmetros decisivos na formação e qualidade do produto final.

Como a qualidade da farinha exerce influências significativas sobre o produto, a extração desta do trigo deve ocorrer sob rígido controle, possibilitando a obtenção de uma matéria-prima de acordo com as especificações estabelecidas. A qualidade será diretamente proporcional ao trigo que a originou e ao processo de moagem, como exemplo; quanto maior for à quantidade *versus* qualidade do teor proteico presente nos grãos

(responsável pela formação da rede de glúten), maior será a qualidade da farinha, e conseqüentemente, a qualidade para fabricação das massas.

Outras variáveis como a extensibilidade, resistência, absorção de água, cor, teor de cinzas, umidade, energia, força, entre outros; refletem diretamente na escolha e determinação do tipo de trigo para a fabricação dos diferentes produtos. Trigos do tipo *duros* e *durum* são os recomendados para fabricação das massas (o primeiro utilizado na pesquisa em estudo).

Todas as variáveis de interesse referente à matéria-prima são monitoradas e controladas na moagem, somados a um controle rigoroso desde a mistura dos ingredientes até resfriamento final da massa conforme o diagrama ideal de secagem, visando a obtenção do produto dentro dos padrões.

Industrialmente, os equipamentos utilizados para a secagem do espaguete são secadoras, que no caso em estudo é da marca PAVAN modelo ML 2000 kg/h de fluxo de carga contínuo. As variáveis de processo são controladas nas diversas *zonas de secagem* existentes ao longo da máquina que é constituída por ventiladores, radiadores, defletores e exaustores; permitindo trocas de calor e massa com a conseqüente extração de água, a fim de produzir o espaguete com estabilidade e formato adequados. As etapas gerais do processo compreendem a dosagem, mistura, extrusão, trefilação, corte, pré-secagem, secagem, resfriamento, corte final e envase.

Na presente pesquisa um estudo psicrométrico foi realizado visando estabelecer a constituição física do ar utilizado no processo. A energia era introduzida na máquina pelo calor sensível do ambiente, aquecedor externo (caldeiras) e o calor sensível do material úmido. Como a vazão em massa na entrada era resultante do somatório da vazão em massa de material seco e a vazão em massa de umidade, o calor introduzido com o material úmido foi quantificado. Ao conduzir calor à superfície dos radiadores, o ar de ventilação recebia carga térmica e transferia esta carga ao espaguete promovendo a secagem.

Foram realizados cálculos do processo visando à determinação das vazões de água evaporada, cálculos do calor específico, da quantidade de

calor de aquecimento/ resfriamento da massa, do calor de aquecimento das trocas de ar, do calor liberado pelos ventiladores, do calor total absorvido pelo processo, da taxa de secagem e da umidade livre crítica. Quanto ao balanço de massa, a umidade introduzida na secadora era formada pela umidade que adentrava à secadora (do material úmido e do ar ambiente), enquanto que a umidade de saída era igual a umidade do material seco, a umidade no ar de exaustão e a umidade da água condensada.

Estes fluxos, a saber, de transferência de calor dos radiadores para massa e da subseqüente transferência de massa através da absorção de água carregada pelo meio externo (ar de secagem), permitiram a ocorrência do processo. Estes fluxos possibilitaram a origem da “*curva de secagem*”, com os valores de umidade do produto, temperatura do ar e umidade relativa (todos em função do tempo), visando obter um paralelo entre a curva real e a curva padrão do espaguete, viabilizando o cálculo da taxa de secagem em todos os estágios, permitindo o entendimento da cinética da secagem, bem como, a definição da umidade livre crítica (X_{Cr}).

O controle adequado das variáveis das matérias-primas e processo de secagem possibilita a obtenção de um produto que atenda os requisitos legais e produtivos no que tange as características físicas, químicas e microbiológicas a exemplo da cor, umidade, comprimento, espessura, tempo de cocção, coeficiente de aumento de peso e volume, teor de sólidos solúveis e morfologia; além das características organolépticas (textura, flavor, aparência, consistência, corpo, pastosidade, elasticidade, entre outros). Ao fim do trabalho foi apresentado um quadro geral das variáveis referentes à matéria-prima, processo e produto, permitindo concluir os efeitos destas na formação do espaguete.

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Massas Alimentícias, o volume de massa seca produzida no Brasil foi de 1.007.000 ton (total de 1.232.000 ton em 2010 somando as massas instantâneas e frescas), com faturamento de R\$ 3.692.000.000. O consumo *per capita* de massa seca no Brasil (kg/hab/ano) em 2010 foi de 5,2; massas instantâneas 0,9 e massas frescas 0,2. Em relação à produção mundial de massas (2010), a Itália lidera

com 3.194.152 ton/ano, seguido dos Estados Unidos com 2.532.809 e em terceiro o Brasil com 1.300.000, embora no consumo per capita, o Brasil ocupe posição distante. Esse aumento foi resultado das mudanças nos padrões de consumo principalmente da classe C, sob influência da expansão do mercado de trabalho, maior poder de compra dos salários e ampliação das linhas de crédito (Abima e Nielsen, 2010).

Existe uma relação direta entre o preço e a quantidade que os ofertantes estão dispostos a oferecer de um bem ou serviço, sendo que a disposição de ofertar é influenciada por fatores como a tecnologia de produção, preços dos insumos e dos bens substitutos, os números de concorrente, as expectativas quanto ao futuro dos negócios, os tributos, subsídios e a regulamentação do governo. Observando estes fatores, destaca-se a tecnologia de produção, sendo necessária a produção com menor custo e maior qualidade, conferindo um diferencial competitivo visando o atendimento do mercado com maiores margens e *marketing-share* (Gonçalves *et al.*, 2010).

O consumo de espagete no Brasil, portanto, aumentou significativamente, visível pelo surgimento de novas empresas no cenário nacional além da vinda de grupos estrangeiros de relevância no segmento. O fácil preparo ligado ao baixo custo (somado as facilidades de crédito das classes C e D) elevou o consumo das massas, ampliando o crescimento industrial do segmento. Para atender esta demanda as empresas aumentaram as suas capacidades fabris com a instalação de modernas linhas de secagem, investiram na melhoria dos processos com foco na redução do *custo produtivo x eficiência*, possibilitando maior concorrência num mercado cada vez mais competitivo.

Neste aspecto este trabalho apresenta-se como um referencial de análise do processo fabril, permitindo um *link* entre as características da farinha de trigo e o processo de secagem na fabricação de espagete, visando melhor entendimento e fundamentação científica dos mecanismos para a obtenção da melhoria da qualidade final do produto.

2. OBJETIVOS

2.1 **Objetivo Geral**

Analisar o processo de secagem de espaguete na linha industrial do fabricante PAVAN - Modelo 2000 kg/h, verificando as influências da matéria-prima e das variáveis do processo na qualidade do produto final.

2.2 **Objetivos Específicos**

- Determinar as variáveis físico-químicas das amostras da farinha de trigo do tipo duro utilizada no processo de secagem.
- Determinar variáveis de processo de fabricação do espaguete na secadora PAVAN 2000 kg/h.
- Avaliar a influência da farinha de trigo e do processo de secagem na qualidade do produto final.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Natureza do Trigo

De acordo com Benassi e Watanabe (1997), o trigo é uma planta de ciclo anual cultivada no inverno e primavera, e os grãos são consumidos através dos pães, massas, bolos, biscoitos ou ração animal (qualidade inferior).

O trigo representa 33% dos cereais colhidos. Pertencente à família das gramíneas, é uma planta herbácea cientificamente conhecida por *Triticum vulgare* com enorme variedades (*Triticum aestivum*, *Triticum vulgare* e *Triticum durum*), classificando-se como trigo duro ou forte; mole ou fraco; branco e *durum* (*este proveniente da espécie acima*). A farinha do trigo durum possui alto teor proteico, bastante satisfatório para fabricação das massas (Moretto e Fett, 1999).

Entre as décadas de 60 e 80, enquanto a importação de trigo no Brasil apenas duplicou, a produção nacional de trigo aumentou em quase 25 vezes, saindo de 221.576 ton/ano para 5.534.794 ton/ano. Neste sentido houve um aumento da participação do trigo importado de 89,56% em 1965 para 28,12% em 1986, ao passo que a produção nacional saltou de 10,44% para 71,88%. Em relação ao consumo per capita (kg/habitante), houve um aumento de 45,25%, elevando de 35,8 kg/habitante para 52,0 kg/habitante (Garcia *et al.*, 1990). Júnior e Oliveira (1998) apresentam a melhor destinação dos tipos de trigo para cada tipo de produto na Tabela 1, e na Figura 1 a cariopse do trigo.

Tabela 1 – Tipos de trigo utilizados na produção dos diversos tipos de produtos.

Grupos de trigos aplicados aos diversos tipos de produto			
Durum	Duro	Semi-duro	Mole
Massas Alimentícias	Massas Alimentícias e panificação	Panificação e biscoitos fermentados	Biscoitos doces e bolos

Fonte: (Júnior e Oliveira, 1998)

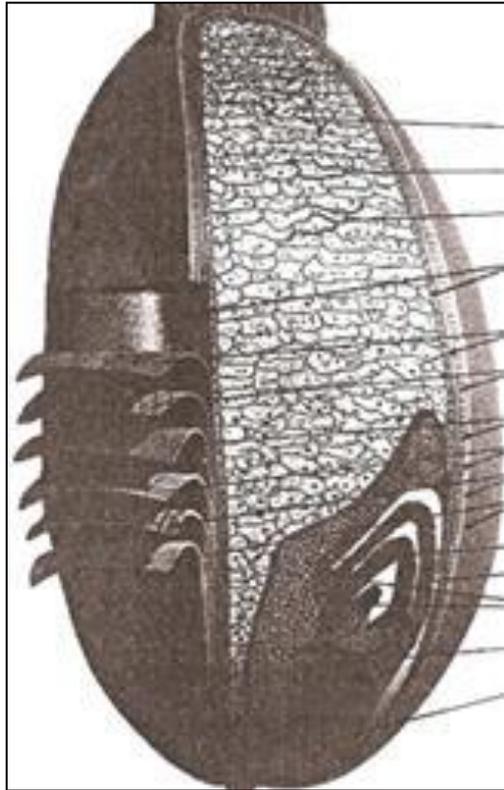


Figura 1 – Cariopse¹ do trigo (Quaglia, 1991).

A distribuição dos constituintes químicos nas partes do grão divide-se no *pericarpo* (média de 5% do peso do grão) - rico em pentosanas, celulose e cinzas; *endosperma* (82%), basicamente o amido, sendo que a parte externa (subaleurona) apresenta maior concentração de proteína que a interna, e, o *germe* (3%), contendo alto conteúdo de lipídios, proteínas, açúcares redutores e cinzas.

Na moagem de grãos de trigo, o principal objetivo é a extração do endosperma amiláceo através de fragmentações e separações em moinhos de rolos (denominados de banco de cilindros), conhecido como processo de reduções sucessivas (Rossi e Neves, 2004).

Em relação ao gérmen, Elstow e Wallington (1993) referem-se a eles como sendo os embriões separados dos grãos de trigo no processo de moagem, com teor de proteína relativamente alto, tal como de gorduras e enzimas. De acordo com Benassi e Watanabe (1997), o gérmen é utilizado em

¹ *Cariopse* é um fruto com uma semente presa ao pericarpo em toda extensão.

produtos alimentícios, cosméticos e farmacêuticos, porém em sua grande maioria é incorporado ao farelo destinado a ração.

3.2 Qualidade da Água

A água possui alta capacidade térmica e calor específico; evapora com facilidade quando submetida a pressões moderadas (permitindo uma alta geração de calor pelo vapor); é de fácil disponibilidade e baixíssimo custo, sendo ingrediente fundamental na fabricação das massas; devendo ainda possuir características de potabilidade (inodora, incolor e insípida), apta ao consumo humano, isenta de contaminantes físicos, químicos e agentes patogênicos (Pavan, 2010).

Nas tabelas (*Características de água potável e Parâmetros da água potável por classe*), segundo decreto legislativo 31/01 Italiano, aparecem variáveis da salubridade da água para fabricação de massas definida pela normativa europeia 98/83/CE, delimitando os constituintes químicos e biológicos para água potável. A água de mistura, que apresenta dureza média devido presença de baixos teores de sódio (Na), cloro (Cl) e magnésio (Mg) e baixíssima concentração de ferro (Fe), proporciona ao espagete os melhores resultados organolépticos, conforme tabela contida na mesma referência por título *Constituintes químicos da água de dureza média* (Pavan, 2010).

Segundo Oliveri e Costa (1994), deve-se atentar ao teor de cloro na água que pode oxidar as pigmentações coloridas da massa. As características da água de cocção possui notável influência na qualidade da massa, sendo que a água destilada melhora a qualidade de cocção. Em relação à dureza, quanto maior pior, pois concentra o conteúdo de cinzas podendo danificar os mecanismos de dosagens, gerando reflexos brancos sobre a massa em determinados pontos. De acordo com Ciacco e Chang (1986) para as massas alimentícias, é recomendado água com 30% de dureza, baixo teor de magnésio, íons de cloreto, sódio e o menor teor possível de ferro.

3.3 Composição e Propriedades da Farinha de Trigo

Pelo Decreto N.º 12.486 de 20 de outubro de 1978 São Paulo (1978) referente às Normas Técnicas Especiais Relativas a Alimentos e Bebidas, a farinha de trigo é definida como sendo o “*produto obtido pela moagem, exclusivamente, do grão de trigo Triticum Vulgare, beneficiado*”, fabricadas a partir de grãos de trigo sãos e limpos, em perfeito estado de conservação, não podendo estes estar úmidos, fermentados ou rançosos, sendo designado o produto simplesmente por “*farinha*” ou “*farinha de trigo*”; classificada com base em suas características, a saber:

- Farinha integral: produto obtido a partir do cereal limpo com máximo de extração de 95%, e com teor de cinza máximo de 1,750%.
- Farinha especial ou de primeira: produto obtido do cereal limpo, desgerminado, com máximo de 20% e 0,385% (de extração e cinzas).
- Farinha comum: produto obtido a partir do cereal limpo, desgerminado, com máximo de extração de 78% ou 58%, após a separação dos 20% da farinha de primeira, com 0,855% de teor máximo de cinza.

A farinha de trigo utilizada na fabricação do espaguete comum (objeto de estudo desta pesquisa) é a farinha de trigo do tipo comum, sendo ainda classificada de acordo com o decreto São Paulo (1978) nas características organolépticas como sendo um pó fino de cor ligeiramente cinza amarelada e de cheiro e sabor próprio.

Conforme Benassi e Watanabe (1997), a farinha de trigo é obtida da redução dos grãos de trigo a pó. A qualidade da farinha possui correlação com o trigo que a originou e a extração na moagem.

Segundo Benassi e Watanabe (1997), em geral, a qualidade tecnológica da farinha aumenta quanto maior é a proporção de proteína formada de glúten – que é maior quanto menor for o grau de extração da farinha, pois baixo grau de extração indica que a farinha foi extraída mais ao centro do endosperma.

De acordo com Oliveri e Costa (1994), um aditivo que normalmente é

misturado à farinha na fabricação das massas é o *remoído de reprocesso*², que é uma pulverização de massa reprocessada com tamanho médio das partículas de 300 micra, a qual se recomenda o máximo de 5%, pois facilmente pode resultar em pontos brancos, destinada as massas para sopa (até 15%) ou massas com menor exigência de cozimento.

Umidade

De acordo com Oliveira *et al.* (2008) o teor de umidade do produto pode ser definido como a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria, podendo ser removida do material sem alteração na estrutura molecular do sólido.

O conteúdo (percentual) de umidade dos alimentos geralmente é expresso por unidade de peso de matéria seca e umidade (combinados) como sendo o peso úmido (Dalglish, 1993).

Nos alimentos a determinação da umidade é importante, pois está relacionada com a qualidade, estabilidade e composição, interferindo diretamente na estocagem, embalagem e processamento (Park e Antônio, 2006).

A proporção entre a massa de água e a massa da matéria seca refere-se ao conteúdo de umidade de um produto. Esta expressa à quantidade de água que pode ser removida do material sem que haja alteração da estrutura molecular do sólido, comumente expresso de duas formas (Park *et al.*, 2007):

- Base Úmida, ($U_{B.U}$): em relação a massa total do produto, com utilização em designações comerciais, armazenamento, etc.
- Base Seca, ($U_{B.S}$): em relação a massa seca do produto, com utilização em trabalhos de pesquisa e equações de secagem.

A análise do teor de umidade (% H_2O) tem como objetivo determinar o teor de água livre presente no alimento. É caracterizada pela perda de massa sofrida pelo material quando aquecido sob condição teste. Park e Antônio

² Denomina-se *remoído de reprocesso* toda massa com deformação obtida ao fim da linha que é pulverizada e reaproveitada sendo adicionada à farinha na prensa para retorno ao processo.

(2006) citam que no alimento a água poderá estar presente de duas formas:

- Água livre: é a água adsorvida no alimento (mais abundante), facilmente removida às temperaturas em torno do ponto de ebulição da água.
- Água ligada: é a água da constituição química do alimento, da estrutura, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas coloidais, necessitando de temperaturas elevadas para remoção que, a depender da natureza da amostra, demanda temperaturas diferentes, que geralmente não é total, sendo que em alguns casos não é removida nem em temperaturas que carbonizem parcialmente a amostra.

Sobre a diferença entre estes conceitos, enquanto a *água livre* de um produto úmido (ou das soluções diluídas de células que não representam nenhum obstáculo à difusão - quando iniciado a secagem) está relacionada ao processo inicial da desidratação, a *água ligada* refere-se àquela conectada física e quimicamente as moléculas do produto, não estando disponível para as reações de ordem físico-químicas e microbiológicas (Dalglish, 1993).

Park *et al.* (2007) comentam que a diferença do teor de água inicial e do conteúdo de umidade de equilíbrio no produto é a *força motriz* para transferência de massa na secagem. A Figura 2 – **Retenção de umidade** faz a relação entre a retenção de umidade em função do conteúdo de umidade versus a atividade de água.

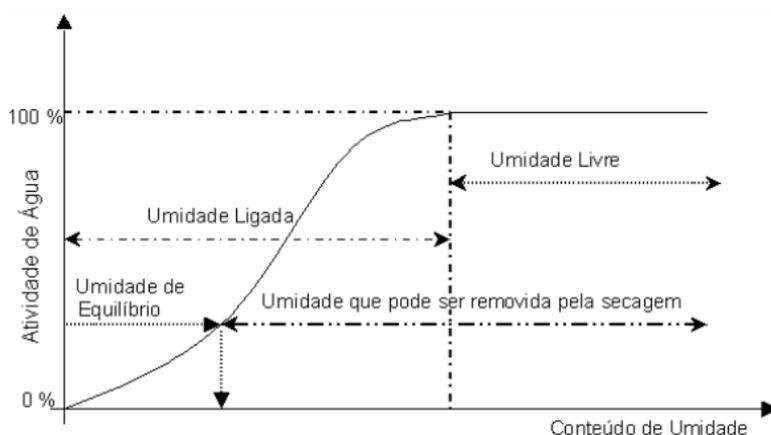


Figura 2 – Retenção de umidade (Park, Nogueira, 1992 apud Park *et al.*, 2007)

Outros conceitos importantes é a *umidade relativa de equilíbrio* e a

atividade de água. Segundo Ranken (1993) a umidade relativa de equilíbrio do produto é aquela em que o produto nem absorve nem cede umidade, e, pela natureza dos produtos desidratados (que possuem umidade relativa de equilíbrio baixa, geralmente inferior a 30% - $A_a=0,30$), a proteção do alimento contra a absorção de umidade é de suma importância.

Dagleish (1993) define a atividade de água como a relação entre a pressão de vapor de um alimento e a pressão de vapor da água pura à mesma temperatura ($a_w=P/P_0$). Geralmente é considerada como a *disponibilidade* de água para reações químicas, enzimáticas e microbianas. Na Figura 3 está apresentada a correlação entre a velocidade das reações com a a_w .

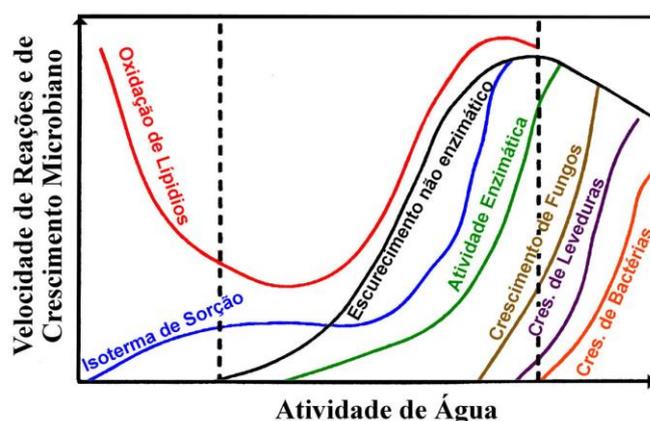


Figura 3 – Velocidade das reações em função da atividade de água (Labuza, 1968 apud Park *et al.*, 2008).

O principal objetivo do processo de secagem (que será discutido com mais profundidade mais adiante) será justamente a redução da atividade de água de diversos materiais perecíveis para valores abaixo de 0,5 permitindo a sua armazenagem a temperatura ambiente (Bonazzi e Dumoulin, 2011).

Park *et al.* (2006) citam que os produtos são classificados em perecíveis (alto teor de água como frutas, legumes e vegetais) e deterioráveis (teor de água entre 15% e 30% na época de colheita) como os grãos.

Cinzas

Segundo Park e Antônio (2006) as cinzas de um alimento é o resíduo inorgânico que permanece após incineração da matéria orgânica, com grandes

quantidades de Na, K, Ca e Mg e pequenas de Fe, Al, Mn, Cu e Zn e traços de I, Ar, F e outros elementos, apresentados na forma de óxidos, fosfatos, sulfatos, silicatos e cloretos, que varia com a incineração e composição.

De acordo com Pizzinatto (1999) o teor de matéria mineral é o principal parâmetro de identidade dos tipos de farinha produzidos no Brasil, classificando as farinhas em comum, especial e integral, e, conforme Ciacco e Chang (1986), podem-se definir as cinzas como resíduos minerais originados principalmente do pericarpo (casca do grão), sendo um indicador da quantidade de farelo na farinha, com relação direta com o grau de extração.

Benassi e Watanabe (1997) corroboram que com a redução do teor de cinzas, as farinhas, em geral, tornam-se mais claras (embora teor cinza e cor não estejam diretamente relacionados), sendo que pequenas variações no teor de cinza podem provocar grandes variações na cor, embora uma farinha de cor mais escura não necessariamente possua um maior teor de cinzas.

Pearson (1998) e Pizzinatto (1999) citam que uma vez que o teor de fibras e cinzas no farelo é maior que no endosperma (considerando que a casca do trigo possui mais material mineral que o interior do endosperma), o teor de cinza fornece uma ideia do grau de extração das farinhas (quanto maior a extração maior o teor de matéria mineral), de modo que o teor de minerais também pode ser utilizado como parâmetro de qualidade da farinha.

Altos teores de cinzas indicam inclusão de farelo à farinha, pois confere cor mais escura ao produto, propiciando ainda quebras durante a secagem e má cocção da massa. Havendo baixa contaminação pelo farelo, a farinha possuirá cor mais clara e maior preferência pelo mercado consumidor.

O espagete tipo comum analisado possui cor mais escura que o espagete especial, fator ligado ao teor de cinza (maior que das massas especiais), mais claras, portanto, em partículas maiores deve-se cuidar para que os pedaços de casca do trigo não contaminem a farinha. Essas partículas (principalmente as fibras) quebram a continuidade da rede de glúten, enfraquecendo o produto e provocando os rompimentos da massa.

Cor

Segundo Rees e Bettison (1994), a cor de um alimento é determinada pela estabilidade ou estado de alguns pigmentos naturais (compostos instáveis que se decompõem sob ação do calor), pigmentos adicionados ou coloração desenvolvida no armazenamento. Existem classes e tipos de pigmentos naturais, sendo que o β -caroteno (classe dos carotenoides) está presente em trigo. Os carotenoides são lipossolúveis e determinam as cores amarelo, laranja e vermelho, sendo ainda insaturados susceptíveis de serem oxidados resultando em descolorações e sabores desagradáveis.

Oliveri e Costa (1994) citam que do ponto de vista molecular a cor relaciona-se a quantidades de pigmentos coloridos; açúcares redutores; composição e quantidade de sais minerais e proteínas. Quando maior o teor proteico maior a interação, seja na fase de extrusão com tendência de perda de cor (a massa de grão duro é mais susceptível, pois é submetida a maiores ações mecânica) ou na secagem.

De acordo com Ciacco e Chang (1986), existe um pigmento (carotenóide), a *luteína*, presente no trigo durum, em concentração razoável e responsável pela coloração amarela, ao passo que na semolina comum esse pigmento não é suficiente, motivo pelo qual nas massas especiais adiciona-se ovo e corantes (em especial urucum), e na massa comum a cor é oriunda das cinzas e do processo de secagem.

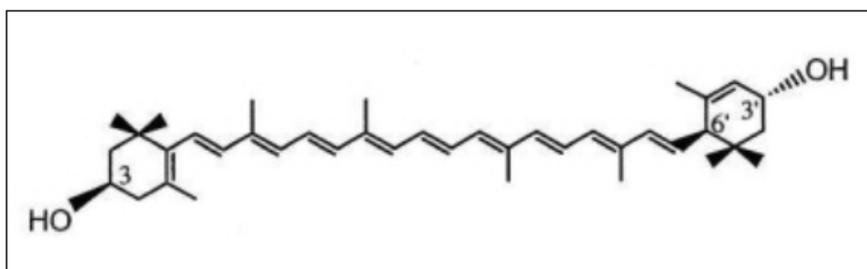


Figura 4 – A molécula do carotenoide luteína (Bureau, 2012)

Ciacco e Chang (1986) comentam que a cor das massas é o fator mais importante para a comercialização. A semolina do trigo duro (trigo *turgidum* var.

Durum) é de grande consumo mundial devido a cor amarela característica resultante da presença de pigmentos carotenóides, e corpo mais duro (razão da expressão “*al dente*”); sendo a cor determinada subjetivamente pelo consumidor (influenciada pelo tamanho das partículas), uma vez que as finas refletem maior quantidade de luz, e geralmente possui aparência mais branca que as maiores. As variáveis L^* , a^* e b^* obtidas pelo colorímetro, representam:

- L^* = claridade da amostra, onde **0** é o *preto total* e **100** o *branco total*
- a^*_+ / a^*_- = tendência de cor para a tonalidade vermelha e verde na ordem.
- b^*_+ / b^*_- = tendência de cor para a tonalidade amarela e azul na ordem.

A cor da massa depende fundamentalmente dos índices de amarelo (b) e do L , sendo que estes índices estão relacionados com características genéticas, agrônômicas, de moagem e condições de secagem; sendo que a cor amarela está relacionada à presença de pigmentos carotenóides que são afetados pela atividade da lipoxigenase (Maache-Rezzoug e Allaf, 2009).

Oliveri e Costa (1994) relatam que o valor de L (luminosidade da amostra) refere-se à quantidade de luz refletida da amostra, com o índice de a que representa a cor vermelha da farinha (cor da massa), e b a intensidade da cor amarelo. Se a secagem ocorre à temperatura muito elevada, a cor pode ser modificada de amarelo para vermelho, logo, muita pigmentação amarela pode provocar resultado negativo, pois o índice de vermelho sendo elevado, a massa será mais escura. Para valores mínimos, a farinha não pode ter o índice de vermelho (a) maior que 1,10% e o índice de amarelo (b) deve ser menor que 21%.

A secagem em ambiente com alta umidade relativa (diagrama a 60°C), resulta em escurecimento do produto tendendo a coloração castanha (índice de a); que é maior quanto mais alto for o conteúdo de amido danificado (por este possuir açúcares simples que propiciam um escurecimento singular). O aumento de proteína também resulta em maior escurecimento da cor da farinha, sobretudo no *índice de a* (Oliveri e Costa, 1994).

Carboidratos

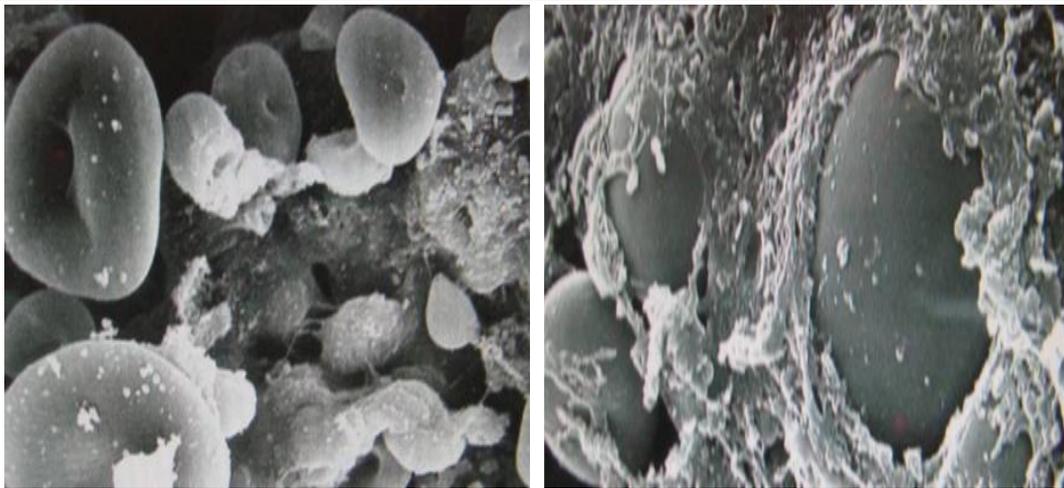
Conforme Benassi e Watanabe (1997) e Vilma Alimentos (2011) os carboidratos ou *sacarídeos*, são compostos orgânicos formados pelos átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio, podendo ser classificados pelo número de moléculas que compõe a sua estrutura em monossacarídeo, dissacarídeo e os polissacarídeos, formados pela união de mais de duas moléculas de monossacarídeos, exemplo do amido, formado pela união de várias moléculas de glicose. Segundo tabela de *Composição média dos carboidratos das diferentes frações do trigo* (Benassi e Watanabe, 1997), pode-se verificar a distribuição dos carboidratos nas partes do trigo, sendo que os açúcares presentes são a maltose, frutose, sacarose, xilose rafinose e arabinose.

Rees e Bettison (1994) reforçam que comparado aos demais constituintes dos alimentos, os carboidratos são menos susceptíveis as alterações químicas nos processos térmicos, contudo, o calor provoca alguns efeitos como a relação entre o amido, textura e sabor dos alimentos; o favorecimento da digestibilidade dos alimentos devido à gelatinização do amido e ainda o efeito dos açúcares sobre a biodisponibilidade da proteína e do ferro.

Amido

Segundo Uhlig (1998) o amido é o maior componente, e uma das principais fontes de energia dos alimentos (Figura 5). Produtos a base de amido são obtidos dos grãos, raízes e tubérculos. Conforme Benassi e Watanabe (1997), ele é constituído de duas frações: *amilose* e *amilopectina*, polissacarídeos compostos por moléculas de glicose (conforme Figura 6), ligadas entre si através da ponte de hidrogênio na proporção de 1:3.

O amido é um polímero formado pelas moléculas de glicose, e compreende a reserva básica de carboidratos nos vegetais (Rees e Bettison, 1994). Elstow e Wallington (1993) ainda complementam que na amilose as moléculas de glicose estão unidas através de uma disposição linear na cadeia, ao passo que a amilopectina é disposta em uma estrutura ramificada.



(a) (Pavan, 2010)

(b) (Pavan, 2010)

Figura 5 – Imagens do amido de trigo (a) Amido de trigo normal, (b) Amido de trigo com glúten forte.

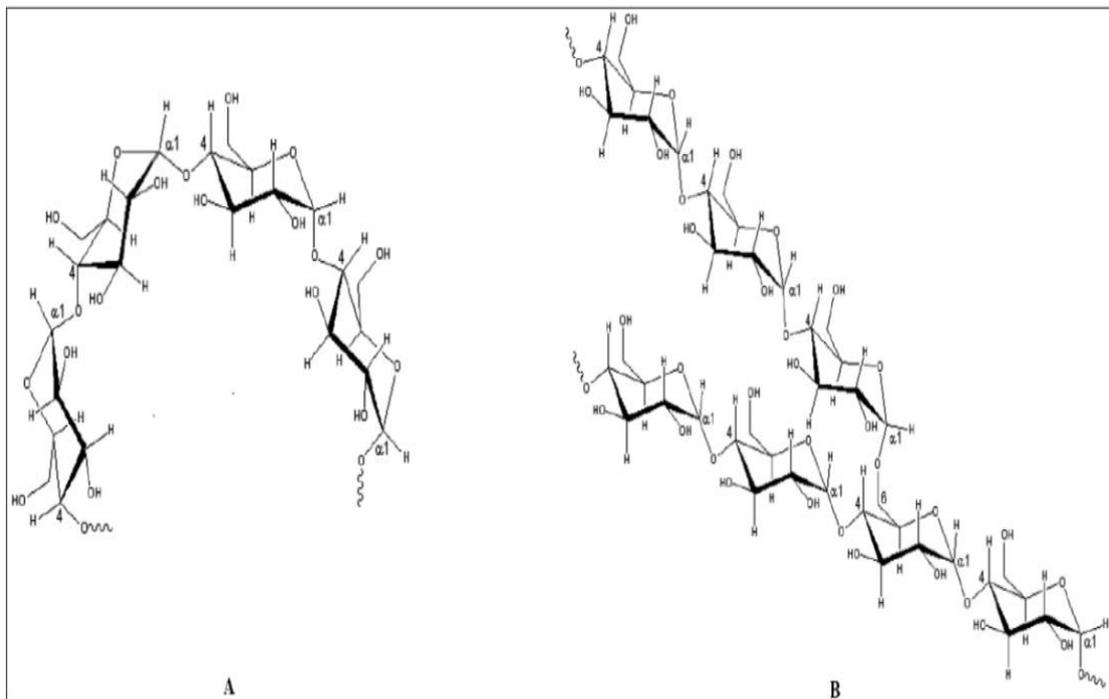


Figura 6 – *Amylose* (fração linear) composto por D-glicoses unidas em α -(1-4) (A) *Amylopectina* (fração ramificada) composto por D-glicoses unidas em α -(1-4) e α -(1-6) (B) (Denardin e Silva, 2009).

- Processo de gelatinização e retrogradação do amido

De acordo com Mastromatteo *et al.* (2012) a viscosidade da massa de farinha de trigo é diretamente influenciada pelo grau de gelatinização do amido que ocorre após aquecimento em meio aquoso.

Uhlig (1998) comenta que o amido quando aquecido em água “*incha*”, pois a gelatinização alcança a temperatura específica para esta reação bioquímica. A absorção de água acarreta um aumento de viscosidade além de mudanças químicas e vulnerabilidade enzimática do amido.

Oliveri e Costa (1994) chamam atenção ao fato que a gelatinização do amido deve ser retardada até o momento da cocção, com temperatura da água em torno de 100 °C, que migrará e inchará os grânulos inteiros (outrora já retidos pelo retículo proteico e com as proteínas coaguladas), conferindo aspecto de produto cozido, sendo que segundo Benassi e Watanabe (1997), para cada tipo de amido existe uma faixa ótima de temperatura que resulta no aumento da viscosidade sensorial. Na Tabela 2 pode-se observar a faixa de temperatura de gelatinização de alguns alimentos, com destaque o trigo:

Tabela 2 – Faixas de gelatinização dos principais amidos.

Fonte de amido	Faixa de gelatinização (°C)
Cevada	51 – 60
Aveia	53 – 59
Triticale	55 – 62
Centeio	57 – 70
*Trigo	58 – 64
Milho	62 – 72
Arroz	68 – 78
Sorgo	68 - 78

Fonte: (Benassi e Watanabe, 1997)

Elstow e Wallington (1993) afirmam que embora o amido seja insolúvel em água fria, o aquecimento dos grânulos de amido - além de resultar no inchamento dos grânulos pelo calor em presença de água (*gelatinização*), podem romper-se, liberando porções internas que se dissolvem na água aquecida. O fenômeno da *retrogradação* ocorre quando a solução de amido é,

transformando-se em uma pasta espessa, promovendo a reorganização das cadeias de amilose e amilopectina após resfriamento do amido gelatinizado.

Segundo Benassi e Watanabe (1997) na proporção em que ocorre a redução da temperatura por via do congelamento (principalmente) ou refrigeração, as cadeias de amido interagem mais fortemente mais entre si obrigando a saída da água pelo fenômeno da *sinerese*.

A competição física entre o amido gelatinizado e as proteínas do glúten determinará se a massa será firme e elástica (evidência de forte rede proteica aprisionando o amido nesta rede), ou rígida (caso o amido ao inchar-se cause danos à rede de proteína durante a cocção com a consequente lixiviação). Embora as proteínas sejam polimerizadas com facilidade durante após mistura e processo de secagem, falta resistência para lidar com o amido inchado podendo gerar espaguete pegajoso. Embora uma alta incidência da polimerização possa comprometer a qualidade do espaguete, uma menor incidência resultará em ocorrências em seguida (durante a cocção), sendo que as proteínas irão seguir com mais facilidade o intumescimento do amido resultando em massa de maior qualidade (Bruneel *et al.*, 2009).

A maioria dos produtos desidratados é reidratada quando na utilização, sendo que este procedimento nos tecidos vegetais secos é composto por três processos simultâneos: a *embebição* de água no material seco, o inchaço e a lixiviação do solúvel (Hizaji, Maghsoudlou e Jafari, 2011).

Conforme Oliveri e Costa (1994), após gelatinização e *solubilização* do amido (3º estágio de modificação do amido), o amido pode gerar perdas nas características do espaguete, podendo fluir para água após cocção, não ficando retido no interior do grânulo (lixiviação citada acima). No caso da ocorrência da retrogradação, este contribuirá de forma positiva para a qualidade com relação à cocção da massa, uma vez que o amido polimerizado não está totalmente livre para sair do espaguete.

- Amido Danificado

Segundo Elstow e Wallington (1993), durante a moagem parte dos grânulos de amido sofrem danos físicos, gerando a presença de amido danificado que é mais susceptível a ação da amilase (esta não age sobre o amido íntegro), motivo pelo qual os grânulos de amido intactos são mais resistentes ao ataque. A absorção de água na farinha de trigo pode ser aumentada com o acréscimo no teor de amido danificado que pode ser elevado pelo aumento da pressão nos rolos trituradores de trigo, sem prejuízo para cor da farinha.

De acordo com Benassi e Watanabe (1997), imaginava-se que o grânulo de amido não possuía a capacidade de absorver água por ter uma parede celulósica envolvendo-o. Hoje, sabe-se que o mesmo tem pouca capacidade de absorção de água (aproximadamente 30% do seu peso), devido a sua organização estrutural (em especial as regiões cristalinas), onde a água penetra com dificuldade, no entanto, Moretto e Fett (1999) comentam que o teor de *amido danificado* deve ser mínimo para que o teor de umidade no produto seja baixo, uma vez que o *amido danificado* é capaz de absorver 100% de água.

A amilose e amilopectina do amido danificado detém alta quantidade de água podendo formar uma rede baseada no entrelaçamento, embora seja questionável o fato do amido danificado ser um dos principais fatores para a formação da rede de massa seca ou se esta pode ser fabricada na ausência de tal amido (Bruneel *et al.*, 2009).

Fibras

Segundo Elstow e Wallington (1993) existem frações de alimentos compostas por carboidratos não assimiláveis (não digeridas pelas enzimas do sistema digestivo) que desempenham um papel importante para fisiologia humana. Estas são comumente chamadas de *fibras*, compreendendo as pentosanas, celulosas, hemicelulosas e ligninas, presentes em grande variedade de alimentos. De acordo com Pearson (1998) os maiores teores de fibras presentes no trigo estão presentes no pericarpo (casca), motivo pelo qual

a farinha integral (farinha com teor de cinza alto pela mistura da farinha com uma razoável quantidade de farelo) possui percentual do teor de fibra de 2%.

Proteínas

São polímeros que possuem os aminoácidos como unidades básicas. Em uma única molécula de proteínas existem centenas (ou) milhares de aminoácidos unidos entre si sequencialmente numa cadeia polipeptídica (estrutura primária base da proteína), de suma importância para nutrição, pois fornecem aminoácidos *essenciais*³ para o organismo (Osborne e Voogt, 1986) e (Park e Antônio, 2006).

Ciacco e Chang (1986) destacam que Thomas Burr Osborne e associados relatam quatro principais classes de proteínas presentes no trigo: as albuminas, as globulinas, as prolaminas e as glutelinas.

- Albuminas: solúveis em água e coaguláveis pelo calor, como a lactoalbumina e ovoalbumina. Globulinas: pouco solúveis ou insolúveis em água, sendo coaguláveis pelo calor; são solúveis em solução salina diluídas em pH 7,0 como a miosina, ovoglobulina e lactoalbumina. Prolaminas: insolúveis em água e soluções salinas e solúveis em solução alcoólica a 70%, a exemplo da **gliadina** (trigo e centeio) e zeína (milho). Glutelinas: insolúveis em água, soluções salinas e etanol e solúveis em ácido ou base diluídas. Ocorrem nos vegetais, a exemplo da **glutenina** (trigo). Escleroproteínas: são de estrutura fibrosa, insolúveis nos solventes mencionados acima. Exemplo: colágeno e queratina (Ribeiro e Seravalli, 2007).

Ciacco e Chang (1986) e Pizzinatto (1999) citam que nas farinhas de trigo as albuminas e globulinas são cerca de 15% e as gliadinas (prolaminas do trigo) e gluteninas (da classe das glutelinas) constituem 85%. Como essas primeiras são insolúveis em solução aquosa no teste de glúten elas são

³ São assim chamados, *essenciais*, pois o organismo não é capaz de sintetizá-los. São aminoácidos essenciais a valina, leucina, isoleucina, metionina, fenilalanina, triptofano, treonina, lisina, arginina, histidina (Park e Antônio, 2006).

extraídas junto com o amido, e, embora as gluteninas e gliadinas sejam insolúveis em água, estas possuem uma grande capacidade de absorvê-la (2/3 do glúten úmido equivale à água que fora absorvida).

As gliadinas possuem massa molecular (MM) médio de 40.000 Da e baixa elasticidade, tornando-se bastante pegajosas após hidratação; apresenta pouca ou nenhuma resistência a extrusão (por este motivo escoam, fluem), sendo apontadas também como responsável pela coesividade da massa. As gluteninas são um grupo heterogêneo com variação no peso molecular entre 100.000 Da até vários milhões, sem comportamento coesivo, porém elástico (após deformação retorna a posição de origem), conferindo à massa a propriedade de resistência à extensão. A rede formada pela união destas duas proteínas favorece a fabricação do espaguete (principalmente as propriedades viscoelásticas), conferindo estabilidade ao produto, impedindo-o de romper-se durante extrusão e processo de secagem.

Pizzinatto (1999) cita que as características dos diferentes produtos de trigo exigem farinhas com características diferentes. Na fabricação do espaguete a farinha de trigo deverá possuir proteína de qualidade e quantidade que permitam submetê-la a esforços físicos de pressão na extrusão e variações de temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

- Glúten

Ciacco e Chang (1986) destacam que as gliadinas e gluteninas formam agregados proteicos na farinha que quando misturados à água são destruídos, formando unidades menores com grupos reativos que se rearranjam e através de ligações químicas intermoleculares, formam uma rede com propriedades viscoelásticas. Este complexo formado pela ligação entre gliadinas e gluteninas é denominado de glúten.

Oliveri e Costa (1994) afirmam que a glutenina tem função de extensibilidade se opondo a deformação, retornando ao estado inicial quando a força cessa, sendo as gliadinas muito mais elásticas, de modo que o bom glúten será justamente o equilíbrio entre as quantidades de gluteninas e

gliadinas contidas no sistema; portanto presentes em percentuais diferentes serão obtidos produtos diferenciados.

Antes mesmo do processo de secagem a altas temperaturas as gluteninas participam na formação de redes de glúten (transitórias) ainda na fase de extrusão, enquanto que as gliadinas determinam as propriedades viscosas da rede de glúten (Bruneel *et al.*, 2009).

Segundo Elstow e Wallington (1993) estas proteínas absorvem água e formam uma rede de fios de glúten entrelaçados que funcionam como a “*armação*” da massa, conferindo propriedades elásticas. Exceto o centeio (em certa medida), nenhum outro cereal senão o trigo deriva tal comportamento.

Oliveri e Costa (1994); Pearson (1998) e Pizzinatto (1999) comentam que embora todos os grãos possuam proteína, apenas a do trigo é capaz de formar o glúten em grau suficiente para consentir a transformação de um farináceo em empasto em presença de água e trabalho mecânico, formando uma massa viscoelástica. A *força* de uma farinha depende em sua grande parte da quantidade e natureza do glúten presente, resultando em características específicas para um produto, tal como as massas. No processo de mistura e amassamento são concedidas energia e movimentações necessárias às cadeias proteicas, para que estas entrem em contato umas com as outras, a fim de possibilitar as ligações que desenvolvem a formação da rede de glúten.

Oliveri e Costa (1994) comentam que em relação à quantidade versus qualidade, uma farinha com glúten de má qualidade físico-química pode resultar em massa com *pegajosidade* prejudicial. Uma massa com formação ideal da rede será resultante da reticulação das proteínas com alto conteúdo proteico; baixa temperatura de coagulação; presença das proteínas solúveis *termo instáveis* (em baixas temperaturas coagulam ligando-se as estruturas proteicas do glúten), favorecida ainda pela distribuição uniforme das proteínas e alta temperatura de gelatinização do amido.

Lipídios

A diferença existente entre óleos (líquidos) gorduras (sólidas) refere-se ao estado físico dos lipídios a temperatura ambiente. O CNNPA (Conselho Nacional de Normas e Padrões para Alimentos) define o limite inferior para o ponto de fusão das gorduras como sendo a temperatura de 20 °C, sendo os óleos os lipídeos que apresentarem ponto de fusão abaixo desta temperatura (Visentainer e Franco, 2006).

Na figura por título *Um triacilglicerol: uma gordura ou óleo*, os grupos radicais que conferem a diferenciação entre os lipídios (R , R' e R'') podem ser todos diferentes (Solomons, 2009).

Os pratos elaborados após cocção dos alimentos com a presença dos lipídios resultam em desejáveis alterações no sabor e aroma (Reis, 1982). Como componente alimentar, as gorduras e óleos atuam como solvente para as substâncias que conferem cor e sabor aos alimentos, motivo pelo qual contribuem para sensação de satisfação (Vollhardt e Schore, 2004). A textura, sabor, odor e cor dos alimentos são fortemente influenciados pela associação dos triglicerídeos a água, proteínas e carboidratos, tendo influencia nas características organolépticas dos alimentos (Filho, 1993).

Vilma Alimentos (2011) cita que os lipídios dos cereais consistem da união de ácidos graxos (glicerídeos) a uma molécula base de glicerina variando no grão de 2% à 3%, distribuindo-se na proporção de 6% à 11% no gérmen, 3% à 5% no farelo e 0,8% à 1,5% no endosperma, onde são em sua maioria *fosfo* e *glicolipídios*, polares, encontrando-se ligados principalmente ao amido e ao glúten.

Segundo Ciacco e Chang (1986), dentre os lipídios presentes na farinha os esterilester são 7,5%, os triglicerídeos 20,8%, diglicerídeos (12,2%), esteróis livres (2,1%), ácidos graxos livres (7,0%), monoglicerídeos (1,3%), glicolipídios (26,4%) e fosfolipídios (22,7%) – lembrando que glicolipídios e fosfolipídios contribuem na formação da rede de glúten. Pearson (1998) ainda comenta que comparado à casca do trigo e o endosperma, o gérmen possui mais lipídio, motivo pelo qual a presença de lipídios na farinha integral é maior que na farinha branca extraída do endosperma.

Conforme Benassi e Watanabe (1997) os componentes no grão de trigo *in natura*, as enzimas e lipídios não entram em contato, por isto qualquer degradação enzimática é atribuída aos microrganismos. A partir da moagem do trigo, a farinha pode apresentar alguma deterioração - devido contato entre enzima e lipídio, sendo maior a deterioração quanto maior a quantidade de lipídio, o que explica a perecibilidade da farinha de trigo integral através da rancidez hidrolítica pela *lipase* (um tipo de esterase) produzindo glicerol e ácidos graxos livres que aumentam a acidez da farinha e pela rancidez oxidativa através da lipoxigenase ou lipoxidase (uma enzima), que catalisa a peroxidação de lipídios polinsaturados pelo oxigênio.

A farinha contém ainda alguns oxidantes naturais (tocoferóis, por exemplo) que evitam a oxidação dos ácidos graxos naturais protegendo-os, porém, havendo branqueamento químico da farinha com cloro (Cl₂), ocorrem reações inibindo a ação dessas.

De acordo com Oliveri e Costa (1994) as gorduras podem propiciar modificações indesejáveis resultando em perda de flavor no espaguete, motivo pelo qual o gérmen deve ser eliminado da farinha no processo de moagem, pois este sendo rico em lipídio e se presente na farinha, contribui para oxidação e desenvolvimento de ranço. Pode-se ainda afirmar que os lipídios representam o limite de tempo de conservação da massa, onde na Itália este tempo é de 3 (três) anos. Após este período, podem ocorrer modificações no sabor devido rancificação da gordura (Benassi e Watanabe, 1997).

Enzimas

Conforme Benassi e Watanabe (1997), as enzimas são proteínas que possuem propriedades catalíticas atuando nas reações bioquímicas em todos os seres vivos, tendo atividade mesmo nas fases de pós-colheita. Algumas reações de origem enzimática são desejáveis (e até provocadas pela adição delas a alguns processos), porém outras do ponto de vista tecnológico não o são, a exemplo do escurecimento, mudanças no sabor e textura, entre outros.

Elstow e Wallington (1993) citam que as enzimas atuam de forma específica nas reações onde participam, possuindo um *pH* e temperatura na qual a reação ocorre na máxima velocidade, e como toda proteína, a grande maioria são desnaturadas em temperaturas superiores a 60 °C, podendo, sobretudo ocorrer a renaturação de forma espontânea.

O trigo possui um sistema enzimático característico com diferentes enzimas (agindo sobre diversos substratos), em geral inativadas durante a armazenagem - desde que o grão esteja seco e livre de contaminação por insetos e fungos; sobretudo, ao se elevar o teor de água no grão ou no processo para obtenção de farinha, iniciam-se a ação das enzimas com modificações nas características do produto. As mais importantes são as amilolíticas, especialmente as que agem sobre o amido em suas ligações α -1,4, e as desramificantes que atuam sobre as ligações α -1,6 (Benassi e Watanabe, 1997).

Vilma Alimentos (2011) comenta que as amilases quebram o amido em açúcares simples (glicose), duplos (maltose) e em frações maiores (dextrinas).

Segundo Uhlig (1998) as amilases provocam a quebra do amido em dextrinas e açúcares pela hidrólise das ligações glicosídicas na posição α -1,4. Elas podem ser do tipo α ou β , sendo que a α -amilase (com atividade endo) rompe a ligação glicosídica do interior da cadeia do amido, ao passo que a β -amilase (com atividade exo) atua sobre a molécula de amido a partir da extremidade não redutora da cadeia.

Embora a farinha possua grande quantidade de β -amilase, é através da α -amilase que a atividade diastásica total é controlada (Wong, 1995). O teor de α -amilase na farinha é maior se esta provém de trigo germinado (Elstow e Wallington, 1993).

Outra classe de enzima são as proteases, sendo que a quebra catalisada por diferentes tipos tem efeitos diferentes nas modificações das gluteninas e gliadinas. Nas quebras que as proteases provocam dentro do glúten, durante o processo de preparação da massa, ao ligar-se, formam uma estrutura emaranhada. As proteases atuam quebrando as ligações existentes dentro da proteína do glúten causando uma alteração da rede, que reduz a

resistência da massa ao alongamento, aumentando a extensibilidade. Existem técnicas de análises para determinação da atividade de amilases, sendo que uma das mais utilizadas em laboratórios de trigo é o *Falling Number*, *F.N* (Uhlig, 1998).

Segundo Pizzinatto (1999), o fundamento do teste de F.N consiste na rápida gelatinização do amido presente na suspensão aquosa de farinha e na subsequente liquefação do gel (após submeter o amido a tratamento térmico em banho-maria fervente) formado pela ação da alfa-amilase presente. No teste a farinha passa pela zona crítica de temperatura para alfa amilase (entre 55-80 °C em 30 s), intervalo similar ao que é submetido à massa durante a secagem.

O efeito da alfa-amilase é muito reduzido quando ela alcança a temperatura de fermentação. A ação da alfa-amilase dá início com a *gelificação* do amido (55-65°C), finalizando com a inativação (perto de 80°C). Esta faixa (entre 55-65°C) é o ponto ótimo para atuação da enzima, e na fabricação de massas o valor do F.N ideal deve ser maior que 250 s, refletindo em menos reações e perdas na secagem (Pizzinatto, 1999).

O valor Falling Number é afetado pela granulometria da farinha, portanto, é imprescindível que o diâmetro das partículas sejam uniformes dentro das seguintes faixas: partículas com diâmetro maior que 500 *micra* (0-10%); diâmetro maior que 210 e menor que 500 *micra* (25 - 40%); diâmetro menor que 210 *micra*: 75 - 50%. O tempo do Falling Number é o período gasto para imergir o tubo viscosímetro no banho-maria, misturar a suspensão aquosa de farinha e permitir que o agitador desça uma distância fixa através do gel formado. Ele é diretamente proporcional à viscosidade do gel e inversamente proporcional a atividade da α -amilase, logo, quanto maior for o Falling Number, menor será a atividade da α -amilase (Pizzinatto, 1999).

Granulometria

A granulometria da partícula da farinha é função do processo de moagem do trigo, sendo as dimensões das malhas das peneiras utilizadas no processo (Figura 7) (Elstow e Wallington, 1993). Conforme Ciacco e Chang (1986), a granulometria é determinada através de um conjunto de peneiras de diâmetros pré-fixados em ordem decrescente de abertura. Os percentuais em peso das farinhas retidas nas diferentes peneiras fornecerão um indicativo da distribuição das partículas.

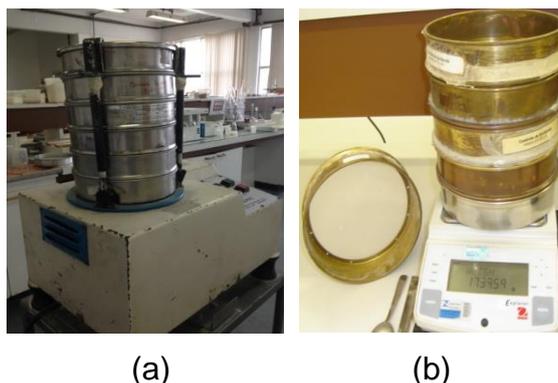


Figura 7 – Peneiras com malhas de diferentes diâmetros utilizadas na análise de granulometria da farinha de trigo (a) Plansister Laboratorial CEMEC Modelo CPL 6/20 (b) Pesagem de amostras.

A granulometria da farinha essencial às massas, afetando a absorção e retenção de água. Embora a farinha comum absorva mais água que a farinha de trigo *durum*, esta última devido às dimensões dos grânulos retém água com mais intensidade. A granulometria também incide diretamente na qualidade uniforme do produto, pondo em evidencia as impurezas, e determinam a repartição percentual dos grânulos de amido conforme sua dimensão (Leitão *et al.*, 1990).

Na produção das massas é preferível optar pelo uso de farinhas mais “finas” com cautela (não desconsiderando a possibilidade de haver uma distribuição heterogênea entre os grânulos), pois durante a mistura da farinha com a água, estas tenderão a absorver a água mais rapidamente que as maiores, demandando maior tempo de mistura para a homogeneização, podendo comprometer a qualidade do glúten. Este tratamento mecânico excessivo, além da regularidade ou distribuição nos tamanhos das partículas

da farinha, é mais importante que o tamanho apenas. Segundo Oliveri e Costa (1994) na sêmola de grano resultam partículas de média dimensão (de 300 ou 600 micra), e nas farinhas de grão mole deriva uma farinha de dimensão aproximada de 100 micra (Ciacco e Chang, 1986).

Alveografia

Conforme Pizzinatto (1999) o alveógrafo *CHOPIN* é um aparelho similar ao extensógrafo *BRABENDER* muito utilizado para avaliar a qualidade das farinhas. Júnior e Oliveira (1998) e Pizzinatto (1999) definem os parâmetros alveográficos utilizados no controle de qualidade da farinha de trigo conforme a Figura 8:



Figura 8 – Modelo de curva alveográfica com as respectivas variáveis (Pizzinatto, 1999).

Os parâmetros alveográficos auxiliam na identidade e da qualidade tanto do processo quanto das faixas ótimas de trabalho, possuindo ainda estreita ligação ao tipo de farinha, produto final e método de processamento.

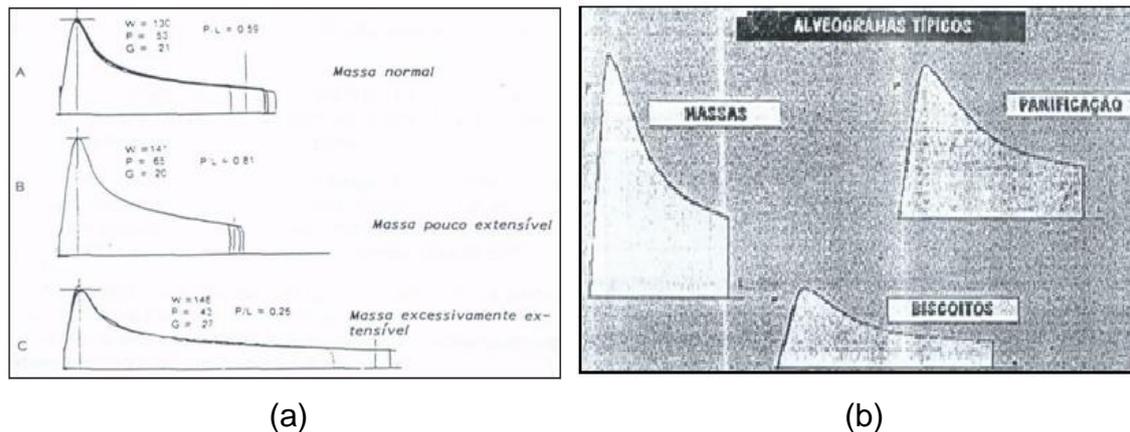


Figura 9 – Alveogramas de farinhas de trigo (a) Curvas X diferentes propriedades de extensão da massa (Pizzinatto, 1999), (b) Alveogramas típicos para diferentes produtos derivados da farinha de trigo (Júnior e Oliveira, 1998).

- **Tenacidade (ou) pressão máxima (P):** equivale a média das ordenadas máximas, expressos em mm e multiplicadas por 1,1. Relaciona-se à resistência da massa à deformação ao ser esticada.
- **Extensibilidade (ou) abscissa média de ruptura (L):** é a capacidade que oferece uma massa ao ser esticada (em mm); expresso da origem da curva até o ponto na vertical com a queda de pressão devido rompimento da bolha. As médias das abscissas de ruptura das curvas representam o comprimento L.
- **Índice de inchamento (G):** é dado pela média dos índices de inchamento (lidos na escala apropriada do ábaco). É calculado pela raiz quadrada do volume de ar utilizado para inflar a massa até a ruptura (exceto o volume de ar necessário para destacar o pedaço de massa).
- **Índice de configuração e equilíbrio da curva (P/L):** este índice reflete o equilíbrio do alveograma. É obtido através da razão entre a pressão máxima (P) e abscissa média de ruptura (L).
- **Energia, trabalho (ou) força de deformação da massa (W):** define a força da farinha; o trabalho de deformação da massa, através da área da

curva média, S , em cm^2 , traçada pelas médias das ordenadas (medido com a escala planimétrica), expresso em milhares de ergs (10^{-4} joules).

Farinografia

O farinógrafo mede a resistência de uma mistura de água e farinha (empasto) e sua capacidade de absorver água, determinando para cada farinha a quantidade de água a ser adicionada (Oliveri e Costa, 1994).

Pizzinatto (1999) descreve que o farinógrafo mede a resistência da massa durante estágios sucessivos do seu desenvolvimento, através da mistura prolongada até alcançar a consistência máxima, sendo decrescente no estágio final. Na Figura 10 podemos observar exemplos de curvas farinográficas, e mais abaixo os parâmetros são descritos com base em (Pizzinatto, 1999), (Júnior e Oliveira, 1998) e (Vilma Alimentos, 2011):

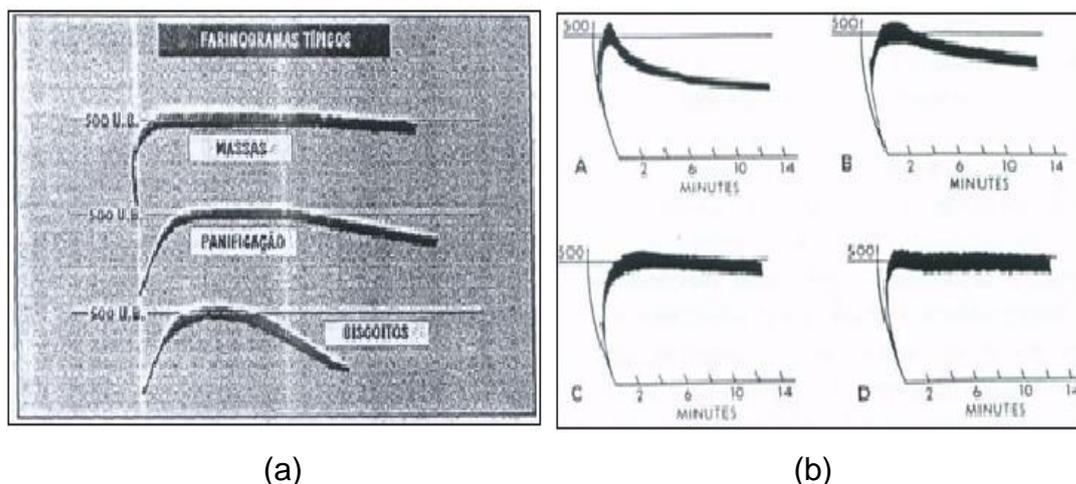


Figura 10 – Curvas farinográficas (a) Curvas X diferentes produtos derivados da farinha de trigo (Júnior e Oliveira, 1998), (b) Farinogramas de farinhas com diferentes forças: fraca - A, média - B, forte - C e muito forte - D (da esq. à dir.) (Pizzinatto, 1999).

- **Absorção d'água (Abs):** é a quantidade de água (%) requerida para que o centro da curva farinográfica alcance a linha de 500 U.F. no ponto máximo que equivale a consistência ótima da massa.

- **Tempo de chegada (T_c):** é a medida da velocidade de absorção de água, pelo tempo (min) onde o topo alcance a linha de 500 U.F. Em geral, quanto maior é a granulometria e o teor de proteínas, maior é o T_c .
- **Tempo de saída (T_s):** é o tempo em minutos necessários para que o topo da banda deixe a linha de 500 U.F, a partir da adição de água.
- **Tempo de desenvolvimento (T_{DM}):** é o *tempo de pico*, ou intervalo (em min) necessário para que a curva atinja o ponto máximo de consistência após primeira adição de água.
- **Estabilidade (min):** é a diferença (em min) entre o tempo de saída e o tempo de chegada, sendo o tempo no qual o topo da curva intercepta primeiramente a linha de 500 U.F (tempo de chegada), e o ponto onde o máximo da curva é centralizado na linha de 500 U.F. (tempo de saída). O valor resultante indica a tolerância à mistura que a farinha possui.
- **Índice de tolerância a mistura (I.T.M):** é a diferença (em U.F) de consistência da massa, medidos entre o topo da curva no ponto máximo e topo após 5 minutos de alcance do ponto máximo. Em geral nas farinhas, quanto maior for o I.T.M, mais fraca esta será.
- **Tempo de queda (ou) 10 e 20 minutos de queda:** indica o grau de quebra e força da farinha, resultante da diferença entre a altura do centro da curva no pico e 10 e 20 min após a primeira adição de água.
- **Valor valorímetro (ou) número de qualidade do farinograma:** parâmetro empírico de qualidade baseado no T_{DM} e I.T.M e tempo de quebra, obtido de gabarito especial fornecido pelo fabricante.

A capacidade de absorção de água pela farinha, que muitas vezes define a aptidão para formação de massa com viscoelasticidade adequada, sendo que as propriedades de hidratação da farinha de trigo são pontos fundamentais que controlam a qualidade na armazenagem e processo (Mastromatteo *et al.*, 2012).

A Tabela 3 apresenta alguns parâmetros farinográficos característicos de farinhas classificadas como *fraca*, *média*, *forte* e *muito forte*:

Tabela 3 – Parâmetros farinográficos de farinhas com diferentes forças.

Farinha	Absorção (%)	T_{DM} (min)	Estabilidade (min)	I.TM (U.F)
Fraca	< 55	< 2,5	< 3	> 100
Média	54 – 60	2,5 - 4,0	3 - 8	60 - 100
Forte	> 58	4,0 - 8,0	8 - 15	15 - 50
Muito Forte	> 58	> 10,0	> 15	< 10

Fonte: (Pizzinatto, 1999)

Extensografia

Segundo Vilma Alimentos (2011) o extensógrafo avalia as características de extensibilidade e elasticidade da massa, e de acordo com Pizzinatto (1999) é formado por 3 (três) unidades: a unidade modeladora (*boleadora* e cilindro), a de descanso contendo cabines com temperaturas controladas, e a unidade de esticamento.

Segundo Júnior e Oliveira (1998), Pizzinatto (1999) e Vilma Alimentos (2011), ele mede e registra a resistência da massa (submetida à extensão) quando é esticada a velocidade constante. A massa é analisada em diferentes tipos de descanso (45, 90 e 135 min), obtendo três curvas, sendo que mudanças em cada uma proporcionam alguma indicação de tolerância à fermentação, permitindo o cálculo dos parâmetros conforme Figura 11:

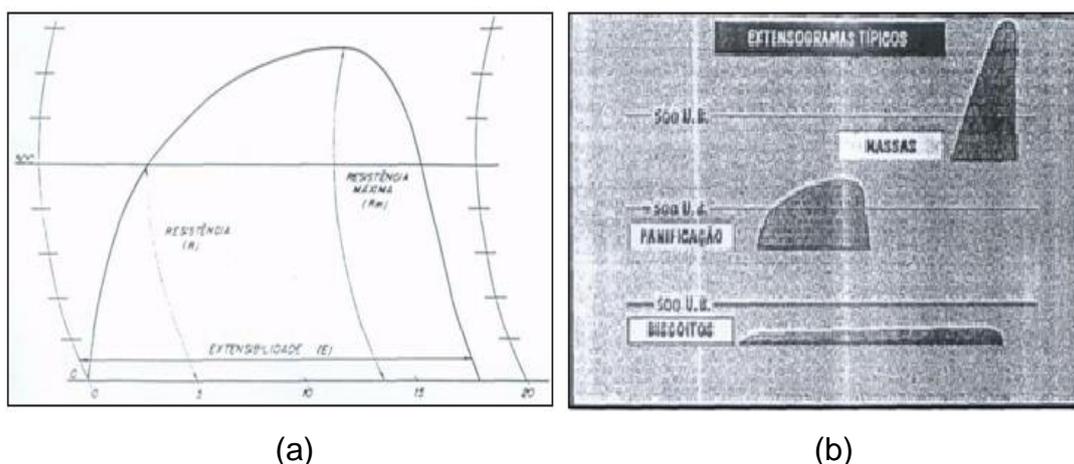


Figura 11 – Curvas extensográficas (a) Extensograma com indicação dos principais parâmetros (Pizzinatto, 1999), (b) Extensogramas típicos de diferentes produtos (Júnior e Oliveira, 1998).

- **Energia, A (cm²):** é a área delimitada pela curva (em cm²), medido pelo planímetro. Quanto maior, maior será a energia necessária para esticar a massa (maior a força desta), logo, mais forte a farinha.
- **Resistência a extensão (ou) elasticidade, R (U.E):** é o valor da altura obtido no ponto mais alto da curva a 50 mm da origem, sendo o valor expresso em *unidades extensográficas*, (U.E.).
- **Resistência Máxima, RM (U.E):** refere-se ao ponto de altura máxima da curva, expresso em unidades extensográficas, U.E.
- **Extensibilidade, E (mm):** é o comprimento em (mm) do início ao fim da curva, correspondendo a extensão equivalente ao seu comprimento original; o quanto pode ser estendida sem se romper. *E* de 100 mm equivale a uma extensão de 10 vezes o comprimento da massa.
- **Número Proporcional, D=R/E (adimensional):** é a relação entre a resistência à extensão e extensibilidade, indicando a força em U.E para esticar a massa. Se D for pequeno maior a tendência em esticar sem se romper e maior a tendência em esticar e voltar ao seu estado original. Em geral farinhas fortes apresentam $D > 2,5$ e farinhas fracas $D < 1,0$.
- **Número de oxidação Nox, A.E/R (adimensional):** indica os requerimentos de oxidação das massas no processo de panificação.

Quanto maior o Nox, a adição de agentes oxidantes irá agir favoravelmente. Por outro lado, conforme a Tabela 5, a redução do número de oxidação diminui a extensibilidade e aumenta a resistência à extensão. Na Tabela 5 conforme Pizzinatto (1999) são apresentados os parâmetros característicos de farinha forte e fraca após 135 min de descanso, e na Tabela 6 Vilma Alimentos (2011) os interpretou correlacionando as variáveis da farinha fraca e da farinha forte.

Tabela 4 – Nox X Resposta a ação de oxidantes.

Nox	Resposta à adição de oxidantes
0 – 20	Muito negativa
20 – 30	Moderadamente negativa
30 – 40	Neutra
40 – 50	Moderadamente positiva
50 – 60	Altamente positiva

Fonte: (Pizzinatto, 1999)

Tabela 5 – Parâmetros extensográficos.

Parâmetros Extensográficos					
Farinha	R (U.E)	Rm (U.E)	E (mm)	D	A (cm²)
Forte	560	840	155	3,6	145
Fraca	130	130	180	0,7	70

Fonte: (Pizzinatto, 1999)

Tabela 6 – Interpretação dos parâmetros extensográficos.

Variáveis	Farinha Fraca	Farinha Forte
Energia (A)	68 (cm)	145 (cm ²)
Resistência Extensão (R)	130 (U.E)	525 (U.E)
Resistência Máxima (R.M)	135 (U.E)	825 (U.E)
Extensibilidade (E)	178 (mm)	155 (mm)
Número Proporcional (R/E)	0,73	4,12
Número de oxidação (A.E/R)	93,1	42,8

Fonte: (Vilma Alimentos, 2011)

3.4 Espaguete

Histórico

Embora ainda haja discussões sobre Marco Polo ter introduzido ou não em 1296 o macarrão na Itália (chegando a Veneza após retornar da China), e, apesar dos italianos, chineses e árabes afirmarem serem os inventores, a descoberta de um pote bem conservado de 4000 anos por arqueólogos chineses no sítio arqueológico *Lajja* no noroeste da China em 2005 pode ter posto fim a discussão. Estes macarrões são 2000 anos mais velhos que a

primeira menção, aparecida num livro chinês durante a dinastia Han do leste, fabricados a partir do milho e não do trigo. Mais tarde, o macarrão chinês foi introduzido em países asiáticos como o Japão (modificados para dieta local), evoluindo para diferentes formas de preparação, sendo a china hoje o maior produtor e consumidor de trigo do mundo (Hou, 2010).

A massa seca é um alimento tradicional a base de cereais que tem se tornado cada vez mais popular em todo mundo dado sua conveniência, palatabilidade e qualidade nutricional (Petitot, Abecassis e Micard, 2009).

Definição

De acordo Combelli (1952), as pastas alimentícias obtém-se através da massa proveniente da mistura da farinha de trigo com a água (proporção de 32 a 35 partes de farinha com 6 a 10 de água), sem fermentação, ausente de sal, podendo adicionar outros materiais como ovos, glúten, corantes, entre outros; sendo trefiladas e cortadas, recebendo nomes distintos.

Segundo Decreto N.º 12.486 (SP) de 20 de outubro de 1978 referente as Normas Técnicas Especiais Relativas a Alimentos e Bebidas, a massa alimentícia é definida como produto *não-fermentado*, obtido pelo amassamento da farinha de trigo, da *semolina* ou da *sêmola* do trigo com água, adicionada ou não de outros componentes permitidos. “As massas serão designadas por nomes próprios de acordo com sua forma, tipo e substâncias adicionadas”, onde é incluída a denominação espaguete, classificada segundo o teor de umidade como tipo massa seca, e em relação ao formato como massa comprida ou longa (São Paulo, 1978).

Em países como França e Itália as massas destinadas ao mercado nacional só podem ser oriundas de trigo grano duro, sob égide da lei francesa de 03 de julho de 1934 modificada pela lei nº 99-574 de 9 de Julho de 1999, e da lei italiana nº 580 de 04 de julho de 1967 modificada pelo decreto presidencial nº 187 de 9 de Fevereiro de 2001 (Petitot, Abecassis e Micard, 2009).

Em relação às características físico-químicas dos alimentos, Rees e

Bettison (1994) comentam que a intensidade do tratamento térmico sobre um alimento depende de suas características físicas, do ambiente e da sua composição, variando conforme a combinação do tempo versus temperatura.

As propriedades dos alimentos *in natura* provocam efeitos na transferência de calor e massa, sendo a umidade um parâmetro importante. O conteúdo de água é a proporção direta de água presente no material e na massa seca (a massa do material que não contém água) (Park *et al.*, 2006).

O tratamento térmico gera ao alimento lesão tecidual pela alteração ou destruição das membranas celulares semipermeáveis e quebra das estruturas intercelulares (com perda de *turgor* e adesão celular), resultando na falta de consistência. Outrossim, é a desnaturação proteica que gera alterações nas propriedades físico-químicas das proteínas devido perdas na flexibilidade, solubilidade e elasticidade (pela quebras das ligações de hidrogênio e pontes dissulfeto no caso do glúten) (Rees e Bettison, 1994).

Cruz (1990) cita aspectos que podem ocorrer nos processos com tratamento térmico, sendo a água presente favorável aos microrganismos que necessitam de umidade e calor para desenvolver-se, provocando deterioração (com alterações sensoriais), sendo que com a remoção da água pode haver inibição do metabolismo livrando o produto da contaminação. Após a desidratação, a conservação do produto dependerá da *umidade residual, da embalagem, da temperatura de estocagem e do tempo de armazenamento*.

De acordo com estas variáveis a vida-de-prateleira do alimento reflete o tempo de conserva em determinadas condições de umidade relativa, temperatura, luz, etc, sofrendo pequenas alterações que são até determinado grau aceitáveis pelo fabricante, consumidor e legislação alimentar vigente (Ranken, 1993).

A qualidade das massas alimentícias dependerá da farinha, da potabilidade da água (além de sua elaboração, secagem e conservação). A cor deverá possuir distribuição uniforme sendo semi-translúcida, corpo rígido e frágil (quebrando-se com uma batida); fratura transversal semi-vítrea e limpa; de sabor e odor agradáveis, sem sabor ácido ou rançoso (Combelli, 1952).

Conforme Oliveri e Costa (1994) um espaguete de má qualidade é avaliado pela má estruturação dos fios, sendo que a manipulação da massa após cocção com as mãos permite avaliar a qualidade através da força necessária para amassá-la, e, embora subjetiva, os testes permitem estabelecer uma comparação entre o analista e os diversos produtos.

Com relação às ocorrências de reações do campo da química de alimentos, de acordo com Rees e Bettison (1994) existe também a influência da desnaturação das proteínas estruturais e a gelatinização do amido sobre a textura; as *reações de Maillard* sobre o sabor, a cor e sobre as qualidades nutritivas; as reações de oxidações que provocam alterações no sabor, cor e mudanças estruturais; sem falar no efeito do tratamento térmico sobre a qualidade sensorial dos alimentos.

Segundo Oliveri e Costa (1994), quando o espaguete é submetido à cocção (temperatura próxima de 100 °C), ocorre progressiva entrada de água na massa elevando-se o volume e ocorrência dos fenômenos de inchaço e gelatinização do amido (podendo ocorrer a solubilização). Se a secagem for agressiva e a qualidade da farinha inferior, poderá ocorrer a dispersão do material amiláceo na parte externa dos grânulos de amido, bem como, na água de cocção, tendo reflexos sobre a qualidade do espaguete na pegajosidade, elasticidade e corpo. Estes estarão ausentes se os fenômenos de coagulação das proteínas e estabilização do retículo (com a contenção do material amiláceo) foram também decorrentes do processo de secagem.

Uma maior resistência do espaguete à ruptura pode advir de vários parâmetros, tais como as propriedades reológicas da massa, a composição do espaguete e o tratamento térmico durante processo de secagem, sendo que a hidratação da massa é um dos fatores mais importantes na qualidade, pois a formação de uma forte rede física depende do conteúdo de água presente no espaguete (Mastromatteo *et al.*, 2012).

Segundo Stuknyte *et al.* (2013) as massas alimentícias são facilmente propensas a ocorrência de alterações devido a reações *Maillard*, que podem ser reforçadas por vários fatores bioquímicos e tecnológicos que ocorrem no processo de produção.

Esta classe de reações compreendem uma complexa sequência de reações químicas que ocorrem entre açúcares e aminoácidos das proteínas sob ação do calor, resultando na formação de compostos poliméricos (as *melanoidinas*), que alteram a textura e a cor (Vilma Alimentos, 2011).

Os fatores que influenciam as reações de Maillard é a temperatura (quanto maior mais rápida); o tempo de secagem (quanto maior mais evidente); o conteúdo de água do produto (quanto menor mais rápida) e o teor de açúcar livre na matéria prima (quanto maior mais evidente e rápida a reação) (Didonè, 2003).

Rees e Bettison (1994) comentam que as reações de Maillard prosseguem até o armazenamento, influenciadas pela atividade de água (30% é um ótimo valor para geração de sabores), e é acelerada em valores de pH alto. Na 1ª etapa ocorre a condensação de grupos *carbonilas* (procedente dos carboidratos) reduzidos com grupos *amino* livres (dos aminoácidos ou proteínas), reordenando-se para produzir os compostos *Amadori* (aqui ainda não ocorrem alterações sensoriais). A 2ª etapa é mais complexa ocorrendo a formação de compostos voláteis responsáveis por sabores característicos (sabor de cozido, doce, queimado, etc.) e odores desagradáveis (aromas de cetonas, aldeídos, etc.). Na 3ª etapa surge a formação do pigmento *melanoidina* de cor marrom.

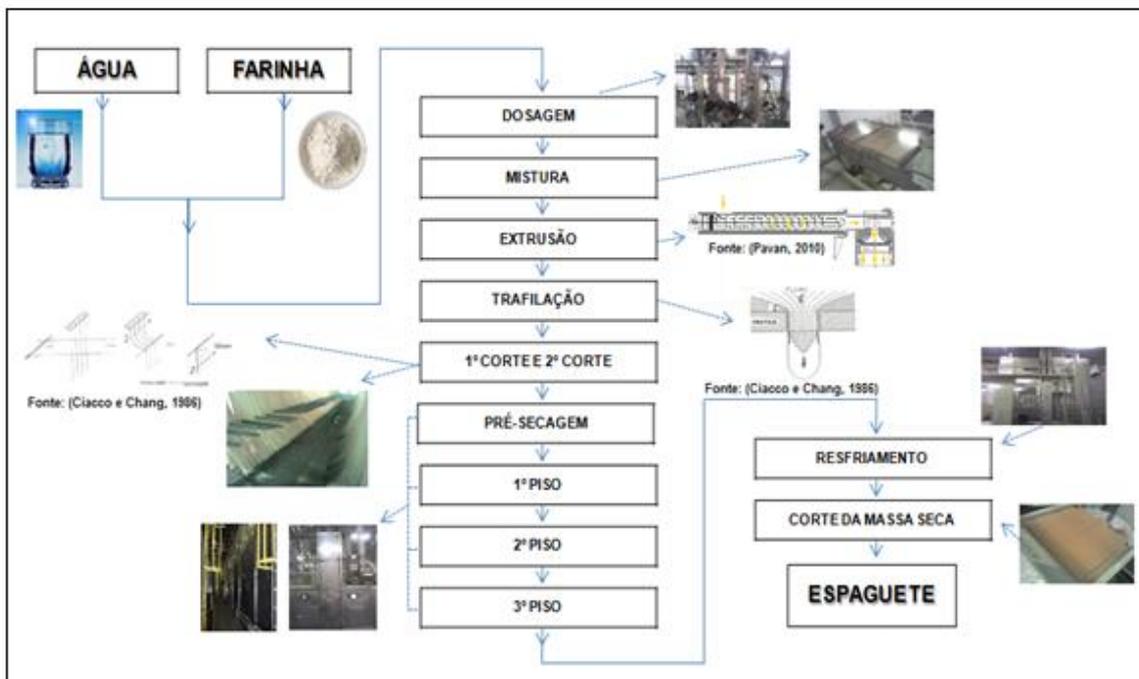
As reações de caramelização e de oxidação também alteram o produto. A primeira conforme Vilma Alimentos (2011) trata-se de uma reação na qual os açúcares são degradados sob ação do calor, produzindo compostos de cor escura que pigmentam alimentos como a casca do pão. A segunda, a oxidação, segundo Rees e Bettison (1994), em geral a conservação pelo calor não altera significativamente os sabores básicos ácidos, salgados, doces ou amargos; porém as principais mudanças ocorrem devido compostos voláteis que apresentam sabor, sendo uma das principais fontes a oxidação dos lipídios através da rancificação oxidativa. A oxidação ocorre em três etapas: *iniciação* (com formação do radical livre), *propagação* com formação de hidroperóxidos altamente reativos e *finalização*, sendo que os hidroperóxidos gerados

participam de reações secundárias originando diversos compostos voláteis incluindo aldeídos, álcoois e cetonas que produzem odores desagradáveis.

3.4.1 Processo e Fluxograma

De acordo com Petitot, Abecassis e Micard (2009), o processo de fabricação das massas compreendem basicamente quatro etapas fundamentais: hidratação da farinha, mistura, extrusão e secagem.

A seguir (Figura 12) é apresentado o fluxograma geral mais detalhado do processo de produção de espaguete, sendo que em seguida é descrito cada



etapa de forma sucinta:

Figura 12 – Fluxograma de produção de fabricação do espaguete.

- Dosagem:

De acordo com Oliveri e Costa (1994) o objetivo primeiro da dosagem consiste em transportar os dois componentes básicos em pequenas quantidades continuamente, de forma que certa quantidade de farinha deve

corresponder a certa porção de água.

- Mistura:

No processo de mistura devem-se pôr quantidades limitadas de água no intuito de distribuir rapidamente as frações desta sobre a farinha, uma vez que o ideal seria que cada grânulo estivesse ligado à quantidade mínima de água correspondente (Oliveri e Costa, 1994).

Segundo Pavan (2010) o processo de mistura faz o uso de partículas médias e grossas num tempo médio entre 12 a 14 minutos sob ação do vácuo, tendo como objetivo a homogeneização das partículas no misturador (Figura 13), evitando a formação de grumos e presença de partículas estranhas.



(a)

(b)

Figura 13 – Misturador da linha ML Pavan 2000 kg/h (a) Vista externa (b) Vista interna do equipamento.

Oliveri e Costa (1994) comentam ainda que outro aspecto é o efeito da temperatura da água de empasto na temperatura da massa (o ideal é 35 °C), somado ao fator principal da produção de calor que está relacionado ao tipo de farinha e o modo como é armazenada e as estações climáticas; fatores estes

que podem implicar em diversas temperaturas no material farináceo.

Uma vez que a água de empasto é a de mais fácil regulação, está geralmente é a mais indicada, de modo que sendo mais quente resultará em uma massa mais solta e com grânulos menores (mais homogênea), absorvendo água com mais facilidade, sendo necessária menor quantidade de água quente para umidificar o empasto, porém, de modo controverso está o problema da gelatinização do amido (não podendo a massa superar a faixa de 45 a 50 °C); o efeito sobre a cor do produto uma vez que a água aquecida tende a escurecer o espaguete (a água fria possui comportamento inverso).

Outro aspecto é o efeito da mistura sob ação do vácuo (a ação deste é favorável à cor do empasto), com objetivo de melhorar a mistura favorecendo a reaproximação dos blocos de empasto além de eliminar as bolhas de ar, melhorando a formação da massa e eliminando a coloração pálida, pois estas bolhas refletem a luz em todas as direções conferindo cor branca ao produto, e quando o produto é compacto ocorre penetração da luz, absorvendo radiações que não são amarelas (porém chegam aos olhos humanos como amarelos), enfatizando ainda que o vácuo total piora ligeiramente a qualidade de cocção da massa embora também melhore ligeiramente a cor.

- Extrusão:

Oliveri e Costa (1994) descrevem que a rosca deve fornecer à massa de empasto a energia necessária para passagem pela trefila, destruindo a individualidade dos grãos que compõe este empasto formando um tecido homogêneo. O movimento da massa na rosca é espiralado conforme a Figura 14. A rosca não deve girar mais que 30 voltas/minuto, pois quanto maior a rotação maior é a degradação da rede de glúten da massa, sendo que o cilindro que contem a rosca deve ser resfriado através da passagem de água fria na camisa de resfriamento, a fim de evitar a desnaturação das proteínas.

Uma segunda questão relacionada à fase de extrusão é a temperatura (não deve ultrapassar os 60°C), pois pode ocasionar a desnaturação das proteínas, embora passado esta fase o aumento da temperatura até melhora o

reforço do retículo proteico. A desnaturação proteica provoca uma perda de funcionalidade e de características de extensibilidade, elasticidade e tenacidade da rede de glúten. Caso o glúten estiver formado durante a extrusão, a desnaturação será apenas uma aglomeração (um reforço da estrutura do retículo glutínico), tornando-o mais consistente, mais sólido, sendo que ao seguir para secagem as modificações que desnaturam as proteínas permitirão fixar os grânulos de amido no interior desta estrutura do retículo glutínico. Em temperaturas de 50, 60 e 70°C, mesmo não havendo a desnaturação, todas as proteínas podem dar início a este fenômeno. Deve-se ter o cuidado com a movimentação da rosca que necessita ser realizada de forma regular, sem agressão a rede proteica, uma vez que a rosca tende a romper as moléculas do glúten gerando danos estruturais.



Figura 14 – Rosca extrusora (Pavan, 2010).

- Trefilação:

Combelli (1952) afirma que a forma e perfeição das massas dependam do molde, incidindo sobre a produção de massas transparentes, uniformes, homogêneas, de espessura e longitude iguais, com o mínimo de esforço da trefilação resultando no máximo de sua produção. Uma excelente trefilação possui enorme influência sobre a secagem do espaguete, pois se forem formados fios de espessuras não uniformes o processo de secagem sobre os fios dispostos sobre as varas não será satisfatório.

Oliveri e Costa (1994) detalham a importância das pastilhas⁴ conferindo ao espaguete um formato mais liso (devido a parte interna de teflon), além de amortizar a passagem de empastos mais duros que podem provocar golpes de pressão no interior das pastilhas, que fariam por sua vez variar o diâmetro dos furos gerando variação na espessura (Figura 15).

⁴ As *pastilhas* (também chamadas de *insertos*) determinam o formato e a espessura dos fios. São constituídas em geral de bronze com revestimento interno de teflon que, por possuir baixo coeficiente de atrito, resulta na produção de massa com uma superfície mais lisa (Ciacco e Chang, 1986).

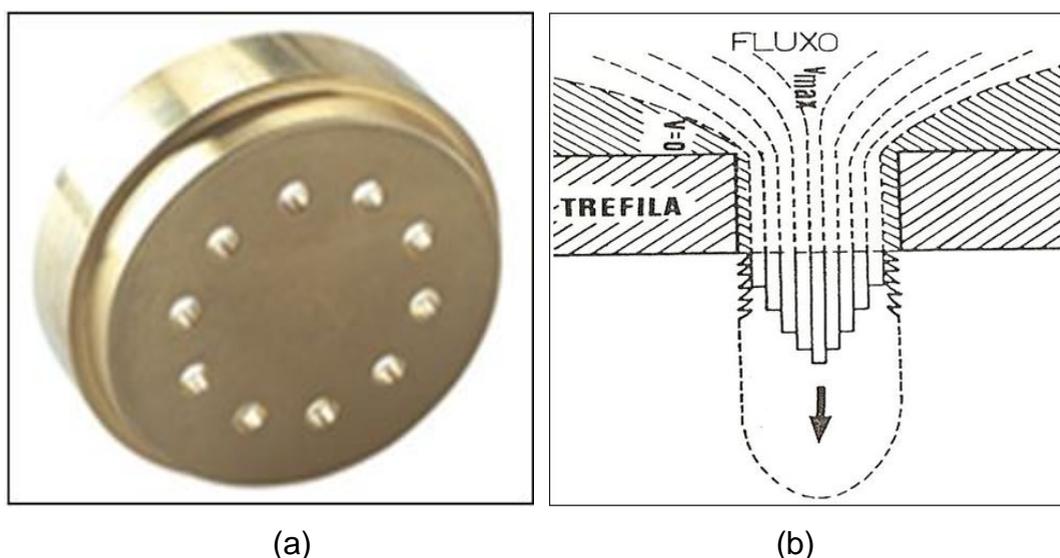


Figura 15 – Formação dos fios do espagete na pastilha (a) Pastilha utilizada como molde para os fios do espagete, (b) Efeito da fricção na superfície do fio extrusado (Ciacco e Chang, 1986).

- Corte superior e inferior (1º e 2º corte):

Segundo Combelli (1952) após a extrusão o corte da massa deve ser efetuado com desperdícios mínimos. Em paralelo, deve haver uma ventilação evitando amontoamento dos fios, conservando a menor deformação. A faca (ou lâmina) deve estar afiada para que o corte superior seja executado sem *rebarbas* e a massa não se deforme na saída pela alteração do perfil dos fios. Após o corte superior, ocorre o inferior (através de faca dispostas paralelamente) para aparar dos fios de espagete de comprimento desproporcionais, uniformizando a parte inferior dos filetes.

- Pré-secagem (encartamento):

Lucato (2009) comenta que a fase de pré-secagem é bastante delicada e crítica e define o êxito final do processo, pois, nesta etapa ocorre uma acentuada perda de umidade da massa num tempo reduzido. O pré-secador é constituído de um túnel de um único nível, no qual a massa entra com uma umidade alta (em torno de 28%) num ambiente úmido e aquecido chegando ao fim desta secção com umidade em torno de 18,5 %.

Combelli (1952) cita que no interior da secadora ocorre a alternância entre a secagem e estabilização (Figura 20), produzindo durante certo tempo uma intensa remoção de umidade via evaporação da água presente no espaguete, fazendo com que o ar carregue-se de umidade até saturação onde a secagem será menos ativa e a camada formada sobre o espaguete absorverá uma pequena quantidade de umidade do interior da massa, desenvolvendo certa consistência. Estes intervalos de secagem e estabilização serão fundamentais para a produção de massa de excelente qualidade.

Segundo Oliveri e Costa (1994) dependendo do processo de secagem tem-se a evidência de duas fases da massa: a *plástica* e a *elástica*. A fase plástica refere-se à mudança de consistência da massa quando a esta for aplicada uma força, e a fase elástica um módulo de elasticidade, indicando um esforço superior a uma certa quantidade podendo causar ruptura. A fase plástica ocorre, sobretudo, no encartamento – parte central da secagem; onde o objetivo consiste em retirar o máximo de água do espaguete até um limite tendo a segurança de não haver mais água a evaporar.

Um dos problemas que podem ocorrer devido a formação de crosta da superfície no espaguete, principalmente no encartamento (estando ainda na fase plástica) é o *bolhamento* (presença de bolhas no interior da massa), resultante de água presente na massa que, após migração em determinado momento, sairá deixando o ar em seu lugar.

- 1º piso, 2º piso e 3º piso da secadora:

Elevações bruscas de temperatura após o encartamento (nos pisos da secadora) provocam defeitos no espaguete, sendo que nos pisos deve haver menor quantidade de água a ser evaporada, conseqüentemente, menor variação de umidade (*delta*), permitindo mais estabilidade do espaguete, objetivo maior nesta etapa que é a estabilização do produto (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** b) (Oliveri e Costa, 1994).

- Resfriamento (refrigerador):

Ao final do processo segue-se a fase de resfriamento da massa (zona de repouso), que tem por objetivo bloquear a umidade externa do produto com o mesmo teor de umidade de saída, resfriando o mesmo em ambiente separado dos túneis da secadora (este umidificado), conferindo ao espaguete uma notável solidificação. Ao reduzir a temperatura, deve-se ter uma umidade relativa tal que não permita a evaporação da água, evitando a redução da superfície externa sendo que a interna estará sólida. Com isto ocorrerá redução da crosta externa formando *fendas*, de modo que, se o interior não estiver bem formado, o produto poderá quebrar-se totalmente, contrário ao objetivo de obtenção da massa sólida e sem rupturas (Oliveri e Costa, 1994).

- Corte final:

Conforme Ciacco e Chang (1986) as massas longas após finalizado processo de secagem, são transferidas para o compartimento de corte tipo serrote que definem o tamanho adequado para seguirem para envase.

Os fios são lançados sobre uma esteira transportadora que os direciona a este compartimento que possuem 3 discos paralelos entre si que cortam o filetes nas extremidades e no centro, em dimensões previamente estabelecidas para o espaguete relativo ao tipo de massa enquadrada no mercado (Figura 16).

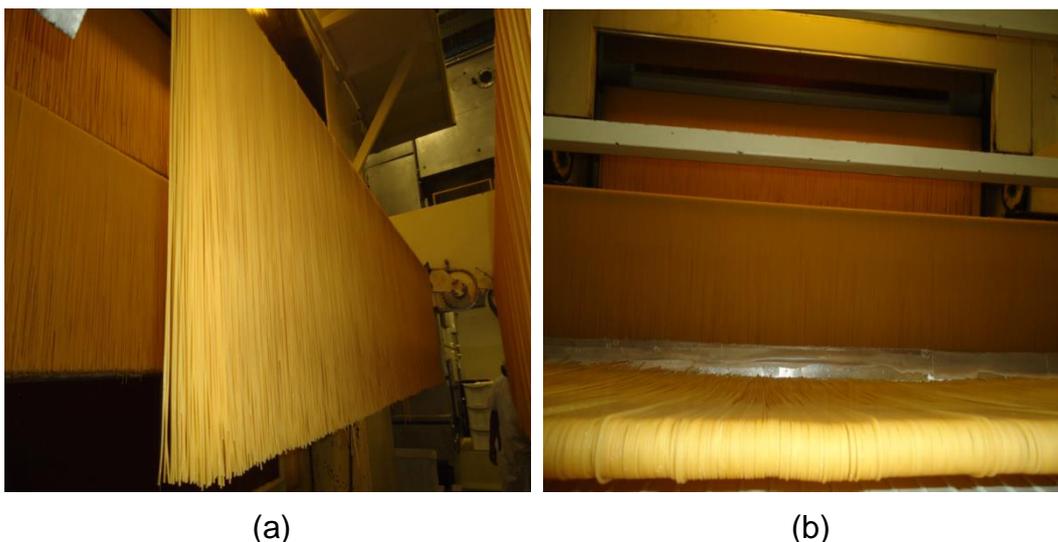


Figura 16 – Espaguete na saída da secadora (a) Massa seca após secagem, (b) Massa em esteira para corte.

- Envase e armazenagem:

Combelli (1952) reforça que o local adequado para armazenagem da massa após corte e envase deve ser de amplo; possuir parâmetros regulares; superfícies lisas; ser limpo e seco; com temperatura e umidade adequadas, evitando absorção de água pela massa, uma vez que é higroscópica.

3.4.2 Produto

Segundo Dalgleish (1993) em condições moderadas de temperatura, os alimentos após processo de secagem e envase adequados conforme as normas possuem uma vida de prateleira de mais de 2 (dois) anos.

Cruz (1990) cita que após a secagem todo alimento mantém um percentual mínimo de umidade que é normal para o processo, a umidade residual.

A estrutura seca da massa após cocção deve gerar um produto de matriz compacta com grânulos de amido aprisionadas numa rede de proteína coagulada, conferindo ao macarrão maior firmeza, menor viscosidade e menor perda de sólidos na água de cocção (Stuknyte *et al.*, 2013).

Segundo Combelli (1952) quando o desenvolvimento do espaguete na secagem não for satisfatório, nota-se um aroma de massa fresca possivelmente fruto de uma estabilização inadequada, tempo de secagem insuficiente ou excessiva secagem prévia não possibilitando a hidratação e cristalização do amido presente. Caso o odor seja de ranço pode ter sido o tempo de secagem excessivo. Se a secagem não for ideal existirão zonas em que o amido estará em estado livre com moléculas de água presente entre os cristais, provocando fraqueza na massa (rompendo com facilidade), resultando após cocção, numa massa pegajosa que diminui o padrão de aceitabilidade.

A rápida evaporação da água no processo de secagem geram poros na estrutura interna do espaguete capaz de favorecer a absorção de água durante

o cozimento, resultando em redução do tempo de cozimento (Maache-Rezzoug e Allaf, 2009).

Algumas fendas e orifícios pequenos podem ser evidentes na matriz proteica na superfície da massa em imagens de MEV devido (em parte) as tensões superficiais da massa durante a secagem (Petitot, Abecassis e Micard, 2009).

Conforme citado anteriormente, a referência de uma massa de alta qualidade é *al dente*, proveniente de trigo grano duro. Esta massa possui características de alta firmeza e resistência; sem aderência na superfície e com pouco ou nenhuma perda de massa para água de cocção (Bruneel *et al.*, 2009).

De acordo com Oliveri e Costa (1994), a determinação de um espagete de boa qualidade traduz-se em obter uma massa de cor e aspecto bom, com ausência de defeitos, boa consistência de cocção, mantendo o sabor que pode ser oriundo da matéria-prima e sua integridade nutricional.

Pizzinatto (1999) ainda acrescenta que as características de uma boa massa residem nos seguintes aspectos:

- Formato: uniforme sem rugosidade/ Cor: uniforme, brilhante, translúcida e sem pontuações ou manchas/ Odor: característico/ Sabor: levemente adocicado/ Umidade: entre 12% a 13%/ Teor de Cinzas: entre 0,5% e 0,7%; sendo que após cocção a massa deve manter o seu formato, possuir firmeza, não possuir aderência entre os fios, manter a cor, deter bom aumento de volume e peso e ter baixa perda de sólidos solúveis.

3.5 **Psicrometria**

De acordo com Park *et al.* (2007) a psicrometria refere-se ao estudo das misturas e vapor de um líquido, sendo que na indústria alimentícia o ar é a mistura gasosa de maior importância em processos como a armazenagem, condicionamento e principalmente a *secagem*. Conforme Combelli (1952) esta área do conhecimento propõe-se a determinar a quantidade de vapor de água

que é contido em certo volume de ar atmosférico. Um adendo nesta seção (ver rodapé) refere-se aos conceitos de sistema, vizinhança e fronteira⁵; sistema fechado e aberto⁶ e estado não-estacionário e estacionário⁷ dados por (Himmelblau e Riggs, 2006); ao passo que em pode-se verificar os conceito de calor e trabalho em (Russell, 1994) e (Çengel e Ghajar, 2012).

- Umidade relativa e absoluta:

Ainda segundo Combelli (1952), a umidade relativa é a relação entre a umidade contida no ar necessário para a saturação. A maioria das substâncias orgânicas absorve maior ou menor quantidade da água presente no ar até um dado estado de equilíbrio em que a afinidade do material para com a umidade é igual à força com que o líquido possui para evaporar-se, donde conclui que pelo estado higrométrico do ar uma mesma matéria poderá absorver ou emitir vapor. Na prática diz-se que o ar é *muito seco* quando possui menos de 30% de umidade; *seco* quando possui de 30% a 50%; *normal* entre 50% a 75% e *úmido* quando contém mais de 75%, sendo que raramente ultrapassa os 90%.

Cruz (1990) comenta que a umidade relativa do ar é a quantidade de água contida no volume de cada metro cúbico de ar em relação à que ele poderia conter se estivesse saturado, sendo que o equilíbrio entre a temperatura, umidade relativa e a circulação do ar define o que significa “*secar*”. A partir desta tríade, o segredo de uma boa desidratação dependerá da técnica utilizada para se aumentar a capacidade higroscópica do ar, ou seja, a capacidade de absorver água (a cada aumento de 15 °C por exemplo, dobra-se a capacidade de absorção de umidade do ar). Enquanto o aumento de

⁵ Sistema é a quantidade de matéria ou região do espaço escolhida para estudo e cercado por uma fronteira. Já *vizinhança* é tudo o que está de fora da fronteira do sistema, ao passo que *fronteira* é a superfície que separa o sistema das vizinhanças, podendo ser uma superfície real ou imaginária, tanto rígida quanto móvel (Himmelblau e Riggs, 2006).

⁶ *Sistema fechado* é um sistema no qual não há troca de massa com suas vizinhanças. O contrário, sistema aberto, é aquele onde ocorre troca de massa com as vizinhanças (Himmelblau e Riggs, 2006).

⁷ *Estado não-estacionário* é uma condição de um sistema que não se encontra em estado estacionário, ou seja, o estado do material dentro do sistema varia com o tempo. *Estado estacionário* por sua vez é uma condição em que o acúmulo de massa e energia no sistema é nulo, ao mesmo tempo em que suas propriedades são invariantes no tempo, enquanto as taxas e as condições das correntes de massa e energia entram e saem do sistema são constantes (Himmelblau e Riggs, 2006).

temperatura do produto submetido à secagem força a evaporação da água, por outro lado, a circulação do ar remove a umidade evaporada.

Combelli (1952) cita diferenças entre as umidades relativa e absoluta. A primeira traduz a relação entre o peso do vapor de água contido num dado volume de ar e o peso do mesmo volume de vapor de água à mesma pressão e temperatura. A umidade absoluta esta permanece inalterada mesmo havendo variação de temperatura (caso não seja agregado ao ar quantidade alguma de vapor). Quanto menor for a umidade, maior será a quantidade de água que poderá ser absorvida pelo ar, motivo pelo qual esta é uma das principais variáveis monitoradas no processo de secagem.

- Temperatura de bulbo seco e úmido:

De acordo com Oliveri e Costa (1994) a temperatura de bulbo seco é aquela registrada pelo termômetro comum, ao passo que a temperatura de bulbo úmido será a do termômetro envolto por uma mecha úmida. Quando a temperatura de bulbo seco é representada paralelamente à temperatura de bulbo úmido, caso o ambiente dos dois termômetros estejam saturados de umidade, a temperatura dos dois serão a mesma, e, uma vez não existindo nenhuma evaporação da água do termômetro de bulbo úmido é sinal que teremos 100% de umidade.

- Temperatura de orvalho:

Em relação a absorção de umidade, Combelli (1952) descreve que a capacidade do ar em absorver água aumenta com o aquecimento (embora o resfriamento do ar possa servir com este fim). Ao resfriar-se um dado volume de ar com determinada quantidade de umidade pode-se chegar a uma temperatura na qual este grau de umidade represente o máximo da saturação, de modo que ao reduzir-se a temperatura o vapor de água condensará em forma de água líquida, resultando num *ar mais seco* que o anterior com maior capacidade secadora. Este é o princípio utilizado nos pisos de estabilização (1º, 2º e 3º pisos) de secadoras para manutenção do processo de secagem.

3.6 Processo de Secagem

A secagem é uma das operações mais utilizadas para acabamento final ou equilíbrio da umidade de diversos materiais processados com o ar como as madeiras, borrachas, couros, plásticos e para melhor conservação como é o caso dos alimentos e materiais perecíveis (Oliveri e Costa, 1994).

A secagem é uma das etapas de processamento que tem por finalidade retirar parte da água contida no alimento através de processos simultâneos de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem a um nível tal que o produto esteja em equilíbrio com o ar ambiente (Oliveira *et al.*, 2008).

A secagem é uma das operações unitárias mais versáteis tanto na natureza quanto nas operações de cunho industrial. Em geral ela ocorre através do uso de *ar seco*⁸ como meio secante, uma mistura gás-vapor onde o vapor é o vapor d'água e o gás é o próprio ar (Terron, 2009).

Park *et al.* (2006) definem a secagem como uma operação na qual a atividade de água do alimento é reduzida pela remoção de água por vaporização, através da eliminação de um líquido volátil contido num corpo não volátil, logo, o tipo de secagem depende do produto, constituição e das características do produto final.

Enquanto a evaporação remove uma enorme quantidade de água do material, o processo de secagem é utilizado em geral para a remoção de uma quantidade de água relativamente pequena de um material. Enquanto na evaporação a água é removida na forma de vapor pelo ponto de ebulição, na secagem ela é retirada no estado de vapor pelo ar (Geankoplis, 2003).

Segundo Combelli (1952) a secagem é o processo onde se elimina a maior parte (ou toda) da água inserida mecanicamente no espaguete, sendo

⁸ Embora chamado de *ar seco*, este possui uma quantidade de umidade. Quimicamente o ar é uma mistura de vários gases dentre estes o nitrogênio com 75,53%; oxigênio, 23,16%; e outros com 1,31% (argônio, gás carbônico, néon, hélio, metano, criptônio, óxido nitroso, hidrogênio, xenônio, ozônio), tendo massa molecular de aproximadamente 28,97 g/mol (Terron, 2009).

que para secá-lo é necessário atravessar uma corrente de ar quente por onde a umidade é carregada e evacuada através da intervenção de exaustores, de modo que a massa libere a água contida, sendo que neste processo de secagem o espaguete absorve um pouco de calor latente do ar reaquecido.

Segundo Didonè (2003) o efeito da temperatura sobre a flora bacteriana prevê a destruição dos microrganismos nas seguintes faixas: entre 60 – 72 °C os *Stafilococcus*, *Salmonella seftenberg*, *Enterococcus*, *Micrococcus* e *Lactobacillus*; entre 80 – 90 °C a *Corynebacterium* e a *Diphtheri* e entre 100 – 120 °C os *Sporygens*, o *Clostridium Botulinum*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus coagulans* e os *Bacillus Stearotermophilus*.

Cruz (1990) e Conforme Combelli (1952) reforçam que além da preservação das características físicas e químicas, alguns dos benefícios da secagem estão ligados ao fato de que com a perda de água o valor alimentício do produto concentra-se; o alimento seco é mais “leve”, compacto, mais fácil de transportar, além de manter o sabor inalterado por longos períodos, dificultando ainda a proliferação microbiana pelo baixo teor de água, reduzindo os custos com armazenagem e transporte devido à redução de volume.

A secagem varia de acordo com o tipo, quantidade e qualidade do produto, além da quantidade de água a ser removida, prolongando a vida de prateleira dos alimentos e convertendo produtos perecíveis em formas estáveis ligado às mudanças nos padrões alimentares urbanos em dois rumos: a valorização dos produtos “naturais”, frescos; e a valorização da funcionalidade e praticidade, incluindo aspectos como a rapidez no preparo, longa conservação, adaptabilidade a diversas necessidades, informação, acessibilidade e diferenciação (Bonazzi e Dumoulin, 2011) e (Park *et al.*, 2006).

Devido a sua influência sobre atributos como sabor, cor e textura, a secagem é a etapa mais importante na elaboração das massas, muito embora a qualidade da proteína e as propriedades térmicas do amido determinam a qualidade final do produto em função da coagulação da proteína e gelatinização do amido que ocorrem durante o processo de secagem (West, 2012).

Conforme Oliveri e Costa (1994), analisando-se uma seção de espaguete observa-se que a secagem advém de dois tipos de movimentos: a relacionada ao calor presente na parte externa que tende a penetrar no interior da massa, e, da umidade que sob o efeito do calor percorre o sentido de forma inversa.

A secagem depende de fatores como a umidade de equilíbrio, a temperatura e a umidade relativa do ar; a condição da superfície externa da massa submetida à secagem, e as transformações do ar quente e úmido no interior da secadora sobre a entrada e saída de água do interior da máquina. Estes elementos definem a quantidade de água que permanece constante no extrato externo do formato, sendo que a diferença de umidade entre o interior e exterior determinam a velocidade de difusão da água até o equilíbrio.

De acordo com Park *et al.* (2007), na secagem é indispensável a transferência de calor de uma fonte quente para que a umidade do material seja evaporada; em contrapartida, deve haver um *sorvedor* de umidade capaz de remover o vapor d'água arrastado pela transferência de massa, gerando uma superfície seca no material (Figura 17).

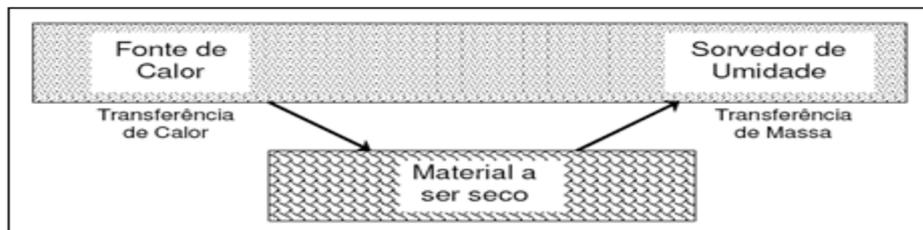


Figura 17 – Ocorrência do processo de secagem (Park *et al.*, 2007)

Os equipamentos para a transferência de calor e massa são definidos conforme os mecanismos por dois fenômenos. A *transferência de calor* (ou energia) do meio para evaporação da umidade superficial depende das condições externas de umidade do ar, temperatura, fluxo e direção de ar, da área de contato e da pressão; e a *transferência de massa* (umidade) da parte interna à externa com a subsequente evaporação é função da natureza física do sólido, de sua umidade e temperatura, indicando a “dificuldade” de secagem nos materiais, sendo que para a evaporação da superfície ao ambiente é

necessário que a água migre do interior do sólido à superfície.

3.6.1 Curvas de Secagem

Na secagem de um produto, a fim de dimensionar um secador ideal para um dado processo, é necessário ter o conhecimento das condições operacionais de umidade e temperatura do ar utilizado, além do tempo correto para realização da secagem que melhor se adeque a demanda (Geankoplis, 2003).

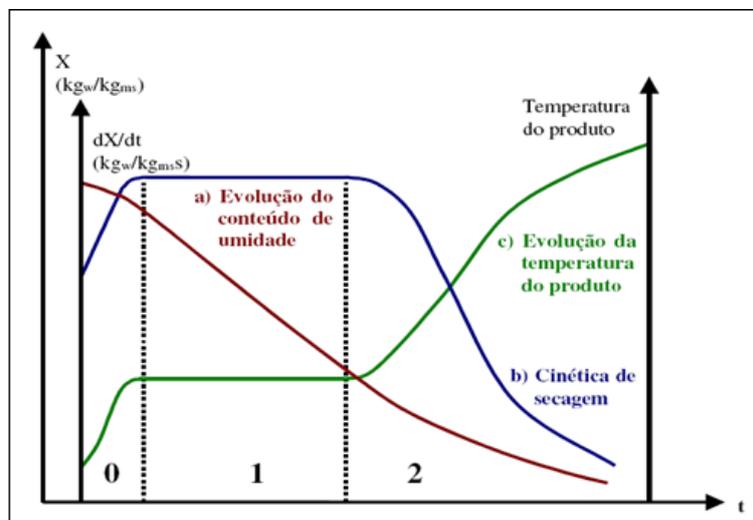


Figura 18 – Estágios da curva de secagem (Park *et al.*, 2007).

De acordo com Park *et al.* (2007), devido diferenças estruturais, dimensionais e de composição dos alimentos, as condições de secagem variam. Ocorre transferência de calor (uma parte é usado para vaporizar a água) pela diferença entre as temperaturas do alimento e o ar quente, ao passo que a transferência de massa de água (na forma de vapor) para o ar ocorre pela diferença de pressão parcial de vapor d'água existente entre o ar e a superfície do produto. Estas transferências de calor e massa ocorrem em três estágios (Figura 18), onde X é a curva de evolução do teor de água do produto, T é a temperatura e (dX/dt) é a velocidade (ou taxa) de secagem ao longo do tempo para um experimento utilizando ar de propriedades constantes.

A partir do gráfico obtido pelos dados da umidade em base seca (Kg_w/kg_{Sc}) versus o tempo de secagem (cor marrom na Figura 19), as inclinações da tangente sobre a curva fornecerão valores de (dX/dt) para um dado tempo t , possibilitando o cálculo da taxa de secagem R ($kg\ H_2O/h.m^2$) para cada ponto pela Equação 42. A curva da taxa de secagem será, dada através da plotagem de R com o teor de umidade (Kg_w/kg_{Sc}), sendo que ela pode ser acelerada com o aumento da temperatura do ar de secagem e/ou com o aumento do fluxo de ar que atravessa o produto por unidade de tempo (Geankoplis, 2003) e (Zuchi, 2012).

Após análise de variáveis operacionais como a velocidade, temperatura e umidade relativa do ar, foi observado que os efeitos da temperatura e umidade relativa do ar sobre a curva da taxa de secagem são mais importantes do que o efeito da velocidade do ar sobre o processo (Veladat, Ashtiani e Rahmani, 2013)

Ainda de acordo com Park *et al.* (2007), observando ainda a Figura 18, a curva *a* indica a redução do teor de água durante o processo de secagem no produto; *b* representa a variação do teor de umidade do produto no tempo (velocidade ou taxa), ou seja, dX/dt em relação a evolução do tempo, que corresponde a diferencial da curva *a*, e *c* indica a variação que ocorre na temperatura durante o processo de secagem.

A curva característica de secagem (que é a relação entre o teor de umidade e a taxa de secagem) é geralmente dividida em três períodos: período de pré-aquecimento (inicial), período de taxa de secagem constante e período de taxa de secagem decrescente (Ogawa, Kobayashia e Adachia, 2012).

Abaixo estes períodos são mais detalhados:

3.6.1.1 Período Inicial

- Período 0:

Este período em relação ao tempo total da secagem é insignificante. Equivale a entrada no regime operacional onde a temperatura do

produto é menor que a do ar; a pressão parcial do vapor na superfície é pequena, logo, a velocidade de secagem e a migração de água são débeis. Quando o calor é introduzido em excesso, a temperatura do produto aumenta elevando a pressão e velocidade de secagem até que a transferência de calor compense a de massa (Park *et al.*, 2007).

3.6.1.2 Período de Taxa Constante

- Período 1 (período de taxa constante):

Equivale ao de velocidade ou taxa de secagem constante. A quantidade de água no alimento é grande, saindo dele via evaporação como água livre. A pressão de vapor na superfície se mantém constante (similar à água pura à temperatura do produto) sendo igual à temperatura de bulbo úmido, pois as transferências de calor e massa compensam-se exatamente. Este estágio ocorre desde que a saída de água até a superfície acompanhe a perda por evaporação na superfície, ciente que nos materiais biológicos esta condição é difícil uma vez que a taxa evaporativa da superfície ao ambiente em geral é maior que a taxa de reposição do interior à superfície, em função das resistências de transferência de massa no interior do produto (Park *et al.*, 2007).

Segundo Geankoplis (2003), no período de taxa constante, inicialmente, a superfície do sólido encontra-se muito molhada formando um filme contínuo de água na superfície de secagem (totalmente água livre), que age como se o sólido não estivesse presente. Se este for poroso, a maior parte da água provém do interior do sólido, continuando até que a água fornecida à superfície seja tão rápida quanto é evaporada.

Neste período as transferências de calor e massa são analisadas na superfície do material e ar de secagem, sendo que a temperatura mantém-se igual ao do ar de secagem saturado e as transferências de massa e calor compensam-se. O mecanismo de fluxo interno de água não afeta a velocidade de secagem uma vez que a taxa de

deslocamento interno da água para superfície é igual ou maior que a taxa de remoção de vapor d'água pelo ar, evaporando somente a água livre (Oliveira *et al.*, 2008).

3.6.1.3 Período de Taxa Decrescente

- Período 2 (período de taxa decrescente):

De acordo com Oliveira *et al.* (2008), no período de taxa decrescente as análises são baseadas nas transferências internas de calor e massa que governa a secagem.

Representa o estágio de taxa de secagem decrescente, pois, sendo a migração de água para superfície deficiente em função da diminuição da pressão parcial de vapor de água na superfície do produto, a velocidade de secagem reduz-se. O teor de água na transição entre o período 1 e 2 é comumente chamado de teor de água crítico (X_{cr}), equivalente ao ponto de inflexão de taxa de secagem constante à taxa de secagem decrescente que depende das condições operacionais. Como no período 2 a transferência de calor não é mais compensada pela transferência de massa, ocorre a elevação da temperatura do produto tendendo a temperatura do ar. Ao fim do período o produto se equilibrara com o ar ($X=X_{eq}$), anulando a velocidade de secagem (Park *et al.*, 2007).

A umidade de equilíbrio X_{eq} é obtida quando a taxa de secagem cessa (equivalente à zero). Este parâmetro é essencial, pois ele indica o teor mínimo de umidade que um material pode atingir para dada condição de temperatura e umidade relativa; além do que a maioria dos modelos matemáticos utilizam a diferença entre o teor de umidade num dado tempo e o teor de umidade de equilíbrio como sendo a força motriz para transferência de massa (Santos, 2009).

Conforme Geankoplis (2003) a umidade livre crítica, X_{cr} , indica o ponto onde não há mais água suficiente na superfície para que mantenha um

filme contínuo de água. Como toda superfície não estará mais umedecida, a área molhada segue reduzindo-se continuamente neste primeiro período de taxa de queda até que a superfície torne-se completamente seca, quando a evaporação retrocede lentamente a partir da superfície, recebendo calor do sólido para zona de evaporação. A quantidade de água removida neste período pode ser relativamente pequena, muito embora o tempo requerido seja grande.

3.6.1.4 Transferência de umidade em sólido no período de taxa decrescente

Segundo Geankoplis (2003), quando a secagem ocorre pela evaporação da superfície exposta do sólido, é necessário que esta umidade mova-se do interior para superfície. O mecanismo deste movimento durante o processo de secagem afeta tanto o período de taxa constante como o período de taxa decrescente, de modo que algumas teorias foram propostas visando explicar os diferentes tipos de curvas de taxa de queda, a saber: *A teoria da difusão líquida; Capilaridade e movimento em sólidos porosos e O Efeito do encolhimento.*

- A teoria da difusão líquida:

Ocorre quando existe diferença de concentração entre o interior do sólido e a superfície, sendo este transporte de umidade normalmente visível em sólidos não porosos onde as soluções monofásicas são formadas com a umidade, sendo que na secagem de diversos materiais alimentares o movimento da água no período de taxa de queda ocorre por difusão. O coeficiente de difusividade, D_{AB} , geralmente diminui com a redução do teor de umidade, de modo que a difusividade geralmente são valores médios da concentração utilizada.

- Capilaridade e movimento em sólidos porosos:

Ocorre em sólidos porosos através do movimento da umidade contida no sólido por ação capilar e não por difusão. Ao passo que a água é evaporada, um menisco de água na forma líquida é formado através de cada poro, definindo as forças capilares pela tensão superficial da água, que fornece a força motriz para o movimento desta até a superfície. Vale salientar que em poros de menor tamanho esta força é maior que em poros grandes.

- O Efeito do encolhimento:

Durante o processo de secagem a ocorrência de *encolhimento* da massa (contração sofrida pela perda de umidade), pode provocar a presença de tensões no interior do produto pela deformação mecânica capazes de gerar quebras no alimento ainda no processo ou mesmo após embalado, indesejáveis para o consumidor, sendo portanto necessário eliminá-los numa produção industrial (Cindio *et al.*, 2009).

Em muitos sólidos, com a remoção de umidade no processo de secagem, ocorre o encolhimento onde nos casos mais graves é desenvolvida uma camada rígida na superfície impermeável ao fluxo do líquido ou vapor umidade que reduz a taxa de secagem. Em muitos produtos alimentares, quando a secagem ocorre em temperaturas muito elevadas uma camada de células retraem-se, compactando-se e formando uma barreira para migração de umidade, processo este conhecido como endurecimento. Estes efeitos são reduzidos secando os alimentos em atmosfera de ar úmido que permite reduzir a taxa de secagem, atenuando os efeitos de contração na deformação ou endurecimento da superfície do sólido.

A relação entre a atividade de água e o conteúdo total de umidade a uma temperatura constante para um dado intervalo resulta numa isoterma de adsorção de umidade, sendo que este fenômeno ocorre em quatro grandes áreas do processamento de alimentos: a *secagem*, *mistura*, *envase* e *armazenagem*. A adsorção de água primeiramente ocorre pela formação de uma monocamada na superfície do produto seguida de uma adsorção em múltiplas camadas pela captação de água pelos poros e espaços capilares,

dissolução de solutos e pela ação mecânica da água. Por fim, a *histerese*, em que a *adsorção* e a *dessorção* são diferentes (Cánovas e Mercado, 2000).

Abaixo na Figura 19 observa-se uma curva típica de secagem de espaguete, com a queda acentuada no teor de água no início e a extração de umidade ocorrendo mais lentamente com o tempo.

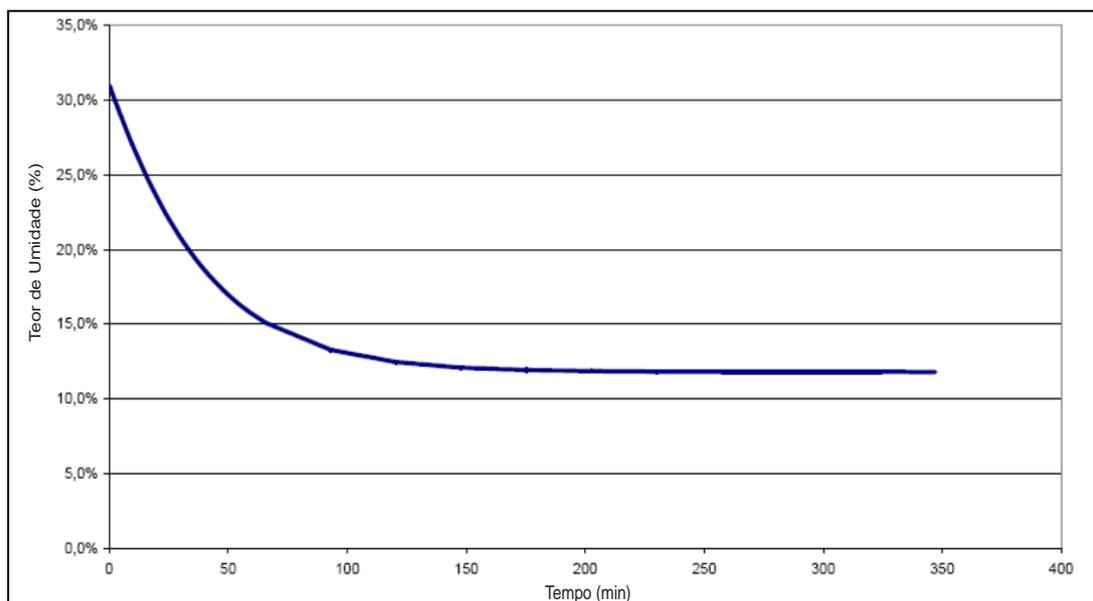


Figura 19 – Curva típica de secagem do espaguete (Pavan, 2010).

De acordo com West (2012), caso o gradiente de umidade gerado na massa pelo transporte de água do meio externo para o meio interno seja muito elevado (pela aplicação de altas temperaturas ou um tempo de secagem reduzido), podem provocar o surgimento de fissuras e espaços vazios na massa seca reduzindo a qualidade da mesma.

3.6.2 Cinética de Secagem

Em escala industrial a massa é produzida em diferentes etapas envolvendo tempo, temperatura e umidade de modo a obter um produto final contendo 12% de umidade. Ela pode ser executada em processo tradicional em secadoras de baixa temperatura (que opera em torno de 60 °C em 14 h); altas temperaturas (entre 65 °C e 75 °C em torno de 10 h) e altíssima

temperatura (superior à 86 °C chegando a 90 °C e 105 °C em tempo de secagem médio de 5 h), sendo que a adoção de maiores temperaturas no tempo de secagem (além de reduzir o tempo de fabricação e elevar a produtividade), tem conferido melhores propriedades de cozimento às massas e menor risco de contaminação, conseqüentemente, maior qualidade (Stuknyte *et al.*, 2013); (Lucato, 2009).

A qualidade da massa modifica-se conforme a transferência de água durante o processo, de modo que é necessária uma profunda compreensão da cinética de migração de água visando à melhoria do produto, aliado a temperatura empregada, pois, sabe-se que a secagem sendo conduzida a temperaturas entre 60 e 80 °C propiciam a formação de massa de alta qualidade. A aplicação de altas temperaturas (HT) é a inovação mais notável na indústria de alimentos nos últimos anos, tendo como ganho o controle microbiológico, a redução do tempo de secagem e a melhoria na qualidade de cozimento, em contrapartida tendo como aspecto negativo a evolução na cor vermelha do produto em função das reações de Maillard (Ogawa, Kobayashia e Adachia, 2012) e (Maache-Rezzoug e Allaf, 2009).

Ainda segundo Bruneel *et al.* (2009) há indicações de que a secagem em HT pode ser mais eficaz na garantia de alta firmeza e baixa viscosidade do macarrão após cocção, através de um mecanismo de troca específico.

Variações abruptas na secagem com alternâncias na taxa de secagem (de forma não periódica) provocam alterações nas características do produto, influenciando a sua formação e estabilidade física, química e organoléptica. A Figura 20 mostra os estágios necessários de secagem *versus* estabilidade, para obter um produto com estrutura adequada, sendo que após passagem pelas zonas de secagem ocorre acentuada saída de água devida ação do calor. Entre as zonas ocorre a estabilização da massa que é direcionada à zona posterior e submetida novamente à secagem. Esta alternância entre secagem e estabilização permite a distribuição da água homogeneamente, com a correta formação estrutural da massa (Júnior e Hayashi, 2010).



Figura 20 – Estágios da secagem e estabilidade de massas (Pavan, 2010).

Park *et al.* (2006) frisam que dependendo do período de secagem os métodos do cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferenciado: no período de taxa de secagem constante as transferências de calor e massa na interface ar-produto governam a secagem e fixam a velocidade de secagem, e no período de taxa decrescente (2º período), as transferências internas são limitantes conforme visualizado na Figura 21.

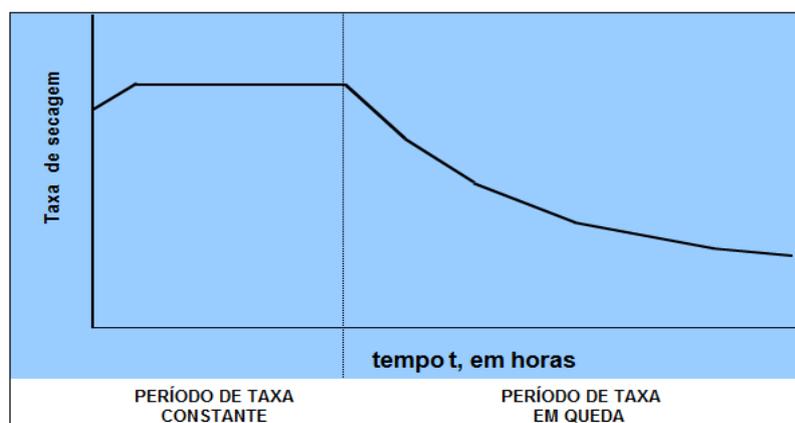


Figura 21 – Típica taxa de secagem de espaguete (Pavan, 2010).

Park *et al.* (2007) relatam ainda que a teoria difusional pode explicar o comportamento da secagem no período decrescente. Ela apoia-se exclusivamente sobre a *Lei de FICK* que expressa o fluxo de massa por unidade de área sendo proporcional ao gradiente de concentração de água.

Segundo Dalglish (1993), para as demais variáveis, a secagem é mais rápida quando a depressão do bulbo úmido é alta (abaixo da temperatura de bulbo seco), porém à medida que o processo de secagem avança deve-se ter cuidado com a temperatura superficial do alimento, uma vez que o gradiente de pressão de vapor do produto aumenta gradualmente. Outro aspecto está relacionado à transferência de umidade do alimento para o ar, pois, para que

esta migração ocorra a pressão de vapor do ar, P_{Ar} , deve ser menor que a pressão de vapor da substância, $P_{Substância}$ (no caso a água). Isto porque no ar saturado a pressão parcial de vapor da água, P , é menor que a pressão parcial de saturação, P_0 , a mesma temperatura, gerando a relação da umidade relativa, P/P_0 , (expressa em percentual).

Estas relações de pressão são dependentes da temperatura, sendo que cada alimento possui características distintas e as pressões no processo seriam difíceis de medir. O alimento tenderá ao equilíbrio com o ambiente (entorno), e quanto mais próximo for deste equilíbrio mais lento o processo de secagem, devendo ser gerada a força motriz capaz de ao mesmo tempo em que for suficiente para manter o processo em operação, o faça submetendo o alimento a limites seguros, lembrando que o aumento da temperatura (embora por si só contribua para aumento da secagem), pode trazer danos frente à conservação de certas propriedades dos alimentos.

No início do processo de secagem são observadas as maiores remoções de umidade, uma vez que ao fim do processo a água, presente no alimento encontra-se fortemente ligada ao mesmo, necessitando de uma quantidade substancial de energia para a evaporação, gerando redução da velocidade de secagem com a consequente redução da taxa de secagem (Resende *et al.*, 2010).

Algumas normas de secagem citadas por Dalglish (1993) por ar quente são:

1- A velocidade do fluxo de ar na fase inicial deverá ser maior, uma vez que o ar úmido neste estágio é liberado numa intensidade maior.

2- Maiores temperaturas na fase inicial determinam uma rápida evaporação da água no alimento que permanece a temperatura do bulbo úmido (devido ao esfriamento evaporativo), evitando danos térmicos ao alimento. Caso as temperaturas sejam excessivas, pode ocorrer a formação de uma *crosta* (em virtude das altas velocidades de evaporação)

3- Nas últimas fases da secagem, a velocidade de migração da água à superfície dos alimentos é muito lenta, necessitando de uma exposição do alimento a tempos maiores e temperaturas relativamente baixas.

A Figura 22 mostra o efeito da secagem sobre a massa úmida a ser seca, com a inserção de calor através do aumento de temperatura removendo a umidade do produto, sendo que no período de taxa de secagem em queda a migração de água reduz-se (a formação de uma camada mais seca dificulta mais ainda a remoção da umidade).

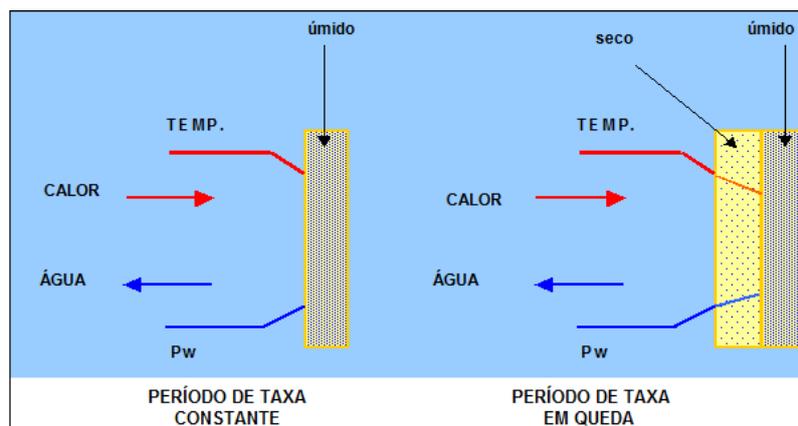


Figura 22 – Perfis de temperatura durante a secagem (Pavan, 2010).

De acordo com Oliveri e Costa (1994), a velocidade de secagem terá ainda dependência do raio do espaguete. Quanto maior for, maior será o tempo demandado. Em relação ao tipo de grão utilizado e a velocidade de secagem, as massas oriundas de grãos moles (por terem um coeficiente de difusão alto), permitem uma maior velocidade de migração da água do interior do espaguete, embora isto tenha que ser conduzido com cuidado, pois, nas primeiras fases da secagem, o emprego de temperaturas e umidades que resultem em altas velocidades de migração de água podem gerar perdas. Para o caso do uso da sêmola, por possuir um coeficiente de difusão baixo, tem-se para as mesmas condições nas primeiras fases da secagem, uma migração de água de forma mais gradual, motivo pelo qual explica as perdas de massa no processo utilizando diferentes tipos de grãos. Em relação à umidade de equilíbrio (umidade ao qual encontrasse a superfície externa do produto), aumentando-se o tempo de secagem será menor.

Park *et al.* (2006) indicam que a eficiência do processo de secagem depende das propriedades do alimento, das propriedades do ar de secagem, da velocidade de escoamento do ar de secagem, da temperatura e da umidade relativa.

3.6.3 Métodos de Secagem

Segundo Cruz (1990), o método de secagem consiste em impulsionar a umidade (pelo calor) atravessando lentamente as camadas do alimento até a superfície externa do mesmo, daí evaporando. Este processo é longo e requer temperatura e tempo específico para o alimento, sendo que neste contexto o ar terá duas funções: *transferir o calor* ao alimento e *absorver o vapor d'água* desprendido do produto.

3.6.4 Secagem de Espaguete

De acordo com Oliveri e Costa (1994), a aplicação de altas temperaturas na secagem do espaguete no início do processo (estando à massa ainda bastante úmida) pode provocar a ocorrência da gelatinização do amido, sendo por este motivo iniciada com temperaturas mais baixas, elevando-se com o aumento da umidade relativa do ambiente e a redução de umidade do produto, embora as temperaturas mais altas provoquem a coagulação e formação do retículo que é positivo.

Segundo Combelli (1952) este processo é caracterizado pela secagem superficial da massa sendo conduzido em equilíbrio com a umidade interior, a qual após evacuar-se até a superfície é evaporada através do calor (segundo com a estabilização da massa) que posteriormente é submetida à nova secagem e nova estabilização entre as zonas (rever Figura 20).

Oliveri e Costa (1994) comentam que para secagem do espaguete é necessário definir a velocidade de secagem deste produto que será regida pela

umidade de equilíbrio. Esta será menor quanto maior for à área seca (pouca umidade) e quente (alta temperatura), estando estas variáveis intimamente ligadas à velocidade de secagem, sendo que a umidade relativa pode ser determinada conhecendo-se o valor da temperatura de bulbo úmido.

Durante o processo ocorre ainda a diminuição de volume do espaguete que é proporcional à umidade do produto (12% em média, 10% a menos em relação à quantidade inicial da secagem). Se a secagem não for bem conduzida esta redução pode provocar rupturas na massa, uma vez que a água evapora muito rápido com a umidade de equilíbrio muito baixa, gerando evaporação superficial antes que a água do interior tenha migrado à superfície, secando a parte mais externa, que resulta numa umidade interior maior que a exterior podendo gerar fissuras, em função da evaporação externa ligada as condições ambientais a ponto de superar o coeficiente de difusão (pois a água não consegue difundir-se com a mesma velocidade), sendo que ao chegar ao exterior esta água tenderá a sair, porém encontrará uma superfície rígida que resultará em fissuras do espaguete.

3.7 **Secador**

De acordo com Combelli (1952) a *secagem natural* é um processo lento uma vez que ela é realizada em etapas progressivas, entre 8 a 10 dias no verão e 20 a 25 dias no inverno (segundo a umidade no ambiente e o regime pluviométrico presente na região). A massa alimentícia é extremamente sensível à umidade e aos agentes atmosféricos, de modo que uma pequena variação climatológica pode provocar enormes alterações na estrutura, aspecto externo e características físicas, motivo pelo qual a *secagem artificial* realizada em secadoras industriais permite o maior controle das variáveis psicrométricas de interesse, eliminando os inconvenientes meteorológicos, sem contar no tempo considerável do processo natural (dias como mostrado), realizado nas secadoras em algumas horas.

Diversos modelos matemáticos que propõem a descrição dos mecanismos de secagem tem sido apresentados para a otimização do processo e desenvolvimento de secadores (Hizaji, Maghsoudlou e Jafari, 2011).

Dalgleish (1993) chama a atenção para o fato de que os métodos de secagem variam de acordo com o tipo de alimento, sendo que para um mesmo alimento, é possível haver diferentes formas de secagem, deste modo, foram desenvolvidos muitos tipos de secadoras com diversas variantes.

Na fabricação das massas o processo de secagem ocorre nas secadoras em diferentes fases, com temperaturas e umidades relativas do ar em tempos de exposição definidos por cada célula (ou zona), e pela velocidade de transporte da massa no interior do equipamento. A umidade relativa pode ser controlada através da admissão de ar e dos exaustores existentes na máquina; a temperatura pela vazão de água aquecida nos radiadores e o tempo através do ajuste da velocidade da linha (Lucato, 2009).

3.7.1 Principais Elementos

Em função das normas exigidas para secadoras de alimentos de consumo humano é fundamental um controle da temperatura e umidade da linha, sendo que a umidade e a circulação de ar no interior das secadoras (uma conjugada à outra) são controladas através da regulação do fluxo e distribuição de ar (normalmente não ocorrem variações nas velocidades dos ventiladores e no tempo de movimentações dos produtos nos pisos da máquina), bem como o controle da temperatura através das sondas termopares que enviam dados aos sistemas microprocessadores (Dalgleish, 1993).

- Ventiladores

Combelli (1952) frisa que a ventilação tem por objetivo manter constante a composição do ar igualando a pressão em todos os pontos. Na produção é demandada uma pequena força motriz para impulsão dos

ventiladores que podem ser helicoidais, centrífugos ou rotativos, constituídos por uma série de lâminas giratórias de superfície helicoidal, fixados ao eixo do motor que confere rotação as hélices empurrando as moléculas de ar no sentido do trajeto da massa. Os ventiladores centrífugos são constituídos por um rotor de lâminas que projeta o ar axialmente em direção tangencial, como os ventiladores do tipo MV1 e MV2 utilizado no processo Figura 23.

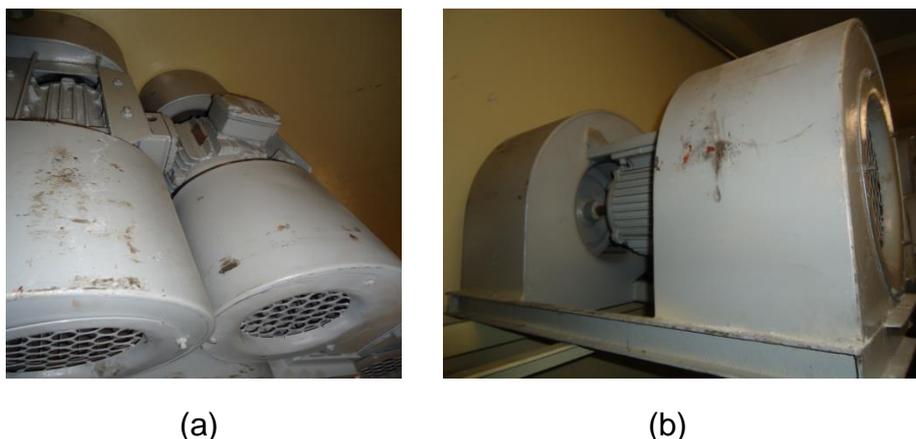


Figura 23 – Ventiladores da secadora Pavan ML 2000 kg/h, (a) Ventiladores MV1, (b) Ventilador MV2.

A ventilação é responsável por transportar as condições de secagem em contato com o espaguete, de modo que se não houvesse a umidade seria determinada pelo próprio produto. Afim de não ocorrer inconvenientes, procura-se transformar o efeito da ventilação em pressão nas fases finais do processo de secagem, onde a velocidade do ar tem seu fluxo interrompido, aproximando as moléculas que formaram uma pressão de ar que passarão lentamente sobre a massa, estabelecendo gradualmente as condições de equilíbrio, tornando o espaguete estável (Oliveri e Costa, 1994).

Segundo Zuchi (2012) a quantidade de ar utilizada na secagem depende de fatores como a umidade do produto no início do processo e a espessura da camada que estará submetida aos fenômenos de transferências.

- Radiadores:

Combelli (1952) cita que os radiadores são elementos tubulares constituídos por uma bateria de elementos idênticos com boa condutividade térmica. Os modelos mais usados na indústria são os de tubos com *aletas* fixadas, conferindo superfície de radiação maior que o de tubo liso de mesmo diâmetro. Os radiadores são atravessados por uma corrente de ar quente distribuindo de forma múltipla o calor produzido por uma fonte (em geral *caldeiras*). Ao passar pelos radiadores, a água aquecida cede a maior parte de seu calor ao ar frio do ambiente através do contato com as paredes exteriores do radiador, quando a água “resfriada” retorna a caldeira onde novamente é aquecida.

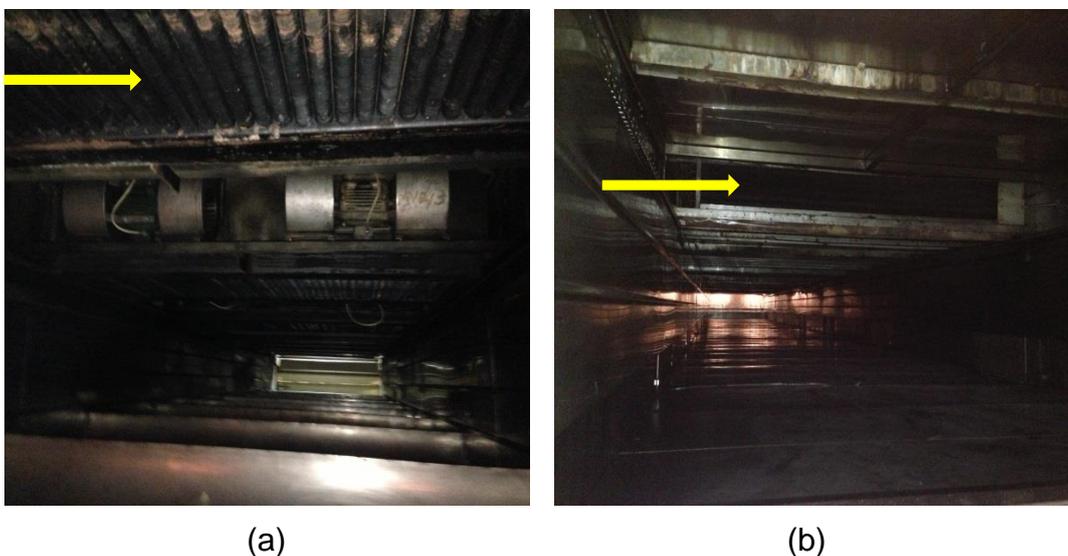


Figura 24 – Radiadores na parte superior dos túneis da secadora indicados na seta amarela, (a) Radiadores do Encartamento⁹, (b) Radiadores do 1º Piso.

- Defletores:

De acordo com Lucato (2009) os defletores são chapas de metais curvos fixados no piso da pré-secagem e que guiam a corrente de ar de modo que esta (após passagem pela massa) é desviada no sentido longitudinal da secadora até encontrar o próximo defletor que direciona o ar na direção vertical, fazendo-o passar novamente pela massa seca (Lucato, 2009).

⁹ Encartamento: trecho da secadora composto por 5 zonas de secagem composto cada uma por uma bateria de ventiladores, radiador e defletor. É nesta secção da máquina onde ocorre maior remoção de umidade, sendo considerada a parte mais importante do processo de secagem.

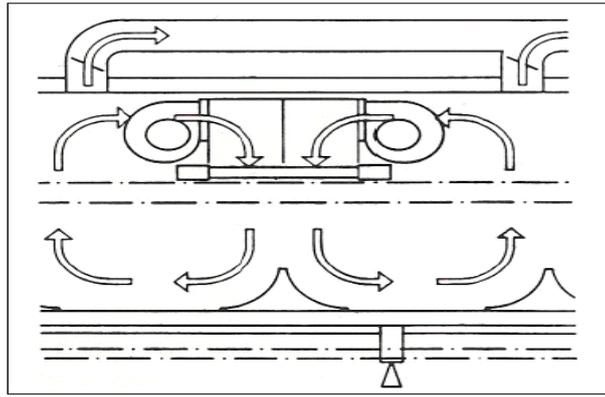


Figura 25 – Defletores na parte inferior da pré-secagem (Lucato, 2009).

▪ Exaustores:



(a)



(b)

Figura 26 – Dutos de exaustão de extração de umidade, (a) Dutos na parte superior de cada zona do encartamento, (b) Exaustor central do encartamento.

Os exaustores possibilitam o controle da umidade relativa do ar no interior do encartamento. Devido a contínua remoção de água no processo de secagem, o ambiente externo à massa fica saturado devido esta extração, reduzindo a capacidade secante do ar, daí as válvulas borboletas presentes na parte superior de cada zona de secagem e interligadas por dutos ao exaustor, atua realizando a elevação/redução de umidade na câmara.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo descreve todos os procedimentos no desenvolvimento da dissertação, citando as matérias-primas utilizadas, os locais de coleta das amostras, o emprego da instrumentação na obtenção das variáveis do processo de secagem e os padrões utilizados para as análises laboratoriais. As etapas da pesquisa compreenderam 2 fases:

1ª Fase: realização da monitoração do processo de secagem de *espaguete tipo comum* através do acompanhamento do processo de secagem, desde a mistura e extrusão até a saída do produto final, com as coletas das amostras e dos dados de interesse previamente estabelecidos.

2ª Fase: realizações das análises das amostras de farinhas de trigo e água no Controle de Qualidade Industrial e no laboratório de Análises Físico-químicas de Engenharia de Alimentos da UEFS. As análises pertinentes do produto (*espaguete comum*), foram realizadas no laboratório industrial e no laboratório do Instituto de Química da UFBA. Estes foram escolhidos por disporem de equipamentos e instrumentos de medição de interesse para as análises, com foco na reologia da massa e propriedades físico-químicas da farinha, água e amostras extraídas do processo.

4.1 Material

Neste trabalho foi avaliada a produção do *espaguete tipo comum* formado pela mistura da *farinha de trigo tipo comum* com *água potável* fornecida pela *EMBASA* e tratada industrialmente em filtro. A lista dos materiais e reagentes para realização dos experimentos e análises é visto na Tabela 7:

Tabela 7 – Materiais e reagentes utilizados nos experimentos e análises.

Lista de Materiais e Substâncias dos Experimentos e Análises		
Ácido Bórico (H_3BO_3)	Erlenmeyer 100 mL	Selênio (Se)
Ácido Clorídrico (HCl)	Esferas de Vidro	Sulfato de Potássio
Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)	Espátula de Inox	(K_2SO_4)
Água Destilada (H_2O)	Éter de Petróleo	Sulfato de Cobre (Cu_2SO_4)
Água Potável	Hidróxido de Sódio (NaOH)	Tubo de Viscosímetro
Amônia (NH_3)	Indicador Verde de	Tubos de Ensaio de 50 mL
Balão de Fundo Chato	Bromocresol	Tubo Digestor
Balão Volumétrico de 500 mL	Indicador Vermelho de Metila	Vermelho de Metila
Bastão de Vidro	Pinça Metálica	Verde de bromocresol
Béquer (100, 500 e 1000 mL)	Papel Manteiga	---
Bureta de 50 mL	Pipeta Volumétrica de 25 mL	---
Cadinhos de Porcelana	Pipeta 10 ml	---
Cápsulas metálicas	Placas de Petri	---
Catalisador metálico	Pisseta	---
($Na_2SO_4+CuSO_4+Se$)	Proveta de 100 mL	---

4.2 Máquina

O estudo foi realizado considerando o processo de secagem na seguinte máquina:

- Secadora de Espagete modelo PAVAN ML 2000 kg/h de fluxo contínuo da fabricante italiana PAVAN GROUPS.

4.2.1 Equipamentos e Softwares

Os equipamentos e programas utilizados para o desenvolvimento do trabalho estão listados na Tabela 8:

Tabela 8 – Equipamentos e programas utilizados na pesquisa.

Lista de Equipamentos e Programas Utilizados na Pesquisa

Alveógrafo Chopin
Balança Analítica AdventurerTm Pro OHAUS®
Balança de 100 kg
Balança Semi-Analítica
Bloco Digestor
Câmera Fotográfica Digital
Centrífuga 2015 Glúten Index
Colorímetro Digital Konic Minolta
Condensador de Bolas
Cronômetro
Dessecador
Destilador de Nitrogênio TECNAL TE-0363
Estufa de Fabricante Tripette e Renaud
Extensógrafo Brabender
Extrator Soxhlet
Falling Number Modelo 1700 Perten Instruments
Farinógrafo Brabender
Garrafa de polietileno
Glutomatic Glúten - Index
Manômetros
Medidor de Umidade Digital
Micrômetro Digital de Ponta Plana (precisão de 0,001 mm)
Mufla Quimis
Notebook Packard Bell
Paquímetro Comum Paquímetro Digital de Precisão
Plansister Laboratorial CEMEC Modelo CPL 6/20
Registrador digital 4 Canais Externos Linha In Door Modelo U12-006 (Data Logger) ONSET
Secador Automático de Glúten Modelo 2020 Glutork
Sensor Externo de Temperatura TMC50-HD (uso para Bulbo Seco)
Sensor Externo de Temperatura TMC50-HD (uso para Bulbo Úmido)
Sistema CLP Allen Bradley (aquisição de dados da secadora)
<i>Software</i> BHW HOBOWare Pro Lite
<i>Software</i> Cytsoft Psychrometric Chart 2.2 (<i>software</i> de propriedades psicrométricas)
<i>Software</i> LST Laboratório de Sistemas Térmicos (<i>software</i> de propriedades psicrométricas)
<i>Software</i> Microsoft Excel e <i>Software</i> Microsoft Word
Sonda PT-100
Termômetro Digital Infravermelho Lazer Raytec
Triturador Modelo TE-633 (fabricante Tecnal – Tecmill)
Vacuômetro

4.3 Métodos**4.3.1 Coletas e Medições**

Foram coletados na *rosca-sem-fim* de transporte de farinha para secadora, 5 kg de farinha de trigo do tipo comum e 2 L de água potável, sendo a primeira armazenado em saco plástico e a segunda em garrafa de polietileno (PET). Após mistura e homogeneização da farinha e água na maseira, foram

coletados 2 kg desta mistura e após processo de extrusão, foram coletados outros 2 kg de massa antes da entrada no túnel de secagem. Em paralelo foram realizadas medições de temperatura da água utilizada na mistura (água de empasto) com auxílio do termômetro digital; da mistura de água e farinha na masseira; da água resfriada no *chiller* utilizada para resfriamento dos cilindros das roscas de extrusão da massa (com objetivo de não agredir termicamente a formação da rede de glúten) e da trefila.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 27 – Registros das temperaturas de bulbo seco e úmido do processo de secagem (a) Inserção dos sensores TCM50-HD para leitura da temperatura de B.U e TCM50-HD para leitura da temperatura de B.S, (b) Imagem dos sensores entre o espaguete, (c) Sensor de bulbo seco à direita e de bulbo úmido à esquerda, (d) imagem ampliada com visualização da mecha de algodão no sensor para leitura de B.U à esquerda.

A velocidade da linha também foi registrada, e em cada uma foram coletadas as amostras e as variáveis foram registradas (Figura 27):

- Temperatura de Bulbo Seco e Temperatura de Bulbo Úmido: medidas a cada 2 s desde o início do processo através de 2 sensores: o sensor externo de temperatura TMC50-HD (para determinação do bulbo seco, B.S), e o sensor externo de temperatura TMC50-HD (bulbo úmido, B.U), previamente calibrados (ver *Anexo D*). A diferença consistiu no fato de que para o segundo sensor, foi acoplado uma mecha de algodão embebida em água para determinação da temperatura de bulbo úmido. Os sensores foram fixados em uma *cana/vara* (haste de 2800 mm de inox utilizada no transporte da massa) com auxílio de uma fita adesiva, seguindo ao interior do túnel de secagem.

Na outra extremidade do cabo foi acoplado o circuito integrado (registrador com 4 canais *externos linha In Door U12-006 Data Logger*) que transmitia os sinais para o sistema de aquisição de dados – o HOBOWare Bhw (2010), gerando gráficos das temperaturas de bulbo seco (B.S) e úmido (B.U) do ar a cada 2 s. Na Figura 29 é apresentado o gráfico obtidos na primeira etapa (encartamento), sendo que no *Anexo A* estão todos os gráficos gerados em todas as zonas de secagem, a saber: encartamento¹⁰, 1º piso, 2º piso, 3º piso, refrigerador e parte externa da saída.

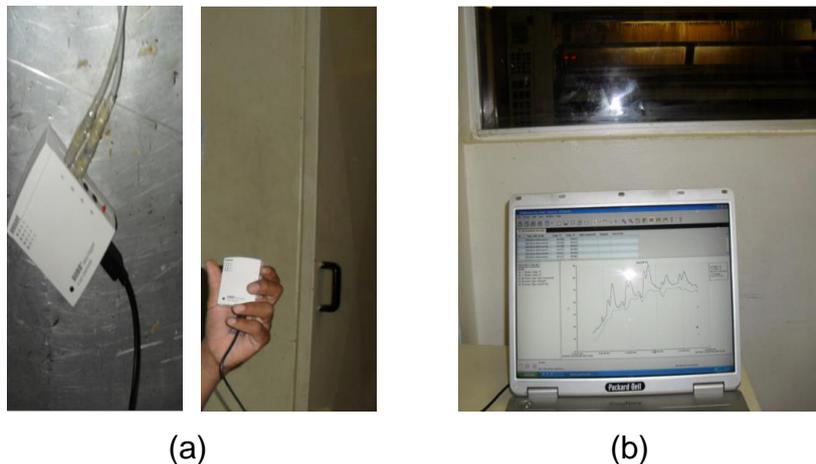


Figura 28 – Sistema de aquisição de dados dos sensores TCM50-HD de B.S e B.U (a) Registrador Data logger In Door U12-006, (b) Transmissão de dados ao *Software HOBOWare Pro* (Bhw Lite Hoboware, 2010).

¹⁰ O *encartamento* refere-se a principal zona de secagem da Pavan ML 2000 kg/h, constituída por 5 zonas de secagem de onde se extrai o máximo de umidade do espagete.

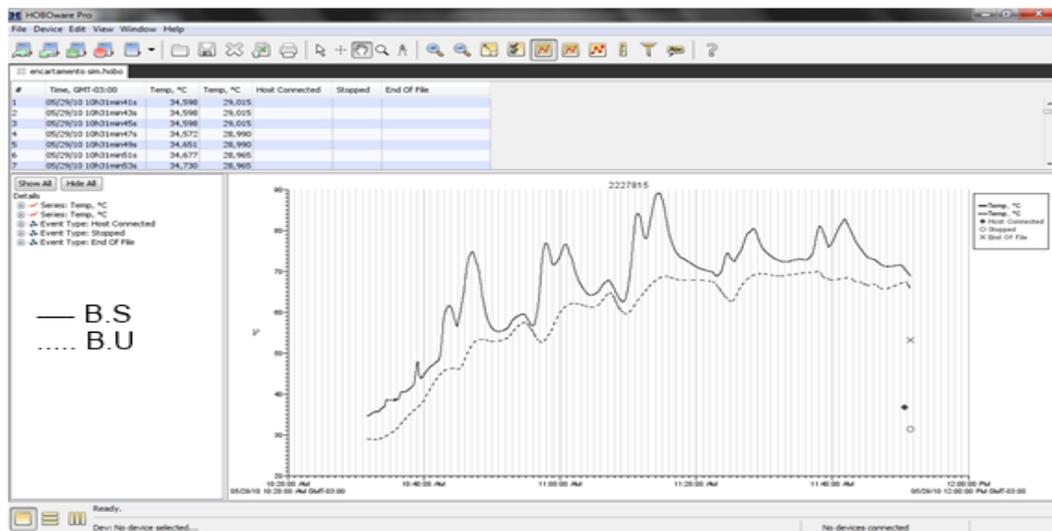


Figura 29 – Variação das temperaturas de bulbo seco (B.S) e úmido (B.U) no encartamento da secadora, sendo visível 5 zonas de secagem com 5 picos de temperatura.

- Foram coletadas amostras de espaguete na entrada e saída de cada zona e acondicionados em sacos plásticos, além de 1 kg do produto final (massa seca) para análises posteriores.

As amostras de farinhas, massas e água, após acondicionamento, foram armazenadas, lacradas e transportadas aos laboratórios sendo que:

- Foram registrados com auxílio do cronômetro os tempos de entrada e saída da massa em cada zona de secagem, respectivamente.

- Os valores de temperatura do ar de entrada e saída por zona, incluindo as temperaturas do ar ambiente de entrada e saída.

- Foram medidas (com auxílio do termômetro de leitura a laser), as temperaturas das massas coletadas nas entradas e saídas de cada zona.

Em relação as baterias de ventilação das zonas de secagem, foi registrado o modelo dos diferentes tipos de ventiladores; as quantidades por bateria; os ventiladores fora de operação; a tensão, V , de operação; a corrente, i ; a potência Elétrica, kW , e a resistência, Ω , dos ventiladores.

4.3.2 Caracterização das Matérias-primas

As amostras de farinha comum, a água potável, e das massas nas zonas de secagem de toda linha além do produto final, foram submetidas a análises laboratoriais, sendo os procedimentos e resultados descritos a seguir:

4.3.2.1 Densidade

Para o cálculo da densidade da farinha e da água as amostras foram pesadas em triplicata em balança analítica, aproximadamente 3 g para as amostras de farinha e 10 g de água. As provetas foram então taradas com água destilada (ρ igual a 1 g/cm^3) nos volumes de 60 mL (60 cm^3) e 40 mL (40 cm^3). As amostras foram inseridas nas respectivas provetas com auxílio do bastão de vidro, registrando-se os volumes finais após imersão destes materiais na água. A Equação 1 foi utilizada para cálculo da densidade.

$$\rho \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{m_A}{\Delta V_A} \quad \text{Equação 1}$$

onde ρ (kg/m^3) é a densidade da amostra em análise; m_A é a massa da amostra em gramas e ΔV_A é a variação de volume da água que corresponde ao volume da amostra, dado pela diferença entre V_{FH_2O} (volume final de água na proveta) e o V_{IH_2O} (volume inicial de água na proveta).

4.3.2.2 Umidade

Para determinação das umidades em base úmida utilizou-se o método de secagem da amostra em estufa conforme AOAC 925.10 (Inmetro, 2005). Os cálculos para obtenção da umidade foram realizados através da aplicação da Equação 2.

$$(U_{B.U}\%) = \frac{(m_{C+A} - m_{C+R})}{m_A} \cdot 100 \quad \text{Equação 2}$$

onde $(U_{B.U}\%)$ é a umidade em base úmida expressos em $\% H_2O$ da amostra; m_{C+A} é a massa da cápsula mais a massa da amostra; m_{C+R} é a massa da

cápsula mais a massa do resíduo retido após secagem na estufa e m_A é a massa da amostra pesada, utilizados para a determinação do valor médio obtido para a umidade em base úmida de uma determinada amostra (lembrando que elas foram analisadas em duplicata). Para fins de pesquisa são utilizados os valores em base seca, sendo a conversão através da Equação 3:

$$(U_{B.S}\%) = \frac{U_{B.U}\%}{100 - U_{B.U}\%} \cdot 100 \quad \text{Equação 3}$$

4.3.2.3 Cinzas

O conteúdo de cinzas foi determinado de acordo com padrão ICC STANDARD Nº 104/1 (Inmetro, 2005). Para o cálculo do teor de cinzas a partir da Equação 4 (teor de cinza base úmida) e da Equação 5 (base seca), obteve-se a Equação 6, como apresentado na sequência:

$$(Cz_{B.U}\%) = \frac{(m_{Cad+R} - m_{Cad})}{m_A} \cdot 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$(Cz_{B.S}\%) = \frac{Cz_{B.U}\%}{(100 - U\%_A)} \cdot 100 \quad \text{Equação 5}$$

Inserindo a Equação 4 na Equação 5, encontra-se o teor de cinzas (base seca) expresso na Equação 6:

$$(Cz_{B.S}\%) = \frac{(m_{Cad+R} - m_{Cad})}{m_A(100 - U\%_A)} \cdot 10000 \quad \text{Equação 6}$$

onde $Cz_{B.U}\%$ é o percentual de cinzas em base úmida na amostra; $Cz_{B.S}\%$ é o percentual de cinzas em base seca; m_{Cad+R} é a massa do cadinho mais a massa do resíduo (após incineração); m_{Cad} é a massa do cadinho; $U\%_A$ é a umidade da amostra e m_A é a massa da amostra previamente pesada.

4.3.2.4 Cor

A análise de cor da farinha foi realizada no colorímetro digital Konic Minolta (Figura 30). O aparelho foi calibrado para realizar as medições. O leitor do colorímetro foi posto sobre as três amostras: a farinha comum, o remoído de massa e a massa seca obtida, gerando os valores de L^* , a^* e b^* .



Figura 30 – Análise da cor no colorímetro digital (Konic Minolta).

4.3.2.5 Análise de Glúten

O aparelho *Glutomatic* é um sistema automático para a determinação do glúten (Standard 155 - método oficial adotado pela ICC e AACC 38-12) (Pizzinatto, 1999). Esse sistema prepara e lava a massa em solução salina, retira o excesso de água na centrífuga glúten index e depois a massa é seca em placas aquecidas no *Glutork* (Figura 31).



Figura 31 – Glutomatic Glúten Index.

Ao girar a hélice foi adicionado água à farinha (280 a 300 mL). A parte solúvel desceu através da peneira ficando retido o glúten formado (Figura 32).



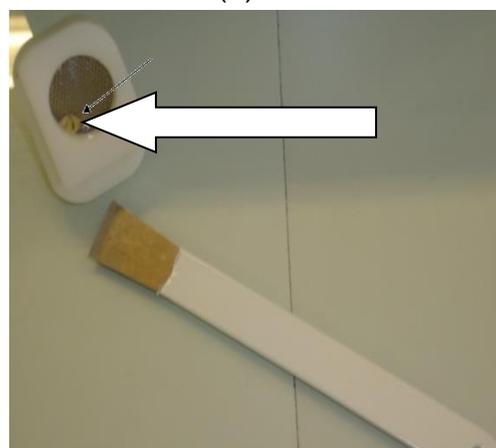
(a)



(b)



(c) (Pavan, 2010)



(d) (Pavan, 2010)



(e)



(f)

Figura 32 – Etapas após extração (a) Centrífuga Glúten Index modelo 2015, (b) Glúten após centrifugação, (c) e (d) Vista de glúten (e) Secador automático Glutork modelo 2020, (f) Glúten seco.

Ao final foram obtidos três valores a partir da aplicação da Equação 7, Equação 8 e a Equação 9 onde: o *Glúten Úmido* (valor de maior referência para produção industrial de massa), o *Glúten Seco* e o *Glúten Index*:

$$G_U(\%) = \frac{m_{G.U} \cdot 86}{100 - U_{B.U FC}(\%)} \quad \text{Equação 7}$$

$$G_S(\%) = \frac{m_{G.S} \cdot 86}{100 - U_{B.U FC}(\%)} \quad \text{Equação 8}$$

onde $G_U(\%)$ é o teor de glúten úmido da farinha; $G_S(\%)$ é o teor de glúten seco; $m_{G.U}$ é a massa de glúten úmido; $m_{G.S}$ é a massa de glúten seco ; $U_{B.U FC}(\%)$ a umidade em base úmida da farinha comum e fator 86 é a correção para a umidade padrão da farinha utilizada pelo aparelho de 14%, sendo obtido pela diferença entre 100 e 14.

$$G_I = \frac{m_{G.R}}{m_{Total Glúten}} \cdot 100 \quad \text{Equação 9}$$

onde G_I o *glúten index*; $m_{G.R}$ a massa do *glúten retido*; $m_{T.G.}$ a massa total do *glúten*.

4.3.2.6 Análise de Proteínas

Segundo Park e Antônio (2006) a determinação de proteína do alimento é obtida através do teor de nitrogênio orgânico presente, geralmente pelo método de digestão de *Kjeldahl*, compreendida em 3 (três) etapas: a digestão da amostra em ácido sulfúrico (H_2SO_4); liberação da amônia pela adição de hidróxido de sódio (NaOH) e titulação da amônia liberada com uso do ácido clorídrico (HCl).

A determinação da proteína total foi realizada conforme método AOAC 920.85, Inmetro (2005), sendo que a partir da aplicação da Equação 10 aos dados obtidos pela análise, foram calculados os percentuais de proteína para as amostras:

$$\%Proteína\ Total = \frac{V.N.f.0,014.6,25.100}{P} \quad \text{Equação 10}$$

onde V é o volume gasto em mL de HCl; N é a normalidade do HCl (0,1 N); f é o fator de correção do HCl (0,1 N) igual a 0,973082; 0,014 corresponde ao miliequivalentes do nitrogênio, 6,25 é o fator geral de conversão de proteína e P o peso da amostra.

4.3.2.7 Determinação de Lipídeos Totais (Método Soxhlet)

A determinação do teor de lipídios totais foi realizada conforme método soxhlet descrito pela AOAC n° 920.39C (Mello *et al.*, 2012). A partir dos valores obtidos na análise, calculou-se o percentual de gordura pela Equação 11:

$$\%Gordura = \frac{(P_{Balão\ c/\ Gordura} - P_{Balão\ Seco})}{P_{Amostra\ Seca}} . 100 \quad \text{Equação 11}$$

onde $P_{Balão\ c/\ Gordura}$ é o peso do balão contendo a gordura extraída da amostra; $P_{Balão\ Seco}$ é o peso do balão após secagem e o $P_{Amostra\ Seca}$ é o peso da amostra seca.

4.3.2.8 Determinação do Falling Number

O método do *Falling Number* (*número de queda*) realizado no aparelho *Falling Number 1700* do fabricante *Perten Instruments* (Figura 33), é um método viscosimétrico padronizado internacionalmente (AACC 56-81B de 1992, ICC 107/1 de 1995, ISSO 3093) para a determinação da atividade da α -amilase em grãos/farinhas de cereais como o trigo, a cevada e o centeio (Pizzinatto, 1999).

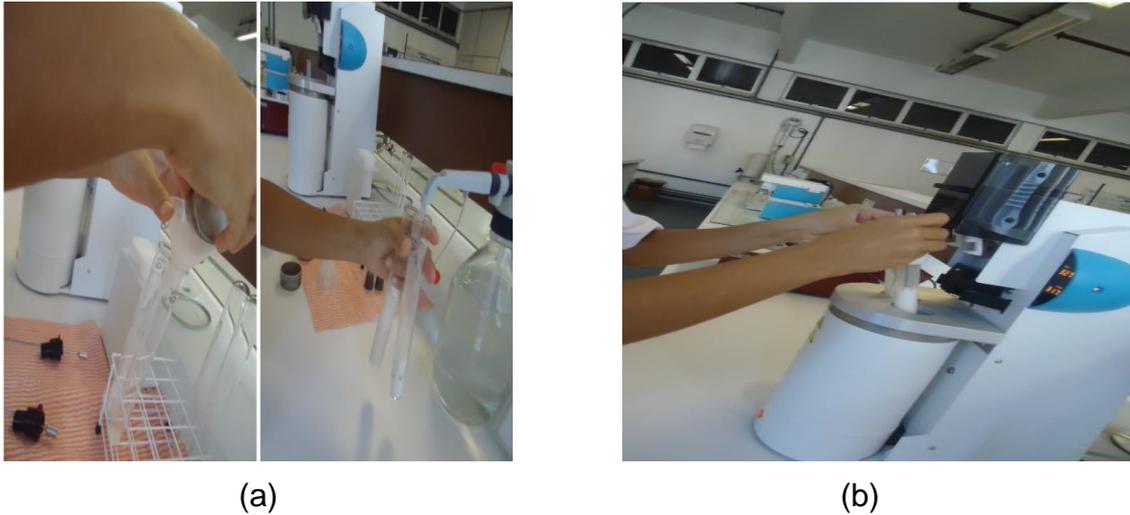


Figura 33 – Análise de *Falling Number* (a) Transferência da farinha e água destilada para os tubos viscosímetros, (b) Introdução dos tubos no aparelho

4.3.2.9 Granulometria

O teste granulométrico foi realizado segundo método AOAC 965.22 (1995) (Inmetro, 2005). Para o teste foram pesadas 100 g da amostra e postos no *plansister laboratorial* na peneira de $180\ \mu\text{m}$ de diâmetro. Abaixo desta, em sequência, foram fixadas peneiras com as respectivas malhas: $150\ \mu\text{m}$, $125\ \mu\text{m}$, $106\ \mu\text{m}$ e o recipiente de coleta final (RCF).

As peneiras foram travadas no equipamento e foi programado o tempo de 5 min. Ao término, as peneiras e o RCF foram pesados, sendo a diferença entre os pesos iniciais e finais equivalentes ao percentual de farinha para a peneira especificada (pois foram utilizados 100 g de amostra), refletindo no percentual da distribuição granulométrica e o percentual acumulado (nos diâmetros das peneiras citadas) para a farinha comum utilizada na fabricação do espaguete.

4.3.3 Caracterização do Produto (Instrumental)

4.3.3.1 Umidade

A determinação da umidade do espaguete foi realizada conforme método descrito na AOAC 925.10 (Inmetro, 2005). Uma porção da massa seca do espaguete foi triturada e pulverizada, sendo coletadas 3 amostras e postas em cápsulas metálicas, ambas previamente pesadas, similar ao realizado para determinação de umidade da farinha. Estas cápsulas foram submetidas à secagem na estufa à 130 °C por 1 h, sendo retiradas, resfriadas no dessecador e novamente pesadas.

4.3.3.2 Cor

A análise de cor do espaguete foi realizada de forma análoga a farinha de trigo, a partir do uso do *colorímetro digital*, efetuando-se idêntica calibração do instrumento, posicionando o leitor do colorímetro sobre o espaguete a fim de obter os valores de L^* , a^* e b^* .

4.3.3.3 Comprimento e Espessura

Para a determinação do comprimento do espaguete foram coletados 10 fios e medidos os comprimentos, obtendo o percentual de qualidade do comprimento dos fios (Equação 12), e de modo análogo foram coletados 10 fios e medidos com paquímetro digital possibilitando o cálculo do percentual de qualidade da espessura dos fios (Equação 13):

$$\% Q.C = \frac{n_{F.P}}{10} \cdot 100 \quad \text{Equação 12}$$

$$\% Q.E = \frac{n_{F.P}}{10} \cdot 100 \quad \text{Equação 13}$$

onde Q.C e Q.E são os percentuais de qualidade do comprimento e da espessura dos fios (respectivamente) em % e $n_{F.P}$ é o número de fios dentro do padrão.

4.3.3.4 Tempo de Cocção

O tempo de cocção (t_{CC}) foi determinado através de procedimento da American Association Of Cereal Chemist (Método 16-50 – AACC, 1995) (Paucar-Menacho *et al.*, 2008). Após cocção, um filete de espaguete foi retirado e comprimido entre duas placas de acrílico, repetindo este procedimento até o desaparecimento do *núcleo branco do centro da massa*, “o *hilo central*”. Desaparecido todo núcleo branco do centro da massa, foi determinado o tempo de cocção da massa (Figura 34).



Figura 34 – Tempo de cocção do espaguete com visualização do hilo central indicando cocção total.

4.3.3.5 Coeficiente de Incremento de Peso e Volume

Para a análise pesou-se 50 g de espaguete e aqueceu-se em água destilada análoga ao (Método 16-50 – AACC, 1995) (Paucar-Menacho *et al.*, 2008). A água de cocção foi separada e coletada em uma proveta para posterior análise de determinação do percentual de sólidos solúveis. A massa obtida foi lavada rapidamente em água destilada e novamente pesada a fim de verificar o novo peso (após cocção). Através da Equação 14 foi determinado o incremento de peso pela razão entre a massa do espaguete após e antes da cocção:

$$\Delta_{I.P} = \frac{m_{E.C}}{m_E}$$

Equação 14

onde $\Delta_{I.P}$ é o coeficiente de incremento de peso do espaguete, $m_{E.C}$ é a massa do espaguete após cocção e m_E é a massa do espaguete antes da cocção.

Pela Equação 15 determinou-se o incremento de volume ocorrido através da razão entre o volume do espaguete após e antes da cocção:

$$\Delta_{I.V} = \frac{V_{E.C}}{V_E}$$

Equação 15

onde $\Delta_{I.V}$ é o coeficiente de incremento de volume do espaguete, $V_{E.C}$ é o volume do espaguete após cocção e V_E é o volume do espaguete antes da cocção.

4.3.3.6 Sólidos Solúveis

O percentual de sólidos solúveis liberados pelo espaguete pós-cocção foi determinado a partir da água de cocção conforme Método 925.10 – AACC (1995) Inmetro (2005), sendo que o cálculo do percentual de sólidos solúveis (Figura 35) foi realizado através da aplicação da Equação 16:

$$\% S.S. = \frac{(m_{Cáp.+Res.} - m_{Cáp.}) \cdot 20}{(m_{Alíq.} - U_{B.U Esp.})} \cdot 100$$

Equação 16

onde % S.S é o percentual de sólidos solúveis, $m_{Cáp.+Res.}$ é a massa da cápsula mais o resíduo obtido após secagem em estufa, $m_{Cáp.}$ é a massa da cápsula, $m_{Alíq.}$ é a massa da alíquota, $U_{B.U Esp.}$ é a umidade do espaguete em base úmida após processo de secagem e o fator 20 é o fator de dissolução, que corresponde a razão entre 500 (mL de água) e 25 mL (valor da alíquota da solução contendo os sólidos solúveis).



Figura 35 – Solução de sólidos solúveis extraídas após cocção do espaguete.

4.3.3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Conforme Park e Antônio (2006) para a análise de MEV, a amostra é seca (MEV convencional) sendo pulverizada sobre ela uma camada fina de metal (ouro) para que possibilite a visualização. As imagens obtidas possuem boa intensidade e foco, sendo de fácil interpretação e permitindo a visualização de uma faixa ampla de aumentos (20x – 100.000x), podendo alcançar uma profundidade de campo de aprox. 500 vezes o valor da microscopia ótica. Esse microscópio é constituído de canhão eletrônico, lentes, coletor e amplificador de sinais, tubos de raios catódicos, circuito de varredura, sistema de vácuo, registro de imagens e controle (Figura 36).



Figura 36 – Microscópio eletrônico de varredura Superscan Shimadzu modelo SS-550 utilizado para registro de imagens do espaguete.

4.3.4 Caracterização Físico-química e Avaliação Sensorial do Produto

Para as análises sensoriais - uma vez que foi realizado o uso dos sentidos humanos para avaliar as características ou atributos do espagete (visão, olfato, tato, paladar), foi feito a cocção do espagete aplicando-se o Método 16-50 – AACC da American Association Of Cereal Chemistry (1995). A massa obtida foi lavada rapidamente em água destilada, sendo direcionada para as análises sensoriais de *textura, sabor/odor, consistência, corpo, pastosidade, viscosidade (sensorial), elasticidade, aparência* e “*performance*” de cocção, conforme a seguir.

Textura

A característica *al dente*, como denominam os italianos, expressam a textura de uma massa alimentícia de boa qualidade. Métodos objetivos têm sido utilizados para determinação da textura de massas como o desenvolvido pela NDSU (North Dakota State University, USA), que correlaciona firmeza com características da textura de interesse Ciacco e Chang (1986), embora, a análise sensorial para verificação da textura é a forma mais usual; realizada tomando-se um filete da massa obtida pós-cocção e posta à mastigação.

Ela foi realizada tomando-se um filete da massa obtida após cocção (apresentada anteriormente), sendo posta à mastigação pela laboratorista responsável pelas análises sensoriais.

Flavor

Esta verificação é uma sensação fisiológica da interação entre o paladar e olfato. A análise foi realizada tomando-se um filete da massa obtida após cocção (também posta à mastigação) para avaliação do sabor (idem etapa anterior), sendo que o odor foi verificado através da exalação dos voláteis liberados pela massa após a cocção, resultando numa nota.

Aparência

Esta verificação foi realizada visualizando-se os filetes do espaguete após a cocção, gerando como resultado uma avaliação visual da aparência da massa.

Outras variáveis sensoriais

Os atributos de consistência, corpo, pastosidade, viscosidade (sensorial) e elasticidade foram analisados sensorialmente através da manipulação dos filetes de espaguete após a cocção, gerando uma nota.

4.4 **Determinação das Variáveis do Processo**

A Figura 37 indica o *layout* da secadora PAVAN ML 2000 (Pavan, 2010), com uma adaptação indicando as variáveis de entrada e saída por zona da secadora em toda extensão da máquina.

Após registro das variáveis e obtenção dos resultados das análises laboratoriais conforme descrito, foram calculados para as *zona de secagem*¹¹ as variáveis de interesse, tendo como base recomendações de Pavan (2010).

- Vazão mássica de água evaporada por zona de secagem, \dot{m} .
- Quantidade de calor utilizado para evaporação da água por zona de secagem, $Q_{Evap \text{ Água}}$.
- Quantidade de calor utilizado para aquecimento (ou) resfriamento da massa por zona de secagem, $Q_{A/R \text{ massa}}$.
- Quantidade de calor utilizado para aquecimento das trocas de ar por zona de secagem, $Q_{A/R \text{ Trocas de ar}}$.
- Quantidade de calor fornecido pelos ventiladores, $Q_{Motores \text{ Ventiladores}}$.

¹¹ Aqui se entende como zonas as partes da secadora com baterias de ventiladores e radiadores onde ocorrem as trocas de calor e massa que promovem a secagem do espaguete.

- Quantidade de calor total absorvido pelo processo, $Q_{Total\ Abs.\ Processo}$.

4.4.1 Vazão mássica de água evaporada por zona de secagem

Antes de iniciar os cálculos da vazão mássica de água evaporada por zona de secagem, \dot{m} , foram encontrados os valores de vazão mássica para cada zona de secagem do processo, sendo que o valor inicial da vazão mássica do espaguete, $\dot{m}_{Amb\ Ext\ Ent} = \dot{m}_{Amb\ Ext\ Sai}$ - igual à vazão mássica de entrada na secadora na 1ª central do encartamento ($\dot{m}_{Ent\ 1ª\ Central}$) calculada conforme a Equação 17.

$$\dot{m}_{Amb.Ext\ Ent} = \dot{m}_{Amb.Ext\ Sai} = \frac{m_{Canas} \cdot n^{\circ}_{Canas}}{\Delta t_{Canas}} \quad \text{Equação 17}$$

onde $\dot{m}_{Amb.Ext\ Sai}$ é o valor da vazão mássica de espaguete (após extrusão) em kg/h; m_{Canas} é a massa em kg de espaguete presente nas canas (hastes de inox utilizada para transporte dos fios de espaguete na secadora); o n°_{Canas}

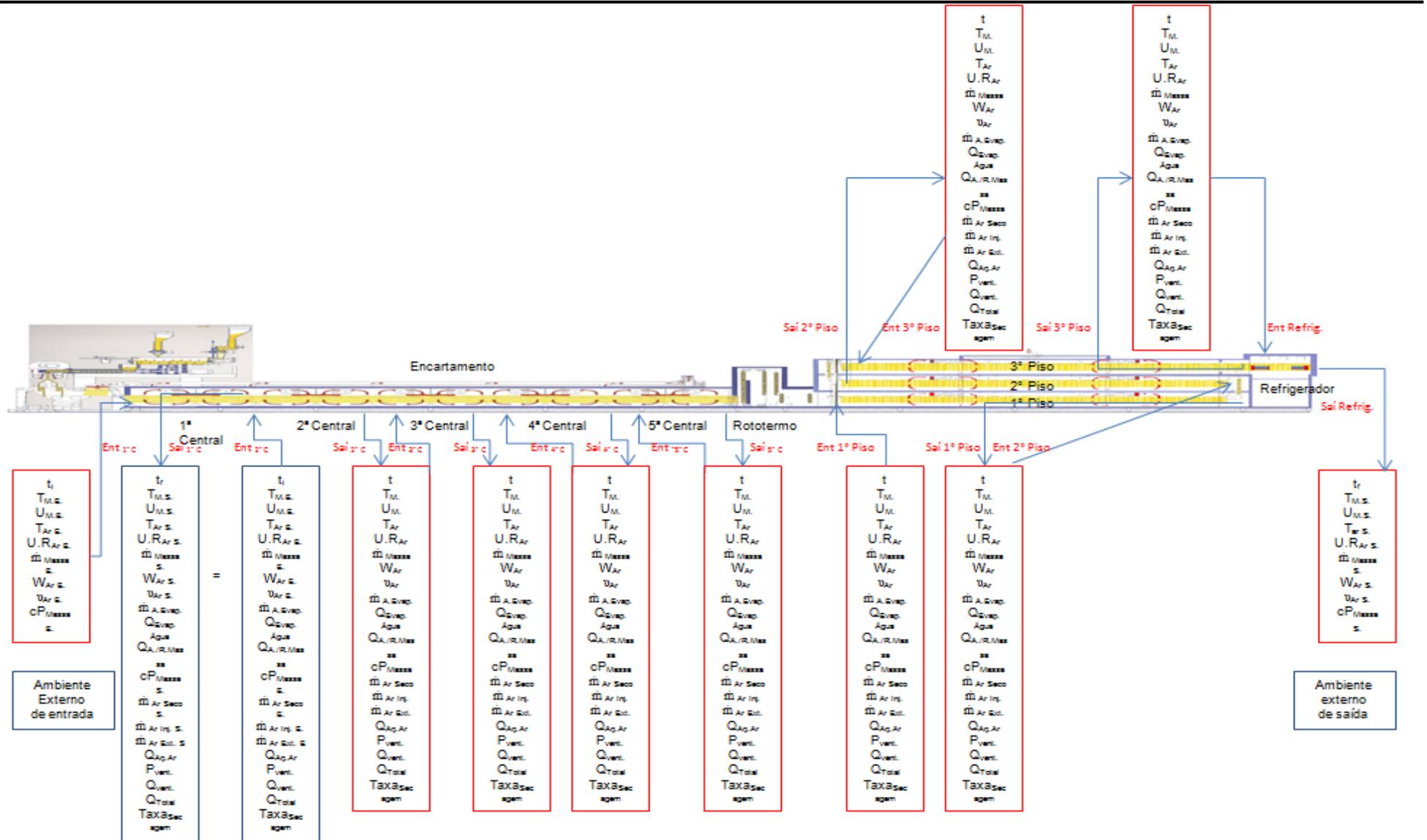


Figura 37 – Esquema geral do processo da secadora Pavan com variáveis de entrada e saída por zona de secagem (Pavan, 2010).

corresponde ao número de unidades de canas utilizados para medida da massa num tempo t , e o Δt_{Canas} equivale ao tempo (s) decorrido na coleta das canas para obtenção da vazão.

Uma vez calculado a $\dot{m}_{Amb.Ext}$ conjugado aos valores de umidades em base seca (utilizada para fins de pesquisa e equações de secagem) analisados na seção de umidade para o espaguete nas zonas, calculou-se a vazão mássica de espaguete em cada zona a partir da Equação 18.

$$\dot{m}_{Zona} = \dot{m}_{Z.A} - \left[\left(\frac{U_{B.S\ Massa\ Z.\ A.} - U_{B.S\ Massa\ Z.}}{100} \right) \cdot \dot{m}_{Z.A} \right] \quad \text{Equação 18}$$

onde \dot{m}_{Zona} é o valor da vazão mássica em kg/h da zona em que deseja calcular; $\dot{m}_{Z.A}$ é a vazão mássica na zona anterior; $U_{B.S\ Massa\ Z.\ A.}$ é a umidade em base seca da massa (na zona anterior); $U_{B.S\ Massa\ Z.}$ é umidade em base seca da massa na zona em análise.

A vazão mássica de água evaporada numa dada zona foi dada pela diferença entre a vazão mássica de entrada e saída nesta zona (Equação 19).

$$\dot{m}_{\text{Água Evap.Zona}} = \dot{m}_{Ent.Zona} - \dot{m}_{Sai.Zona} \quad \text{Equação 19}$$

4.4.2 Calor utilizado para evaporação da água por zona de secagem

Para determinação do calor utilizado para evaporação da água por zona de secagem, primeiramente, com uso da tabela de vapor saturado, foram obtidos os valores da entalpia H de evaporação (kJ/kg), através da diferença entre as entalpias do vapor e líquido saturados (Smith, Ness e Abbott, 2007).

Para tanto foi realizado uma interpolação de duas temperaturas intermediárias para determinação da entalpia correspondente à temperatura verificada na respectiva zona. Aplicando-se este valor na Equação 20, foi então possível definir a entalpia de evaporação por zona de secagem.

$$H_{Evap. Zona} (kJ/kg) = \left(\frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} \right) \cdot H_{1\ Evap.} + \left(\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \right) \cdot H_{2\ Eva.} \quad \text{Equação 20}^{92}$$

onde $H_{Evap. Zona}$ é a entalpia de evaporação do vapor da água saturado em kJ/kg para temperatura da zona; T é a temperatura da zona em °C; T_1 é a temperatura anterior à temperatura da zona em °C; T_2 é a temperatura posterior a temperatura da zona em °C; $H_{1Evap.}$ é a entalpia de evaporação do vapor da água saturado em kJ/kg para a temperatura de T_1 e $H_{2Evap.}$ é a entalpia de evaporação do vapor da água saturado em kJ/kg para a temperatura de T_2 .

Aplicando a Equação 21 obtêm-se o calor para evaporação da água.

$$Q_{Evap.}(kcal/h) = \dot{m}_{Água Evap. Zona} \cdot L$$

$$Q_{Evap.}(kcal/h) = \dot{m}_{Água Evap. Zona} \cdot H_{Evap.} \quad \text{Equação 21}$$

4.4.3 Calor utilizado para aquecimento (ou) resfriamento da massa por zona de secagem

Para o cálculo do calor utilizado para aquecimento ou resfriamento da massa por zona de secagem, é aqui colocado como aquecimento (ou) resfriamento, uma vez que isto depende da zona. Se esta for constituída de radiadores que fluem água aquecida nas caldeiras o calor será utilizado para aquecimento da massa, caso contrário, se neles fluírem água previamente resfriada nos chiller's, o calor será para resfriamento. Este calor será representando por $Q_{A/R massa}$, sendo $Q_A massa$ para aquecimento e $Q_R massa$ para resfriamento, todavia, para este cálculo, foi imprescindível determinar os valores do c_p (calor específico em kcal/kg.°C) do espaguete em todas as zonas.

O cálculo do c_p da massa foi realizado através da equação apresentada por Singh e Heldman (2009) na Equação 22 apresentada mais adiante, a partir dos valores das frações mássicas dos constituintes bioquímicos da massa (em cada zona da secadora), possibilitando a determinação da quantidade de calor utilizado para aquecimento (ou) resfriamento da massa nas respectivas zonas. Para fins didáticos, estas etapas foram separadas em 3 (três) passos.

1º Passo: determinaram-se os valores das massas (kg) dos constituintes do espaguete com o propósito de conhecer a fração mássica da

massa, e a partir destes valores - conjugados com as variações de umidade ao longo da máquina e as vazões mássicas nas zonas, pôde-se mensurar os valores das massas em kg de cada um dos constituintes em todas as zonas. Os constituintes químicos da massa foram determinados de acordo com o descrito na Equação 22.

2º Passo: obtido os valores da massa em kg dos constituintes em todas as zonas da secadora, calculou-se as frações mássicas de entrada (%) destes constituintes químicos (ressaltando que esta variação nas frações foi em função da redução de água ao longo do processo de secagem), sendo em seguida calculado o calor específico para todas as zonas através da aplicação da Equação 22 proposta por (Singh e Heldman, 2009):

$$c_p(\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 1,424 \cdot mc + 1,549 \cdot mp + 1,675 \cdot mf + 0,837 \cdot ma + 4,187 \cdot mm \quad \text{Equação 22}$$

onde c_p é o calor específico; mc é a fração mássica de carboidratos; mp é a fração mássica de proteínas; mf é a fração mássica de lipídeos; ma é a fração mássica de cinzas e mm a fração mássica de água, presentes na massa na respectiva zona.

3º Passo: Definido o calor específico, c_p (kcal/kg.°C), para cada zona de secagem, foi calculado a quantidade de calor utilizado para aquecimento ou resfriamento da massa nas respectivas zonas da secadora pela Equação 23:

$$Q_{\text{Aquec/Resfr.}}(\text{kcal/h}) = \dot{m}_{\text{Zona}} \cdot C_{p \text{ Massa Zona}} \cdot (T_{\text{Sai Zona}} - T_{\text{Ent Zona}}) \quad \text{Equação 23}$$

4.4.4 Calor utilizado para aquecimento das trocas de ar por zona de secagem

Dado os valores das temperaturas de bulbo seco e úmido do ar para as zonas da secadora, T_{BS} (°C) e T_{BU} (°C), obtidos através dos sensores externos de temperatura TMC50-HD que, transmitiu os dados para o *Software Bhw Lite* Hoboware (2010) - sistema de aquisição de dados utilizados no experimento; estes valores foram utilizados para análise e obtenção de outras variáveis em dois outros *softwares* de propriedades psicrométricas¹²:

¹² A carta psicrométrica foi dado em relação a pressão atmosférica ao nível do mar, região portuária da cidade de Salvador, onde a máquina está situada.

- *Software* Cytsoft Psychrometric Chart 2.2 - *software* de propriedades psicrométricas (Cytsoft Psychrometric Chart, 2009).

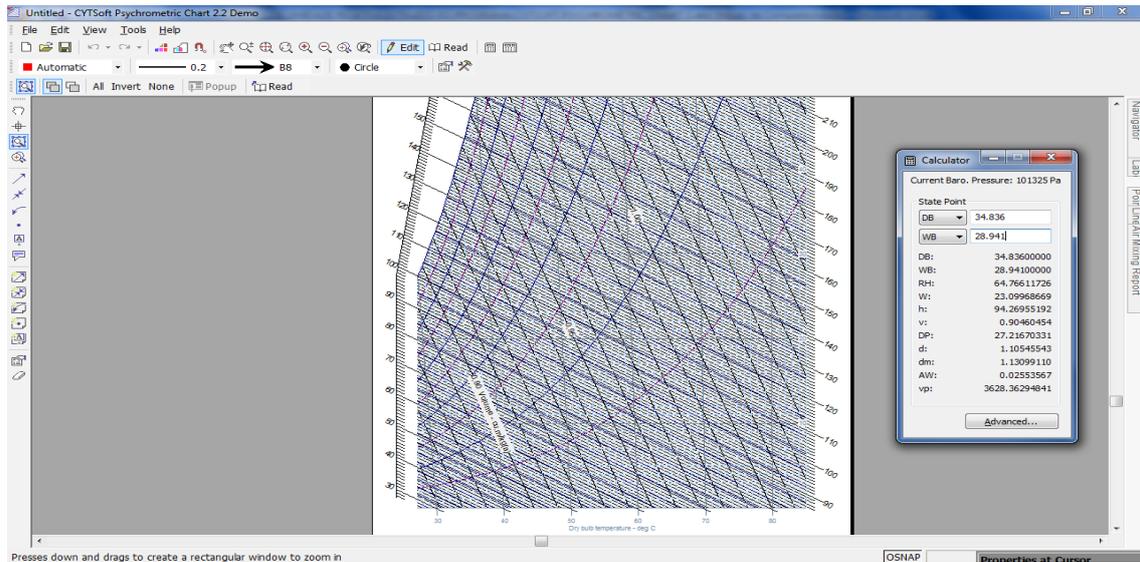


Figura 38 – Carta Psicrométrica no interior de fábrica em Salvador através da inserção das temperaturas de B.S e B.U (DB e WB) no *Software* Cytsoft Psychrometric Chart 2.2 (Cytsoft Psychrometric Chart, 2009).

onde ao lado direito do software estão as variáveis simbolizadas em inglês: DB e WB são as temperaturas de bulbo seco e úmido, RH é a umidade relativa (%), W a umidade absoluta (g H₂O/ kg de ar seco), h a entalpia (kJ/kg de ar seco), v é o volume específico (m³/kg de ar seco), DP é a temperatura do ponto de orvalho (°C), d é a densidade de ar seco (kg de ar seco/m³), dm é a densidade de mistura de ar (kg de mistura de ar/m³), AW é a umidade absoluta (kg/m³) e VP é a pressão de vapor (Pa).

Na Figura 38 a carta psicrométrica apresentada é referente ao *ambiente externo na entrada da secadora* (início do processo), sendo que ao final da dissertação no *Anexo B* estão indicadas as demais cartas obtidas para todas as zonas da secadora PAVAN ML 2000 kg/h (encartamento, 1º piso, 2º piso, 3º piso, refrigerador e parte externa da saída) do processo em estudo.

O *software* elaborou cartas admitindo faixas referentes às unidades abaixo, sendo que as equações utilizadas pelo programa para obtenção das variáveis psicrométricas podem ser encontradas no link do próprio programa

em Cytsoft Psychrometric Chart (2009), donde a:- pressão barométrica deve ter valores entre 20000 e 50000 Pa, a temperatura de bulbo seco valores entre -50°C e 200°C e a umidade absoluta com valores entre 0 e 120 g H₂O/ kg de ar seco:

- *Software* do LST Laboratório de Sistemas Térmicos - *software* de propriedades psicrométricas (Mendes *et al.*, 2007).

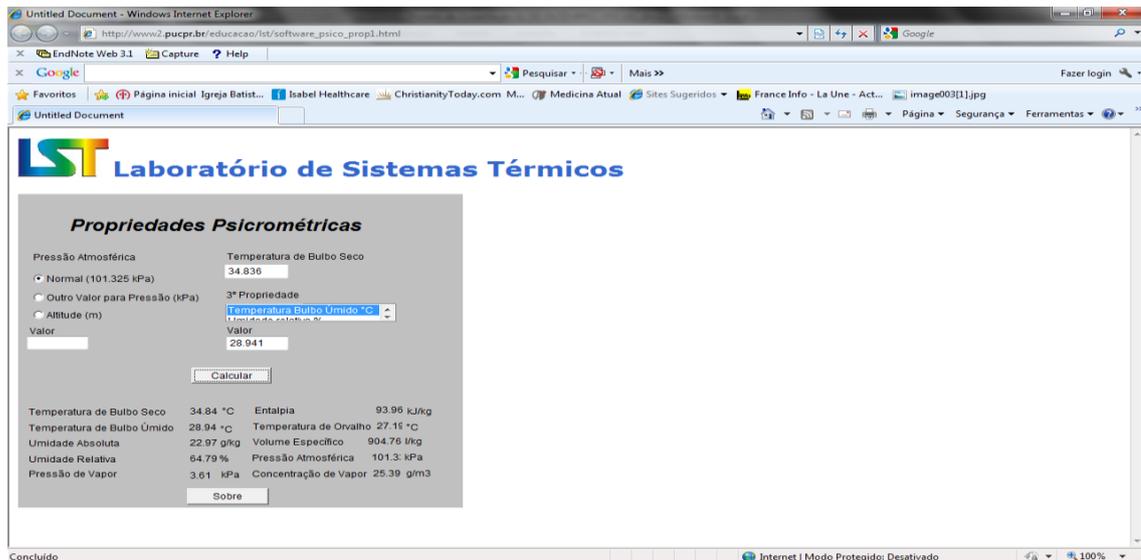


Figura 39 – Carta Psicrométrica no interior de fábrica em Salvador através da inserção das temperaturas de B.S e de B.U no *Software* da LST Laboratório de Sistemas Térmicos (Mendes *et al.*, 2007).

Como visto, através da entrada dos valores das temperaturas de bulbo seco e úmido do ar num *software* de propriedades psicrométricas, foi possível a obtenção das demais variáveis psicrométricas, dentre as quais, para fins de cálculo, destacam-se a *umidade relativa do ar*, $U.R_{AR}$ (%), a *umidade absoluta do ar*, W_{AR} (g de H₂O/ kg de Ar Seco) e o *volume específico do ar*, v_{AR} (m³/kg), que junto aos valores de vazão mássica de água evaporada nas câmaras ($\dot{m}_{Água\ Evap.}$) possibilitaram o cálculo das demais variáveis de interesse deste trabalho.

Para fins didáticos os cálculos foram separados em etapas, sendo que os primeiros 3 (três) passos referem-se as variáveis que foram calculadas que possibilitarão determinar o 4 (quarto) e último passo que é a determinação do calor de aquecimento das trocas de ar por zona de secagem, conforme segue:

1º Passo: determinação da vazão mássica de ar seco, $\dot{m}_{Ar\ Seco}$ (kg/h), em cada zona de secagem.

2º Passo: determinação da vazão volumétrica de ar extraído, $\dot{Q}_{Ar\ Extraído}$ (m³/h) e a vazão volumétrica de ar injetado, $\dot{Q}_{Ar\ Injetado}$ (m³/h), em cada zona de secagem.

3º Passo: determinação do $c_{p\ Ar\ Úmido}$ (kcal/kg. °C) e o valor da massa m_{Ar} (kg) de ar em cada zona de secagem da máquina.

4º Passo: por fim a determinação do valor do calor para aquecimento das trocas de ar, $Q_{Aquec.Trocas\ de\ Ar}$ (kcal/h), em todas as zonas de secagem.

Segue a seguir com detalhes a aplicação de cada um destes passos:

1º Passo: O cálculo da vazão mássica de ar seco, $\dot{m}_{Ar\ Seco}$ (kg/h), foi realizado conforme a Equação 24 (transferindo-se a vazão mássica de ar seco para o primeiro termo da equação), obtendo-se:

$$\dot{m}_{Água\ Evap.\ Zona} (kg/h) = \dot{m}_{Ar\ Seco\ Zona} \cdot (W_{Zona\ 2} - W_{Zona\ 1})$$

$$\dot{m}_{Ar\ Seco\ Zona} \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{\dot{m}_{Água\ Evap.\ Zona}}{(W_{Zona\ 2} - W_{Zona\ 1})} \quad \text{Equação 24}$$

onde $\dot{m}_{Água\ Evap.\ Zona}$ é a vazão mássica de água evaporada na zona em kg/h; $\dot{m}_{Ar\ Seco\ Zona}$ é a vazão mássica de ar seco na zona; $W_{Zona\ 2}$ é a umidade absoluta do ar na zona seguinte e $W_{Zona\ 1}$ é a umidade absoluta do ar na zona anterior.

2º Passo: encontrando-se a vazão mássica de ar seco nas zonas, e, com os valores dos volumes específicos v (m³/kg) obtidos do software psicrométrico para cada zona, foram calculados as vazões volumétricas do ar injetado $\dot{Q}_{Ar\ Injetado}$ (m³/h), e as vazões volumétricas do ar extraído $\dot{Q}_{Ar\ Extraído}$ (m³/h), em cada zona de secagem através da Equação 25 e da Equação 26.

$$\dot{Q}_{Ar\ Injetado\ Zona\ 2} \left(\frac{m^3}{h} \right) = \dot{m}_{Ar\ Seco\ Zona\ 2} \cdot v_{Zona\ 1} \quad \text{Equação 25}$$

$$\dot{Q}_{Ar\ Extraído\ Zona\ 2} \left(\frac{m^3}{h} \right) = \dot{m}_{Ar\ Seco\ Zona\ 2} \cdot v_{Zona\ 2} \quad \text{Equação 26}$$

onde $v_{Zona\ 1}$ é o volume específico do ar na zona anterior à zona analisada, e $v_{Zona\ 2}$ é o volume específico do ar na zona analisada.

3º Passo: nesta etapa foi calculado o calor específico do ar úmido das zonas da secadora, $c_{P\ Ar\ Úmido}$ (kcal/kg.°C), e a massa deste ar (kg) através da relação entre o volume específico do ar e o volume por ele ocupado através da Equação 27. Em seguida foi calculado o volume de ar injetado na zona através da Equação 28 e a densidade deste ar através da Equação 29; possibilitando o cálculo do valor da massa de ar injetado em cada zona através da Equação 30:

$$c_{P\ Ar\ Úmido} \left(\frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \right) = (0,24 + 0,45 \cdot W) \quad \text{Equação 27}$$

onde $c_{P\ Ar\ Úmido}$ é o calor específico do ar úmido em kcal/kg.°C e W é a umidade absoluta em kg H₂O/kg Ar Seco.

Uma vez obtido o valor da vazão volumétrica do ar injetado para a zona ($\dot{Q}_{Ar\ Injetado\ Zona}$), e, conhecendo-se o volume específico do ar $v_{Ar\ Seco\ Zona}$, foi possível encontrar a massa do ar na respetiva zona de secagem:

$$\dot{Q}_{Ar\ Injetado\ Zona} \left(\frac{m^3}{h} \right) = \frac{V_{Ar\ Injetado\ Zona}}{t}$$

onde $V_{Ar\ Injetado\ Zona}$ é o volume de ar injetado na zona (m³) e t o tempo em h, donde:

$$V_{Ar\ Injetado\ Zona} (m^3) = \dot{Q}_{Ar\ Injetado\ Zona} \cdot t \quad \text{Equação 28}$$

A partir da Equação 29 apresentada abaixo para a densidade, e como o volume específico, v (m³/kg), é o inverso da densidade, temos a Equação 30:

$$\rho_{Ar\ Injetado\ Zona} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{m_{Ar\ Injetado\ Zona}}{V_{Ar\ Injetado\ Zona}} \quad \text{Equação 29}$$

onde $\rho_{Ar\ Injetado\ Zona}$ é a densidade do ar injetado (kg/m³).

$$v_{Ar\ Injetado\ Zona} \left(\frac{m^3}{kg} \right) = \frac{V_{Ar\ Injetado\ Zona}}{m_{Ar\ Injetado\ Zona}}$$

$$m_{Ar\ Injetado\ Zona} (kg) = \frac{V_{Ar\ Injetado\ Zona}}{v_{Ar\ Injetado\ Zona}}$$

Equação 30

4º Passo: Com base nos valores encontrados para o calor específico do ar úmido, a massa do ar úmido ($\dot{m}_{Ar\ \acute{u}mido\ Zona}$) e a diferença entre as temperaturas de entrada e saída em cada zona ($T_{Sai\ Zona} - T_{Ent\ Zona}$); foi possível calcular o valor do calor para aquecimento das trocas de ar, $Q_{Aquec.Trocas\ de\ Ar}$ em todas as zonas de secagem, através da Equação 31:

$$Q_{Aquec.Trocas\ de\ Ar\ Zona} = \dot{m}_{Ar\ \acute{u}m.\ Zona} \cdot c_{P\ Massa\ Ar\ \acute{u}mido\ Zona} \cdot (T_{Sai\ Zona} - T_{Ent\ Zona})$$

Equação 31

4.4.5 Calor fornecido pelos ventiladores

Os ventiladores utilizados na secadora foram de 3 (três) tipos: *MV1*, *MV2* e *MV2/3*. Os ventiladores *MV2* e *MV2/3* são utilizados para ventilação na 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª zona do encartamento, e os ventiladores *MV2* operam no refrigerador da máquina. Os ventiladores do tipo *MV1* estão instalados no 1º piso, 2º piso e 3º piso da secadora. A potência elétrica total fornecida pelos ventiladores na zona, $P_{E\ Zona} (cv)$, pode ser obtida pela Equação 32:

$$P_{E\ Zona} (cv) = n_{MV1\ Zona} \cdot P_{E\ Vent.MV1} + n_{MV2\ Zona} \cdot P_{E\ Vent.MV2} + n_{MV2/3\ Zona} \cdot P_{E\ Vent.MV2/3} + n_{Vent.Refr.Zona} \cdot P_{E\ Vent.Refr.}$$

Equação 32

onde $n_{MV1\ Zona}$, $n_{MV2\ Zona}$, $n_{MV2/3\ Zona}$, $n_{Vent.Refr.Zona}$, é a quantidade de ventiladores e $P_{E\ Vent.MV1}$, $P_{E\ Vent.MV2}$, $P_{E\ Vent.MV2/3}$ e $P_{E\ Vent.Refr.}$ as potências elétricas.

4.4.6 Calor total do processo

A quantidade de calor total absorvido pelas zonas, $Q_{Total\ Abs.Zona}$, foi

dados pelo somatório do calor para evaporação da água, $Q_{\text{Água Evap.Zona}}$, o calor para aquecimento/resfriamento da massa, $Q_{\text{Aquec./ Resf. Massa Zona}}$, o calor para aquecimento das trocas de ar, $Q_{\text{Aquec.Trocas de Ar Zona}}$ e o calor fornecido pelos ventiladores, $Q_{\text{Motores dos Ventiladores Zona}}$, nas zonas da secadora (Equação 33):

$$Q_{\text{Total Abs.Zona}} = Q_{\text{Água Evap.Zona}} + Q_{\text{Aquec./ Resf. Massa Zona}} + Q_{\text{Aquec.Trocas de Ar Zona}} + Q_{\text{Motores dos Ventiladores Zona}} \quad \text{Equação 33}$$

4.4.7 Taxa de Secagem

Para determinação da taxa de secagem por zona para verificação do comportamento da cinética de secagem do espaguete, utilizou-se as variáveis tempo, vazão mássica e umidade (base úmida). Conforme citado na revisão bibliográfica, Park *et al.* (2007) e Geankoplis (2003) sugerem o uso da 2ª Lei de Fick para o cálculo da taxa de secagem através da equação Equação 34:

$$(\partial X/\partial t) = D_{AB} (\partial^2 X/\partial L^2)$$

Equação 34

Onde $\partial X/\partial t$ $\frac{\partial X}{\partial t}$ (kg_{H2O}/kg_{Massa Seca} · min) é o fluxo de massa por unidade de área que é proporcional ao gradiente de concentração de água; D_{AB} é o coeficiente de difusividade (m²/s) e $\partial X/\partial L$ é o gradiente de concentração (kg_{H2O}/kg_{Massa Seca}·m²).

Ainda segundo Park *et al.* (2007), para o cálculo da taxa deve ser utilizado às equações obtidas por Van Meel quando este propõe transformar as ordenadas e abscissas a fim de agrupar todas as curvas experimentais numa só curva de base ou característica de secagem, tendo na abscissa X:

$$(X) = Y = \left(\frac{X - X_{EQ}}{X_{CR} - X_{EQ}} \right) \quad \text{Equação 35}$$

Anterior ao cálculo da taxa de secagem foi encontrado a massa de água do espaguete por zona calculado através da Equação 36:

$$m_{H2O \text{ Zona}} (kg) = \left(\frac{U_{\text{Massa Zona}} \cdot m_{\text{Total Z.}}}{100} \right) \quad \text{Equação 36}$$

Em seguida a massa seca do espaguete foi obtida pela diferença entre a massa total e a massa de água para cada zona expressa pela Equação 37:

$$m_{Total\ Zona} (kg) = (m_{H2O\ Zona} + m_{M.S\ Zona})$$

$$m_{M.S\ Zona} (kg) = (m_{Total\ Zona} - m_{H2O\ Zona}) \quad \text{Equação 37}$$

A partir destes valores foram determinados $X_{B,S}$ e $X_{B,U}$ através da Equação 38 e da Equação 39 como demonstrado a seguir, possibilitando-se o cálculo da taxa de secagem (velocidade com a qual a secagem ocorreu) através da derivação da umidade em base seca função do tempo:

$$X_{B,S}(\%) = \left(\frac{m_{H2O\ Zona}}{m_{M.S\ Zona}} \right) \quad \text{Equação 38}$$

$$X_{B,U}(\%) = \left(\frac{M_{M.S} \cdot X_{B,S}}{M_{M.S} \cdot X_{B,S} + M_{M.S}} \right)$$

$$X_{B,U}(\%) = \left(\frac{X_{B,S}}{1 + X_{B,S}} \right) \quad \text{Equação 39}$$

e

$$Taxa \left(\frac{kg_{H2O}}{kg_{M.S} \cdot min} \right) = \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)$$

$$\frac{\partial X}{\partial T} \left(\frac{kg_{H2O}}{kg_{M.S} \cdot min} \right) = \left(\frac{X_{N+1} - X_N}{t_{N+1} - t_N} \right) \quad \text{Equação 40}$$

4.4.8 Umidade Livre Crítica

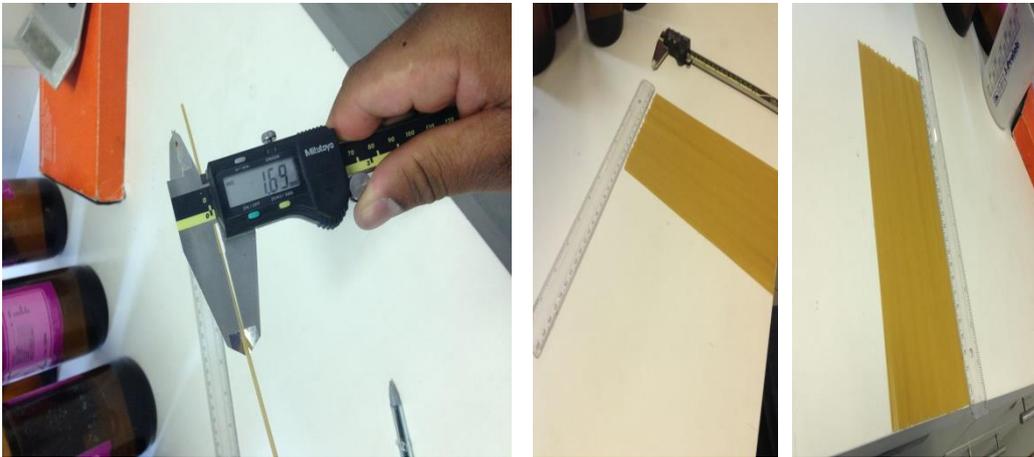
Para o cálculo do X_{cr} , foram coletados 5 amostras de fios de espaguete, e medidos a largura, comprimento, o diâmetro médio dos fios e o peso de cada amostra (Figura 40). A razão entre o peso das amostras e a área das respectivas placas (a área é aqui considerada como sendo igual à metade da área longitudinal de cada fio de espaguete, no caso, $\frac{1}{2} \cdot$ área longitudinal do cilindro), fornecendo uma constante (L_s/A) que, multiplicada pela variação da umidade no tempo (taxa de secagem) possibilitou a obtenção da *curva de*

secagem R , donde a análise gráfica permitiu a obtenção do X_{Cr} . A Equação 41 e a Equação 42 foram utilizadas para o cálculo de R .

$$A = \left(\frac{\pi \cdot D \cdot C}{2} \right) * N_{Fios} \quad \text{Equação 41}$$

$$R = - \frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad \text{Equação 42}$$

onde D é o diâmetro do fio (m), C o comprimento da placa (m), N_{Fios} é o número de fios por placa, R é a curva de secagem ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h} \cdot \text{m}^2$), L_s é o peso do sólido seco (placa) em kg; A é a área da superfície exposta para secagem (m^2) e $\frac{dX}{dt}$ ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{Massa Seca}} \cdot \text{h}$).



(a)

(b)

Figura 40 – Medições para determinação do X_{CR} (a) Determinação da espessura do espaguete, (b) Determinação da área da placa formada pelos filetes

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das Matérias-primas

Segundo Park e Antônio (2006) a caracterização de um alimento consiste em analisar a sua composição química, as características físicas e sensoriais. A análise química e físico-química tem como objetivo a determinação de um ou vários componentes ou elementos químicos que o constituem. A seguir serão descritos os valores obtidos a partir das análises das matérias-primas e amostras obtidas em todas as etapas do processo.

5.1.1 Densidades das Matérias-primas

Aplicando a Equação 1 para cálculo da densidade (obtida pela média das amostras da farinha de trigo e três amostras de água potável utilizada no processo), obteve-se os valores apresentadas na Tabela 9:

Tabela 9 – Valores médios das densidades da farinha e água.

<i>Média Aritmética das Densidades</i>			
<i>Amostra</i>	<i>Média $\rho(g/cm^3)$</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coefficiente de Variação (%)</i>
Farinha Tipo Comum	1,5076	0,0096	0,64
Água Potável	0,9970	0,0006	0,06

5.1.2 Umidades em Base Úmida e Base Seca

Park e Antônio (2006) citam que o método direto de determinação de umidade por estufa remove a água através do aquecimento, levando algum tempo para atingir as porções internas do alimento pela condutividade térmica baixa, onde o ar quente é absorvido por uma camada muito fina do alimento e posteriormente ele é introduzido para o interior deste por condução.

Aplicando-se a Equação 2 e Equação 3 aos valores das amostras coletadas no processo, obteve-se os valores de umidade em base úmida e seca (Tabela 55 no anexo), sendo que para fins de cálculos posteriores os valores utilizados serão em base seca. A partir disto foi possível o cálculo das umidades em base úmida e seca (pelas médias aritméticas das umidades encontradas), conforme aparecem separadas nas Tabela 10 e Tabela 11.

Na Figura 41 temos o comportamento destas variáveis no processo. Esta primeira elevação de umidade da farinha à massa após a mistura (início de processo), deve-se a hidratação da farinha na masseira que eleva a massa a um teor de umidade entre 28 à 32% (a média na massa após mistura teve um valor de 30,614%). É também verificando uma redução acentuada no encartamento - seção da máquina onde ocorre uma secagem mais abrupta (da 1ª à 5ª central), diminuindo a redução de água nos pisos (1º, 2º e 3º) até manter-se praticamente constante na saída do refrigerador (final do processo).

Tabela 10 - Umidades em base úmida obtidas pela média aritmética das umidades de diferentes amostras.

Média Aritmética das Umidades em Base Úmida			
Amostras	Média $U_{B.U.}\%$	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Farinha Tipo Comum	13,417	0,021	0,16
Massa Após Mistura	30,614	0,094	0,31
Remoído de Reprocesso	11,283	0,015	0,13
Massa Ambiente Externo	28,724	0,030	0,11
Massa Saída 1ª Central	25,461	0,811	3,19
Massa Saída 2ª Central	23,382	0,046	0,20
Massa Saída 3ª Central	19,057	0,211	1,11
Massa Saída 4ª Central	18,518	0,139	0,75
Massa Saída 5ª Central	18,902	0,036	0,19
Massa Saída 1º Piso	12,959	0,184	1,42
Massa Saída 2º Piso	11,266	0,066	0,59
Massa Saída 3º Piso	11,203	0,082	0,74
Massa Saída Refrigerador	11,100	0,119	1,07

Tabela 11 - Umidades em base seca (B.S) obtidas pela média aritmética das umidades para diferentes amostras.

Média Aritmética das Umidades em Base Seca

Amostras	Média $U_{B,S}$%	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Farinha Tipo Comum	15,496	0,029	0,18
Massa Após Mistura	44,121	0,196	0,44
Remoído de Reprocesso	12,718	0,118	0,93
Massa Ambiente Externo	40,300	0,060	0,15
Massa Saída 1ª Central	34,166	1,460	4,27
Massa Saída 2ª Central	30,517	0,078	0,26
Massa Saída 3ª Central	23,544	0,322	1,37
Massa Saída 4ª Central	22,726	0,209	0,92
Massa Saída 5ª Central	23,307	0,055	0,24
Massa Saída 1º Piso	14,889	0,244	1,64
Massa Saída 2º Piso	12,697	0,084	0,66
Massa Saída 3º Piso	12,616	0,105	0,83
Massa Saída Refrigerador	12,498	0,150	1,20

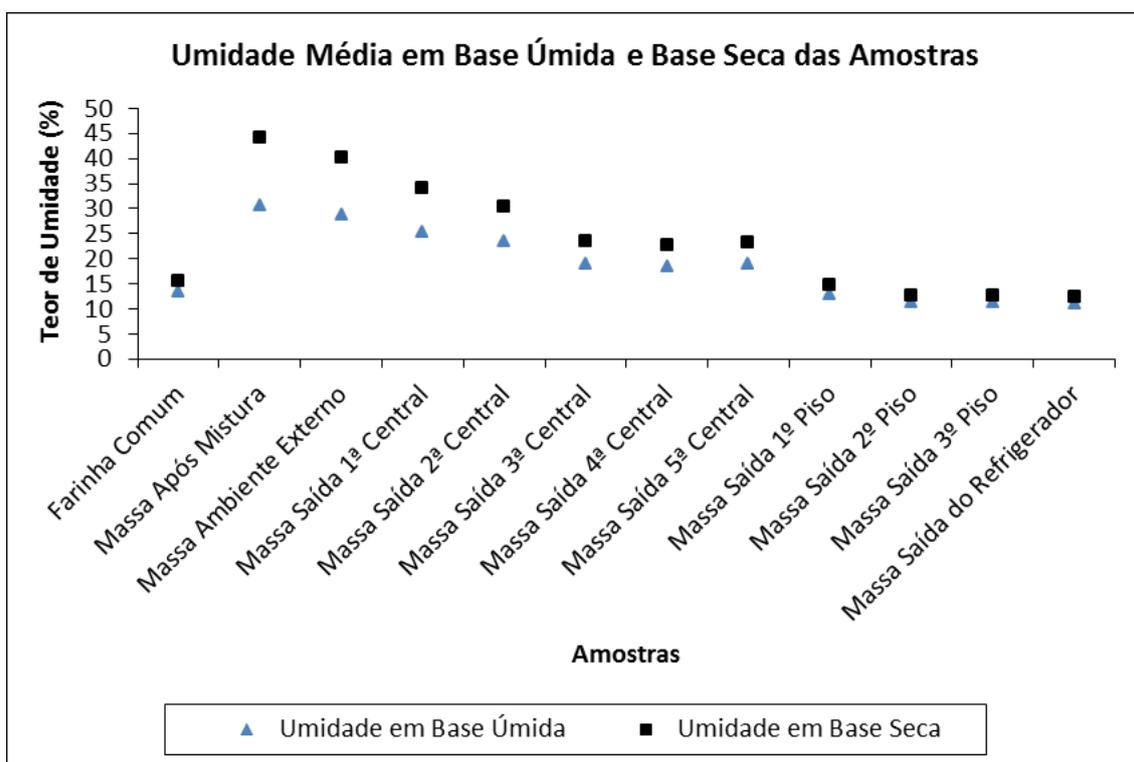


Figura 41 – Umidades médias em base úmida e seca das amostras.

5.1.3 Cor das Matérias-primas e Produto

Nos resultados de análise da cor o valor de L é o de maior importância, todavia, os valores de a e b podem ser um indicativo no que diz respeito à cor após secagem, o qual é de suma importância comercial. A Tabela 12 abaixo mostra os valores encontrados para as três amostras.

Tabela 12 – Cor da farinha e remoído de reprocesso obtida em colorímetro digital.

Amostra	Cor¹³		
	L*	a*₊	b*₊
Farinha Tipo Comum	91,29	0,35	10,14
Remoído de Reprocesso	81,39	1,83	18,87
Massa Seca Final	54,14	9,48	20,90

Embora a farinha apresentasse pontos pretos tendendo a uma cor marrom (típica da farinha comum), o valor de L^* apresentado para esta farinha foi satisfatório, porém a cor da massa obtida com a queda acentuada no valor de L *deveu-se ao escurecimento ocorrido ao longo do processo de secagem* com a elevação de a^* (tendência de cor para tonalidade vermelha) indicativo de *reações de Maillard*, e b^* (tendência de cor para tonalidade amarela) deveria ser maior com valor próximo a 30, indicando farinha de boa qualidade. Estes resultados indicaram que o processo foi decisivo para o escurecimento da massa

5.1.4 Teor de cinza dos ingredientes e da massa elaborada

O teor de cinzas da farinha de trigo, remoído de reprocesso e massa após mistura foram calculados pela média aritmética dos teores de cinzas em base seca destas amostras (Equação 6), sendo os resultados satisfatórios conforme Tabela 13 e Figura 42.

Tabela 13 - Teores de cinzas em base seca obtidas pelas médias aritméticas das diferentes amostras.

Média Aritmética das Cinzas em Base Seca

¹³ Para revisão dos conceitos das variáveis referentes à cor, retornar ao capítulo de Revisão Bibliográfica - A Farinha de Trigo, e ver no subtítulo Cor a definição destas variáveis.

Amostra	$Cz_{B.S}(\%)$	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Farinha Tipo Comum	0,706	0,009	1,25
Remoído de Reprocesso	0,609	0,008	1,27
Massa Após Mistura	0,698	0,017	2,37

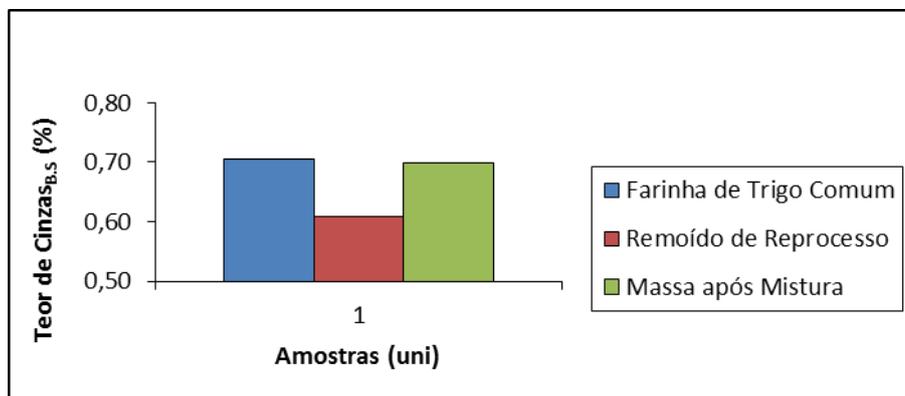


Figura 42 – Teor de cinzas médio da farinha, remoído e massa elaborada.

5.1.5 Efeitos da Composição da Farinha sobre o Produto

Glúten: a *massa de Glúten Úmido* foi obtida pelo somatório do *Glúten Retido* e do *Glúten que ultrapassou os poros*, sendo que a *massa de Glúten Seco* foi dada pela massa total do glúten (retido + passado pelos poros) após seco.

Aplicando os valores as Equação 7 e Equação 8, obteve-se o Glúten Úmido e o Glúten Seco. O Glúten Index foi dado pela razão entre a massa do Glúten Retido e a massa total do Glúten, havendo uma relação entre os resultados do índice de glúten e o número de *inchamento*, que faz correlação direta com a força da farinha, ou seja, quanto maior a força, maior o número de inchamento (Pizzinatto, 1999).

Tabela 14 – Valor médio do teor de glúten para farinha do tipo comum.

Teor de Glúten (%)

Amostra	Base Úmida G_U	Base Seca G_S	Index G_I
Farinha Tipo Comum	27,40	9,01	89,5
Desvio Padrão	0,56	0,16	6,36
Coeficiente de Variação (%)	0,02	0,02	0,07

Em termos físicos o valor do glúten Index mede a força do Glúten. Quanto menos massa passar pelos poros após centrifugação, isto indica que a rede de glúten apresenta maior aderência, conseqüentemente, mais forte será o glúten da farinha. Por outro lado quanto mais passar, mais fraco será este glúten.

Farinhas com o glúten classificado como forte são mais indicados para fabricação do espagete em função das condições de pressão e temperatura as quais a massa é submetida na extrusão e secagem, respectivamente. Na Tabela 15 são demonstrados os níveis de classificação da farinha quanto à qualidade (avaliada pelo índice de glúten), sendo que a farinha utilizada foi classificada como uma “*farinha boa*”.

Tabela 15 – Classificação da farinha quanto à qualidade pelo índice de glúten.

Índice de Glúten	Classificação da Farinha
> 90	Muito boa
60 - 90	Boa
40 - 60	Média
< 40	Fraca

Fonte: (Pizzinatto, 1999).

Proteínas: Aplicando-se a Equação 10, obteve-se o valor médio do percentual de proteína (utilizando os valores das constantes citadas e obtidos na análise) descrito na Tabela 16, sendo adiante utilizada para fins de cálculo.

Tabela 16 – Percentual médio de proteína total na farinha de trigo tipo comum.

Amostra	% Proteína Total
Farinha Tipo Comum	10,6250
Desvio Padrão	0,1311
Coeficiente de Variação (%)	1,23

Lipídios: Através da aplicação da Equação 11 as amostras de farinha, obteve-se o percentual médio de gordura como apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Percentual de gordura na farinha de trigo tipo comum.

Amostra	% Gordura
Farinha Comum	0,4955
Desvio Padrão	0,0084
Coefic. Variação (%)	1,69

5.1.6 Tamanho Médio dos Grânulos da Farinha de Trigo

Foi utilizado 100 g de farinha no ensaio de granulometria, sendo que a diferença entre o peso total da bateria de peneiras e a massa de farinha retirada de cada uma é equivalente ao percentual de farinha para cada malha, que representa o percentual da distribuição granulométrica da farinha e o percentual acumulado nos diâmetros das peneiras citados conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Distribuição granulométrica da farinha para peneiras de diferentes diâmetros.

Diâmetro (μm)	% Gran.	% Gran. Acum.
180	6,61	6,61
150	8,39	15,00
125	18,00	33,00
106	13,00	46,00
RCF ¹⁴	54,00	100,00

¹⁴ RCF: recipiente de coleta final

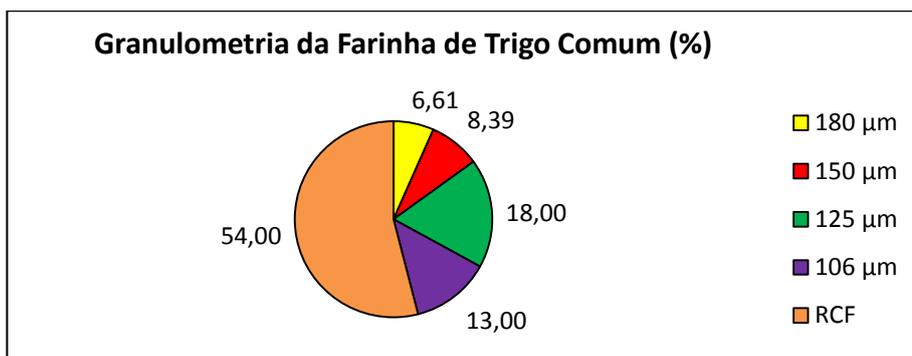


Figura 43 – Granulometria da farinha tipo comum utilizada.

5.1.7 Resultados das Variáveis Reológicas da Farinha de Trigo

Determinação do Falling Number (Número de Queda):

Para farinha analisada, 100 % das partículas tiveram diâmetros menores que 210 micra (obtido pela determinação da granulometria), portanto, dentro da faixa prevista, pois a granulometria influencia o número de queda. A medida foi realizada obtendo os resultados iguais a 327 s e 333 s, logo, o valor final do *F.N* foi igual à média aritmética (Tabela 19).

Para as massas o valor do *F.N* deve ser maior que 250 s, logo, a farinha esteve dentro do padrão conforme Pizzinatto (1999), indicando baixo teor de α -amilase que poderia provocar reações indesejáveis com perdas na qualidade do produto. Na Tabela 20 é correlacionado o valor de *F.N* e atividade da α -amilase, mostrando que valores superiores a 300 s são favoráveis à fabricação de massas.

Tabela 19 – Falling Number da farinha de trigo tipo comum.

Falling Number (s)	
<i>Amostra</i>	<i>Número de Queda (s)</i>
Farinha Tipo Comum	330
Desvio Padrão	4,24
Coef. Variação (%)	1,28

Tabela 20 – Valores de falling number e a atividade da α -amilase.

Valor “Falling Number”	Atividade da α-amilase
Inferior a 150 segundos	Alta
Entre 200 e 300 segundos	Ótima
Superior a 300 segundos	Baixa

Fonte: (Pizzinatto, 1999).

Alveografia¹⁵: Na Tabela 21 seguem os valores obtidos desta análise para farinha de trigo tipo comum:

Tabela 21 – Variáveis obtidas na análise alveográfica da farinha de trigo.

Variáveis da Análise de Alveografia da Farinha						
Amostra	P(mm)	L(mm)	P/L	W(10⁻⁴J)	G	Ie
Farinha Tipo Comum	93,70	61,00	1,54	226,20	17,30	51,60

Farinografia: na Tabela 22 estão expressos os resultados referentes ao farinograma da farinha de trigo comum utilizada na fabricação do espaguete:

Tabela 22 – Variáveis obtidas na análise farinográfica da farinha de trigo.

Variáveis da Análise de Farinografia da Farinha							
Amostra	Abs.	t_c	t_s	t_{DM}	E	ITM	t_q
	(%)	(min)	(min)	(min)	(min)	(U.F)	(min)
Farinha Tipo Comum	59,0	1,17	10,5	6,0	9,33	40	10,5

Extensografia: Os resultados das variáveis obtidas no extensograma para as curvas nos tempos de descanso estão apresentadas na Tabela 23:

Tabela 23 – Valores da extensografia realizada para farinha do tipo.

Variáveis da Análise de Extensografia da Farinha						
Farinha Tipo Comum	A (cm²)	R (U.E)	RM (U.E)	E (mm)	D (R/E)	Nox (A.E/R)
45 min	109,5	370,0	502,5	175,0	2,11	5,15
90 min	149,1	475,0	602,5	172,5	2,78	5,45
135 min	130,7	525,0	675,0	151,5	3,46	3,74

¹⁵ Para revisão dos conceitos das variáveis referentes à Alveografia, Farinografia e Extensografia, retornar ao capítulo de Revisão Bibliográfica - A Farinha de Trigo, e ver os tópicos referentes a estes itens.

5.2 Caracterização do Espaguete

5.2.1 Umidade Final do Espaguete

A umidade (B.U) para amostras de espaguete foram calculadas de modo análogo a Equação 2, e os valores convertidos em umidade de bulbo seco pela Equação 3, sendo o valor médio das amostras demonstrado na Tabela 24.

Tabela 24 - Valor médio da umidade (%H₂O) em base seca do espaguete comum obtido ao fim da secagem.

Umidade do Espaguete em Base Seca						
Amostra	$m_C(g)$	$m_A(g)$	$m_{C+A}(g)$	$m_{C+R}(g)$	$U_{B,U}\%$	$U_{B,S}\%$
Espaguete	29,2790	2,0031	31,2825	31,0600	11,110	12,498
Desvio Padrão	0,7210	0,0031	0,7233	0,7211	0,119	0,150
Coef. Variação (%)	2,46	0,16	2,31	2,32	1,07	1,20

5.2.2 Cor do Espaguete

Os valores obtidos na análise de cor do espaguete (referente aos valores de L^* , a^* e b^* respectivamente) conforme a Tabela 25 foram iguais à:

Tabela 25 – Análise de qualidade da cor do espaguete em colorímetro digital.

Amostra	Cor		
	L^*	a^*	b^*
Espaguete Tipo Comum	54,140	9,480	20,900

5.2.3 Características Dimensionais do Espaguete Produzido

Comprimento: O valor médio de comprimento do espaguete (através das medições das amostras) aparece na Tabela 26, e na Figura 44 o gráfico demonstra o comprimento de 10 fios de espaguete medidos após corte final.

Tabela 26 – Determinação do comprimento do espaguete após secagem.

Comprimento (mm) do Espaguete Comum	
Amostra	C (mm)
Espaguete Tipo Comum	249,3
Desvio Padrão	6,9
Coeficiente de Variação (%)	2,77

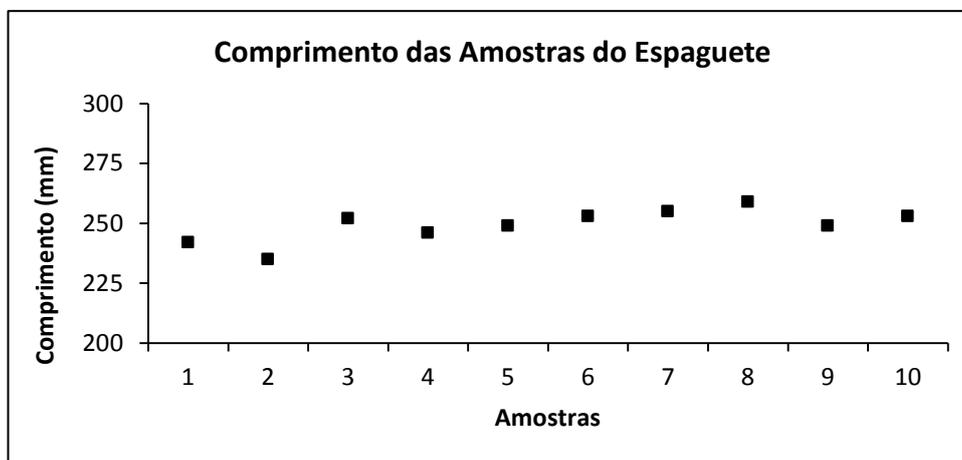


Figura 44 – Comprimento das amostras de espaguete produzido.

O comprimento considerado foi dado pela média aritmética dos valores obtidos, sendo igual a $249,3 \text{ mm}$. Uma vez que o padrão de qualidade prevê variação do tamanho entre 250 e 260 mm, foi possível encontrar um indicador de qualidade para a quantidade de fios que estiveram dentro do especificado através Equação 12. Aplicando esta para as medidas encontradas obtivemos o percentual de qualidade (% Q.C) referente ao comprimento de 50%.

Espessura: O valor de espessura do espaguete foi obtido após média dos valores das amostras (

Tabela 27), e na Figura 45 é apresentado o gráfico da espessura (10 fios de espaguete), obtidos após finalização do processo.

Tabela 27 – Determinação da espessura do espaguete após secagem.

Espessura (mm) do Espaguete Comum	
Amostra	E (mm)
Espaguete Tipo Comum	1,69
Desvio Padrão	0,02
Coeficiente de Variação (%)	1,32

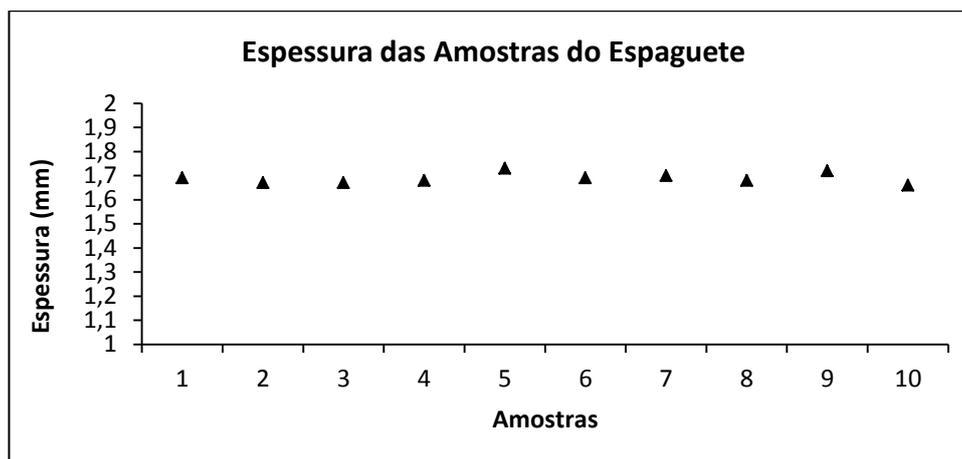


Figura 45 – Espessura das amostras de espaguete produzido.

A média aritmética da

Tabela 27 para a massa após secagem foi 1,69 mm. Aplicando-se a Equação 13 para avaliar o padrão de qualidade (% Q.E) para a espessura (padrão entre 1,65 e 1,85 mm), obteve-se indicador de 100%:

Para o comprimento e espessura, observa-se que no primeiro obteve-se um índice de qualidade não satisfatório de 50% (recomendação é entre 250 e 260 mm), possivelmente em função de variação de pressão da rosca extrusora sobre a massa gerando distribuição irregular dos fios, com comprimentos diferentes. Para minimização desta anomalia pode-se regular o posicionamento dos discos de corte reduzindo as discrepâncias.

Por outro lado, a espessura dos fios obteve índice de qualidade de 100% (entre 1,65 e 1,85 mm) refletindo boa qualidade das pastilhas. A pressão de extrusão (110,8 kgf/cm²) e o fluxo contínuo de massa geram desgaste lateral das paredes da pastilha aumentando a espessura do espaguete até limites que inviabiliza o uso pela dificuldade em secar a massa, sobretudo, as pastilhas utilizadas estavam em boas condições favorecendo a produção.

5.2.4 Coeficiente de Incremento de Peso e Volume

Coeficiente do Incremento de Peso: aplicando-se a Equação 14 para

determinação do coeficiente do incremento de peso, (para amostra antes e após cocção com massa de 50,60 g e 122,42 g devido absorção de água), obtendo-se o $\Delta_{I.P}$ de 2,419, valor este dentro do padrão (mín. 2,0 e máx. 3,0).

Coeficiente do Incremento de Volume: Após imersão de 50 g de massa em 500 mL de água na proveta, observou-se variação de 33 mL no volume, sendo que após cocção a amostra foi novamente posta em 500 mL de água e foi verificado o novo volume de 106,0 mL. Aplicando a Equação 15 para determinação do incremento de volume no espaguete (pela razão entre o volume do espaguete após e antes da cocção), obteve-se o $\Delta_{I.V}$ igual a 3,212; que também está dentro do padrão (mínimo de 3,0 e máximo de 4,0).

5.2.5 Tempo de Cocção

O não desaparecimento do *núcleo branco do centro da massa (o hilo central)* indica que a cocção não foi completada, logo, todo amido não está gelatinizado, havendo ainda partes a serem submetidas ao efeito do calor. No caso da análise realizada no espaguete obtido após processo, o tempo medido no cronômetro para cocção foi de 9 min e 52 s (592 s).

5.2.6 Qualidade da Massa X Sólidos Solúveis

Aplicando-se a Equação 16 aos valores das amostras na determinação de sólidos solúveis, tem-se que a média aritmética dos valores da Tabela 28 para o espaguete após cocção foi de 10,6683%, e. Segundo Ciacco e Chang (1986) para referência do percentual de sólidos solúveis temos que:

- **Muito Bom** (menor que 5,5)
- **Bom** (5,5 a 6,6)
- **Médio** (6,7 a 8,0)
- **Ruim** (maior que 8,0)

Esta massa foi classificada como *ruim* conforme bibliografia. Na Tabela 29 são apresentadas algumas das variáveis físicas de suma importância na avaliação da qualidade do espaguete mencionadas e analisadas, fazendo-se um paralelo entre o padrão e o real obtido através da análise da massa final, observando que para as cinco variáveis, a saber: a *umidade*, o *tempo de cocção*, o *coeficiente de incremento de peso*, o *coeficiente de incremento de volume* e o *teor de sólidos solúveis*, em todas elas a massa formada esteve fora do padrão recomendado conforme

Figura 46:

Tabela 28 – Valor médio do percentual dos sólidos solúveis.

Valor médio do percentual de sólidos solúveis					
Amostras	$m_{Cáp.}$	$m_{Cáp.+Res.}$	$m_{Alíq.}$	$U_{B.U}(\%)_{Esp.}$	S.S (%)
Sólido Solúvel	26,7979	29,842	24,9531	10,260	10,6683
Desvio Padrão	0,3419	0,3429	0,0190	0,000	0,4725
Coef. Variação (%)	1,15	1,15	0,08	0,00	4,43

Tabela 29 – Variáveis físicas de medição da qualidade do espaguete.

Padrão X Real das variáveis físicas de medição da qualidade da massa		
Amostras	Padrão	Real
% $U_{B.U.}$ (Umidade $B.U.$)	12,50	11,110
t_{CC} (Tempo de Cocção em min)	10,00	9,870
$\Delta_{I.V}$ (Coeficiente de Incremento de Volume)	3,50	3,212
$\Delta_{I.P}$ (Coeficiente de Incremento de Peso)	2,50	2,419
%S.S (Sólidos Solúveis)	6,00	10,668

A umidade final da massa esteve com valor abaixo do padrão, indicando secagem forçada principalmente no 1º piso da secadora. Em relação ao coeficiente de incremento de peso e de volume, esteve ligeiramente abaixo do padrão. O tempo de cocção foi próximo ao limite máximo determinado pelo fabricante, e, no que diz respeito à qualidade da massa *versus* sólidos solúveis, o espaguete obtido foi classificado como *ruim* devido o alto teor apresentado.

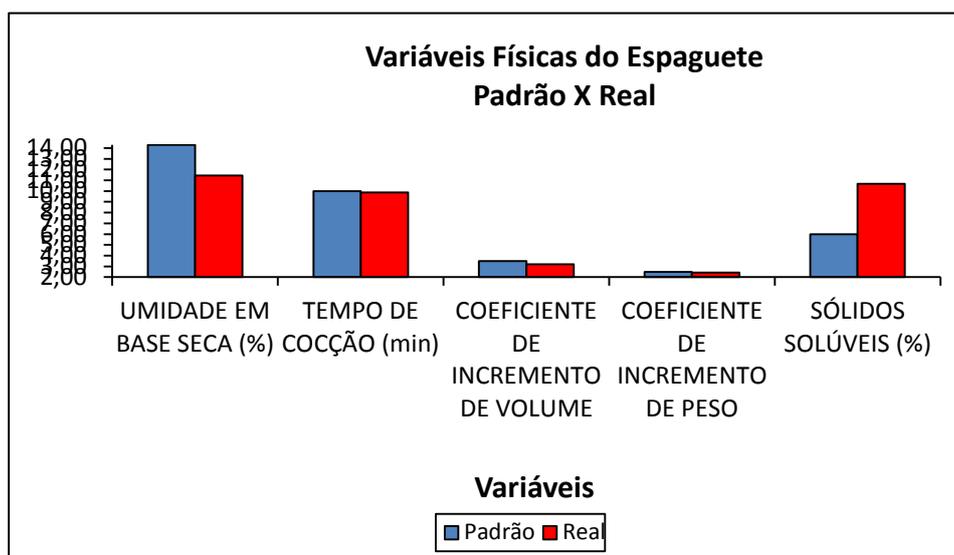


Figura 46 – Comparativo do Padrão X Real das variáveis físicas da qualidade do espaguete.

5.2.7 Efeitos do Processo de Secagem e Farinha sobre a Estrutura do Espaguete

O conhecimento detalhado da natureza física da superfície dos sólidos é imprescindível, sendo que a microscopia eletrônica permite ótimas resoluções de imagem obtidas pela varredura da superfície de uma amostra, com um feixe de elétrons finamente focalizado ou uma sonda apropriada. O rastreamento é um padrão de varredura similar ao de tubos de raios catódicos ou de tv, no qual um feixe de elétrons desloca-se sobre uma superfície em linha reta retornando a posição inicial, repetindo o processo até que uma dada área da superfície seja varrida, donde um sinal é emitido para conversão das imagens num computador (Skoog, Holler e Nieman, 2002).

As imagens da MEV do espaguete resultante (Figura 47) permite identificar a presença de corpúsculos, possivelmente grânulos de remoído de reprocesso adicionado (10%) que reduziram a qualidade do produto final elevando o teor de sólidos solúveis. É possível também perceber a presença de fibras e fissuras que podem provocar rupturas no produto na cocção. Estas foram provenientes de *pré-secagem* no *encartamento* insuficiente, reflexos de

um diagrama de secagem irregular, além de um tempo inadequado para a estabilização da massa.

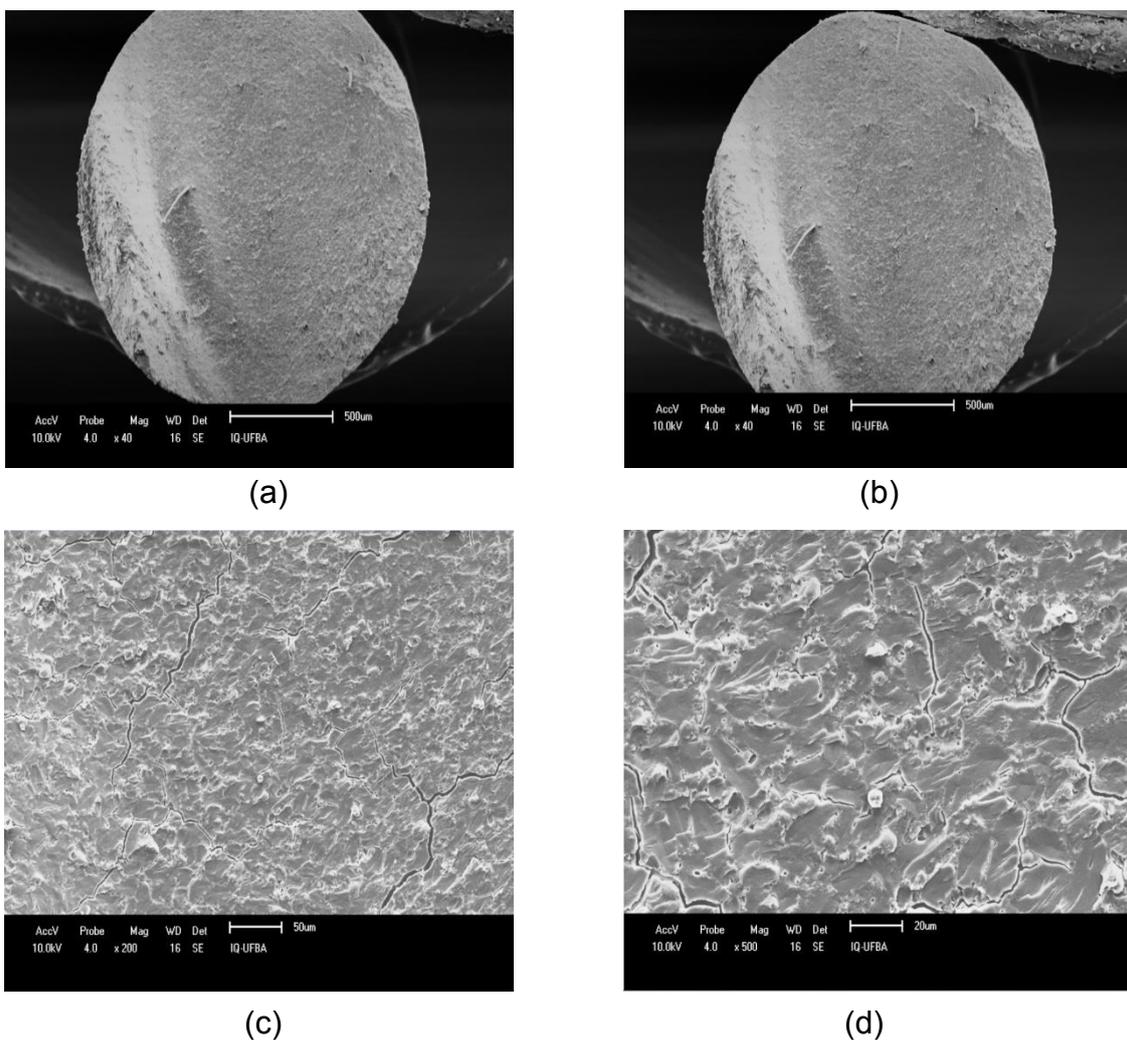


Figura 47 – MEV do espaguete (a) e (b) Imagem aumentada em 40 x, (c) Imagem aumentada em 200 x, (d) Imagem aumentada em 500 x.

5.3 Análises Sensorial do Espaguete

Abaixo estão expressos os resultados das análises sensoriais de *textura, flavor, sabor/odor, consistência, corpo, pastosidade, viscosidade (sensorial), elasticidade e aparência* (ver imagem obtida na Figura 48):

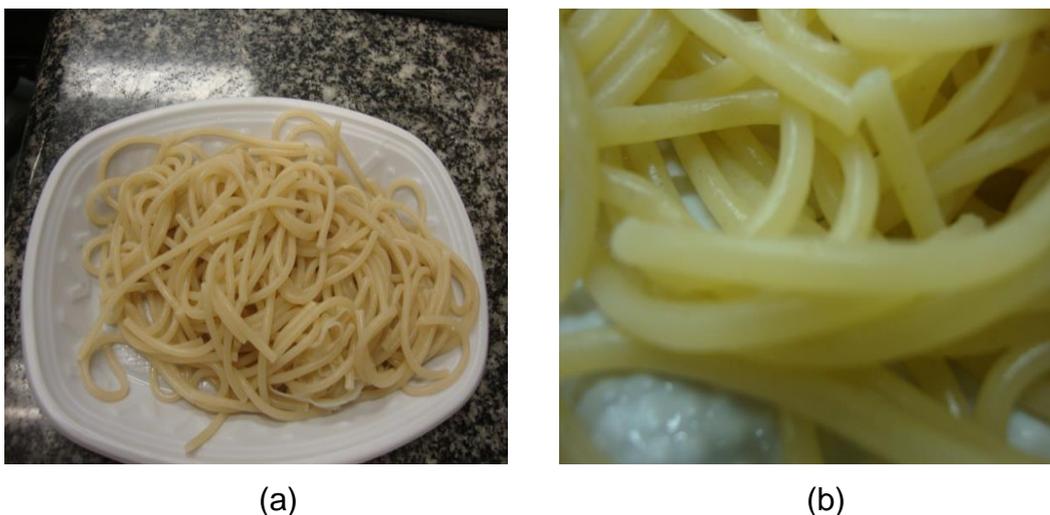


Figura 48 – Aparência do espagete (a) Espagete após cocção, (b) Fotografia dos filetes após cocção.

A partir das análises feitas observou-se que o sabor e odor, (consequentemente), o flavor do espagete, foram satisfatórios em relação ao padrão mínimo de qualidade (nota 4,0), todavia, a aparência, pastosidade e viscosidade sensorial tiveram as menores notas (peso 2,0), refletindo na aparência os comprimentos irregulares dos fios, a superfície bastante irregular da massa com a presença de corpos de remoído de reprocesso gerando massa “enrugada”, além da presença de pontos pretos resultante de características físicas da farinha. A pastosidade deve-se ao fato da massa estar bastante flácida, e a viscosidade sensorial pela alta pegajosidade visualizada no espagete após cocção.

Por fim, a consistência, o corpo, a textura e a elasticidade também tiveram nota abaixo do esperado (todas com peso 3,0), reflexos de massa pouco resistente, incidindo sobre estas variáveis.

Em face da formação não adequada do espagete - função das características físico-químicas e do processo de secagem, a massa obtida apresentou alta pegajosidade, superfície bastante irregular, textura e consistência mediana tendendo a se desagregar (amontoando quando manipulada), com redução de *corposidade* pelo não aumento adequado de peso e volume, porém com flavor satisfatório.

5.4 Determinações das Variáveis do Processo de Secagem

5.4.1 Vazão mássica de água evaporada

A vazão mássica do ambiente externo de saída da secadora foi determinada através da aplicação da Equação 17.

$$\dot{m}_{Amb.Ext Sai} = 2810,77 \text{ kg/h}$$

Utilizando este valor e aplicando a Equação 18 para as zonas, encontraram-se as vazões mássicas conforme apresentadas na Tabela 30:

Tabela 30 - Vazões mássicas de espaguete nas zonas d secadora Pavan ML 2000 kg/h a partir das umidades em base seca (B.S).

Zonas	$U_{B.S}\%$	$\dot{m}_{Sai} \text{ (kg/h)}$
Ambiente Externo	40,300	*2810,77
1ª Central do Encartamento	34,166	2638,39
2ª Central do Encartamento	30,517	2542,08
3ª Central do Encartamento	23,544	2364,82
4ª Central do Encartamento	22,726	2345,48
5ª Central do Encartamento	23,307	2359,11
1º Piso	14,889	2160,52
2º Piso	12,697	2113,16
3º Piso	12,616	2111,45
Refrigerador	12,498	**2108,96

* Valor inicial de referência para cálculo das demais vazões mássicas

** Valor final de vazão mássica de saída da secadora.

Na Figura 49 são apresentadas as vazões mássicas do espaguete no processo, iniciando em 2810,77 kg/h e findando com 2108,96 kg/h de massa.

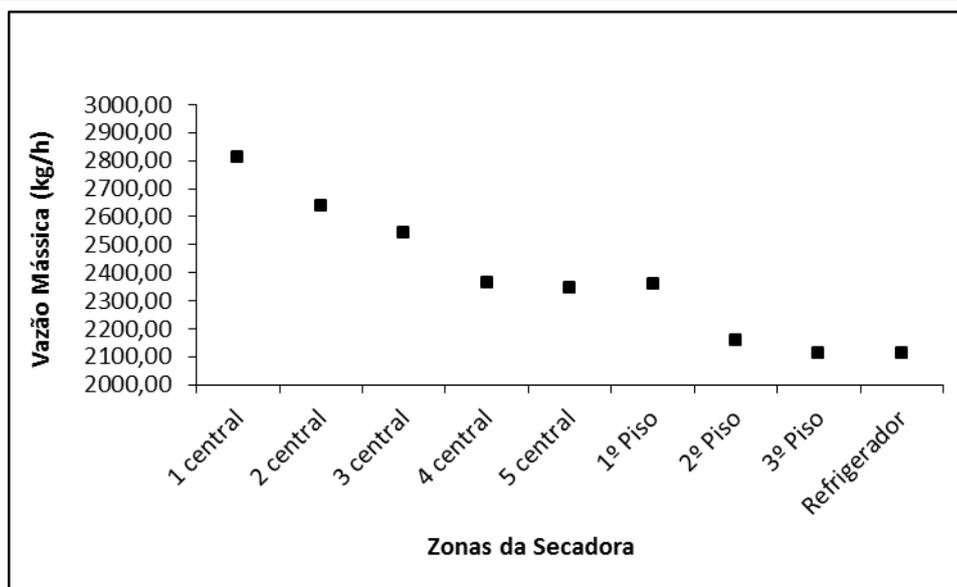


Figura 49 – Vazão mássica do espaguete nas zonas de secagem.

Aplicando a Equação 19 para demais zonas (para cálculo da vazão mássica de água evaporada), obtivemos os resultados da Tabela 31.

Tabela 31 – Vazões mássicas da água evaporada nas zonas de secagem.

Vazão Mássica da Água Evaporada			
Zonas da Secadora	$\dot{m}_{Ent}(kg/h)$	$\dot{m}_{Sai}(kg/h)$	$\dot{m}_{\text{água Evap.}}(kg/h)$
* Ambiente Externo	2810,77	2810,77	---
1ª Zona do Enc.	2810,77	2638,39	172,3845
2ª Zona do Enc.	2638,39	2542,08	96,2866
3ª Zona do Enc.	2542,08	2364,82	177,2606
4ª Zona do Enc.	2364,82	2345,48	19,3444
5ª Zona do Enc.	2345,48	2359,11	-13,6273
1º Piso	2359,11	2160,52	198,5908
2º Piso	2160,52	2113,16	47,3588
3º Piso	2113,16	2111,45	1,7117
Refrigerador	2111,45	2108,96	2,4915

*Em ambiente externo não possui água evaporada, pois a massa ainda não foi submetida a secagem.

Na

Figura 50 observa-se a evolução na extração de água ao longo do processo (vazão mássica de água evaporada).

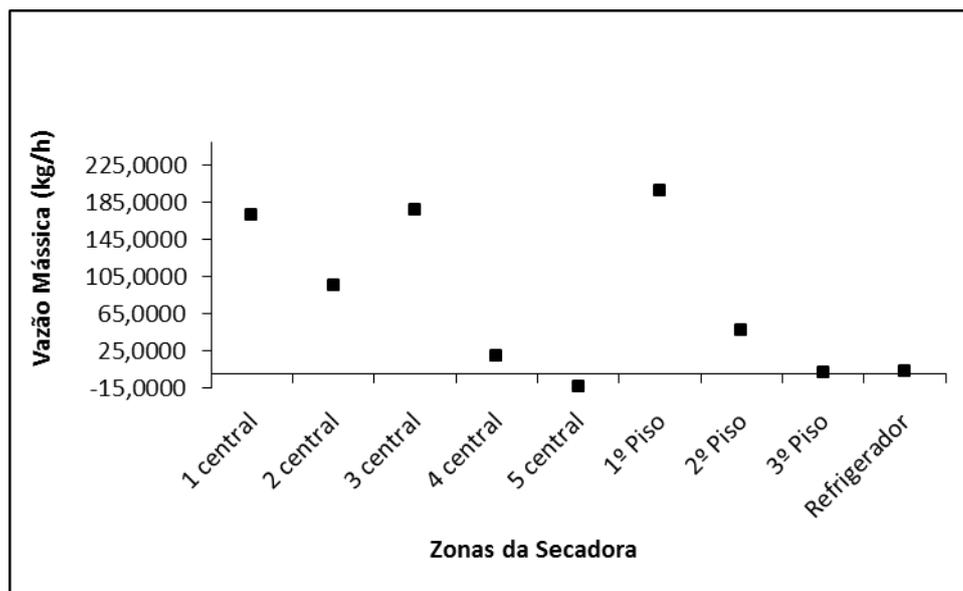


Figura 50 – Vazão mássica de água evaporada nas zonas de secagem.

5.4.2 Calor de evaporação da água

Para determinação da entalpia de vaporização para os valores de temperatura do experimento, tomaram-se os valores mais próximos (temperatura anterior e posterior) da temperatura em questão, e interpolou-se para encontrar a entalpia correspondente à temperatura medida na zona, e a partir da entalpia de evaporação e cálculo da interpolação segundo Equação 20 para todas as zonas, obteve-se a entalpia para evaporação da água por zona.

O calor para evaporação da água - passagem do estado líquido (na massa) para gasoso (na câmara de secagem) é o calor latente, e o valor de L será igual à entalpia de evaporação do vapor d'água saturado, H_{Evap} . (energia envolvida na transformação de fase da água). O produto entre a entalpia e vazão mássica de água evaporada resulta no calor para evaporação da água, Q_{Evap} , ou, quantos kcal/h são utilizados para evaporação da água por zona.

Aplicando a Equação 21 para cada zona, obtiveram-se os valores do calor utilizado para evaporação da água conforme

Tabela 32. A Figura 51 é resultante do calor demandado e a massa de água extraída nas zonas de secagem (o calor é diretamente proporcional à

quantidade de água a ser removida no processo); e na Figura 52 o comparativo entre este mesmo calor e a temperatura de bulbo seco.

Tabela 32 – Valores do calor necessário para evaporação da água por zona.

Calor para Evaporação de Água, kcal/h				
Zonas	T (°C)	Evaporação (kcal/kg)	$m_{Evap. \text{ Água Zona}}$ (kg/h)	$Q_{Evap. \text{ Água}}$ (kcal/h)
	56	565,6587	---	---
	57	565,1094	---	---
1ª Zona	56,106	565,6005	172,3845	97500,7741
---	65	560,4280	---	---
---	66	559,8309	---	---
2ª Zona	65,969	559,8494	96,2866	53905,9729
---	69	558,0396	---	---
---	70	557,4424	---	---
3ª Zona	69,957	557,4681	177,2606	98817,1087
---	80	551,4713	---	---
---	81	550,8503	---	---
4ª Zona	80,783	550,9850	19,3444	10658,4629
---	71	556,8453	---	---
---	72	556,2482	---	---
5ª Zona	71,595	556,4900	-13,6273	-7583,4679
---	66	559,8309	---	---
---	67	559,2338	---	---
1º Piso	66,219	559,7001	198,5908	111151,3138
---	55	566,2559	---	---
---	56	565,6587	---	---
2º Piso	55,521	565,9448	47,3588	26802,4803
---	48	570,2923	---	---
---	49	569,7191	---	---
3º Piso	48,871	569,7931	1,7117	975,2971
---	43	573,1585	---	---
---	44	572,5853	---	---
Refrigerador	43,829	572,6833	2,4915	1426,8535

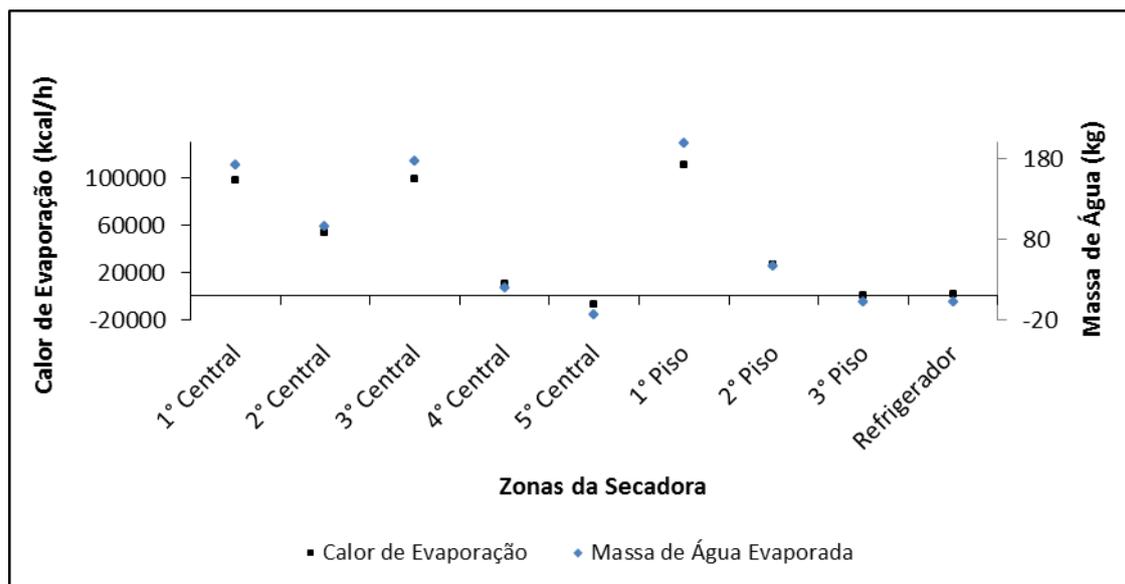


Figura 51 – Calor de evaporação da água X Vazão mássica de água na zonas de secagem

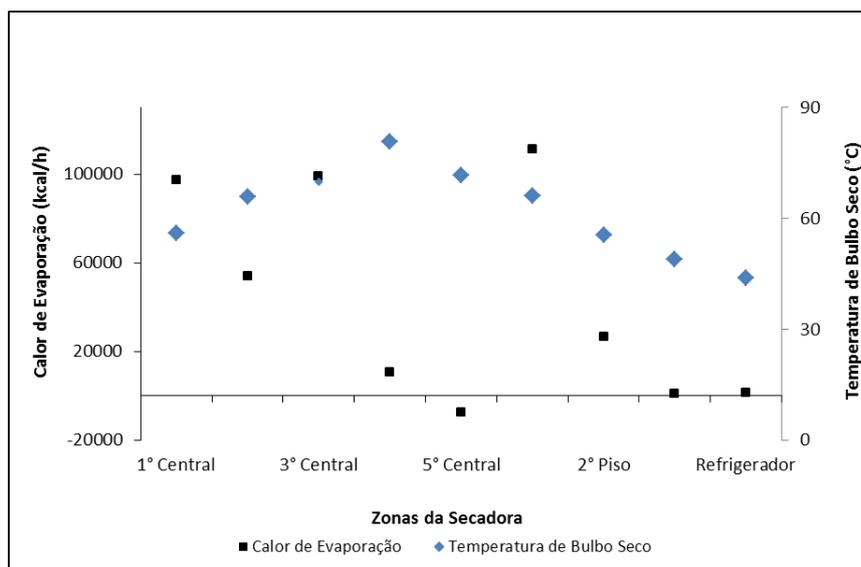


Figura 52 – Calor de evaporação da água X Temperatura B.S do ar na zonas de secagem do espaguete.

5.4.3 Calor de aquecimento (ou) resfriamento da massa

Com a redução no teor de umidade da massa, a composição bioquímica do espaguete variou refletindo no c_p (calor específico) do espaguete, considerando apenas variação no teor de água, mantendo constantes as

massas dos demais constituintes, óbvio, variando os percentuais. Abaixo são indicados os 3 passos para cálculo do c_p , afim de definir a quantidade de calor para aquecimento ou resfriamento da massa nas zonas da secadora:

1º Passo: Determinação dos constituintes químicos do espaguete após extrusão, sendo os demais valores em massa dos constituintes apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Constituintes químicos do espaguete no início (ambiente externo de entrada).

Componente Químico	Percentual (%)	Massa (kg)
Carboidratos	59,4494	1670,9859
Água	28,7241	807,3684
Proteínas	10,6250	298,6443
Lipídeos	0,4955	13,9274
Cinzas	0,7060	19,8440
TOTAL	100,0000	2810,7700

A partir destes, e referenciando as vazões mássicas de entrada nas zonas (considerado redução apenas da água), calcularam-se a massa de água nas zonas sendo constantes os demais constituintes conforme Tabela 34:

Tabela 34 – Composição centesimal do espaguete na entrada das zonas.

Zonas	$m_{Ent\ Zona}$ (kg)	$m_{Carb.}$ (kg)	$m_{Prot.}$ (kg)	$m_{Gord.}$ (kg)	$m_{Cz.}$ (kg)	m_{H_2O} (kg)
1ª Zona do Enc.	* 2810,77	1773,2669	264,0603	29,2831	20,5714	841,1275
2ª Zona do Enc.	2638,39	1773,2669	264,0603	29,2831	20,5714	712,9386
3ª Zona do Enc.	2542,08	1773,2669	264,0603	29,2831	20,5714	636,9584
4ª Zona do Enc.	2364,82	1773,2669	264,0603	29,2831	20,5714	491,4004
5ª Zona do Enc.	2345,48	1773,2669	264,0603	29,2831	20,5714	474,3432
1º Piso	2359,11	1773,2669	264,0603	29,2831	20,5714	486,4720
2º Piso	2160,52	1773,2669	264,0603	29,2831	20,5714	310,7477
3º Piso	2113,16	1773,2669	264,0603	29,2831	20,5714	264,9964
Refrigerador	2111,45	1773,2669	264,0603	29,2831	20,5714	263,3275

* As vazões mássicas por zona diferem dos apresentados anteriormente, pois foi considerada a umidade em base úmida, a fim de calcular a composição centesimal do espaguete.

2º Passo: Determinação (regra de três simples) das frações mássicas de entrada (%) dos constituintes bioquímicos do espaguete em todas as zonas (a partir das massas dos constituintes nas zonas da secadora na Tabela 34).

Os valores das frações mássicas da água reduziram-se, e os constituintes dos demais componentes mantiveram-se inalterados. A partir dos valores na 1ª zona de secagem, teve-se a fração mássica dos carboidratos de 59,4494%; proteínas, 10,6250%; gorduras, 0,4955%; cinzas, 0,7060%; e a fração mássica da água, 28,7241%. Aplicando as frações mássicas a Equação 22, pôde-se obter o c_p para todas as zonas como visto na Tabela 35.

Tabela 35 - Frações mássicas dos constituintes e do espaguete final obtido.

Zonas	$m_{Carb.} (%)$	$m_{Prot.} (%)$	$m_{Gord.} (%)$	$m_{Cz.} (%)$	$m_{Ág.} (%)$	$c_p, kcal/kg.°C$
1ª Zona/Enc.	59,4494	10,6250	0,4955	0,7060	28,7241	0,5325
2ª Zona/Enc.	62,3133	10,9834	0,5122	0,7298	25,4613	0,5110
3ª Zona/Enc.	64,1333	11,2166	0,5231	0,7453	23,3817	0,4974
4ª Zona/Enc.	67,8936	11,7236	0,5467	0,7790	19,0570	0,4689
5ª Zona/Enc.	68,3623	11,7872	0,5497	0,7832	18,5176	0,4654
1º Piso	68,0284	11,7421	0,5476	0,7802	18,9016	0,4679
2º Piso	73,1450	12,4840	0,5822	0,8295	12,9593	0,4288
3º Piso	74,5986	12,6989	0,5922	0,8438	11,2664	0,4177
Refrigerador	74,6532	12,7070	0,5926	0,8443	11,2028	0,4173
Espaguete	74,7332	12,7189	0,5931	0,8451	11,1096	---

Na Figura 53 é apresentado o percentual dos constituintes do espaguete após mistura (entrada da secadora), com destaque para o teor de carboidrato (em sua grande maioria o amido) e a presença de água em verde; na Figura 54 tem-se a evolução do teor dos demais constituintes ao longo do processo à medida que a água é extraída (de 28,7241% para 11,2028%), e finalmente na Figura 54 aparece a composição centesimal do espaguete produzido após saída da linha com teor umidade (base úmida) de 11,1096 %.

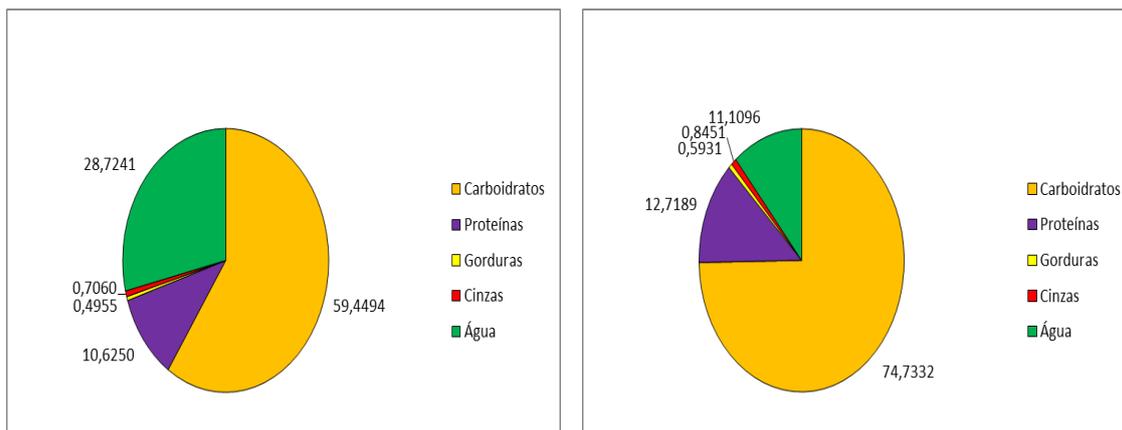


Figura 53 – Composição centesimal do espagete no início e final do processo.

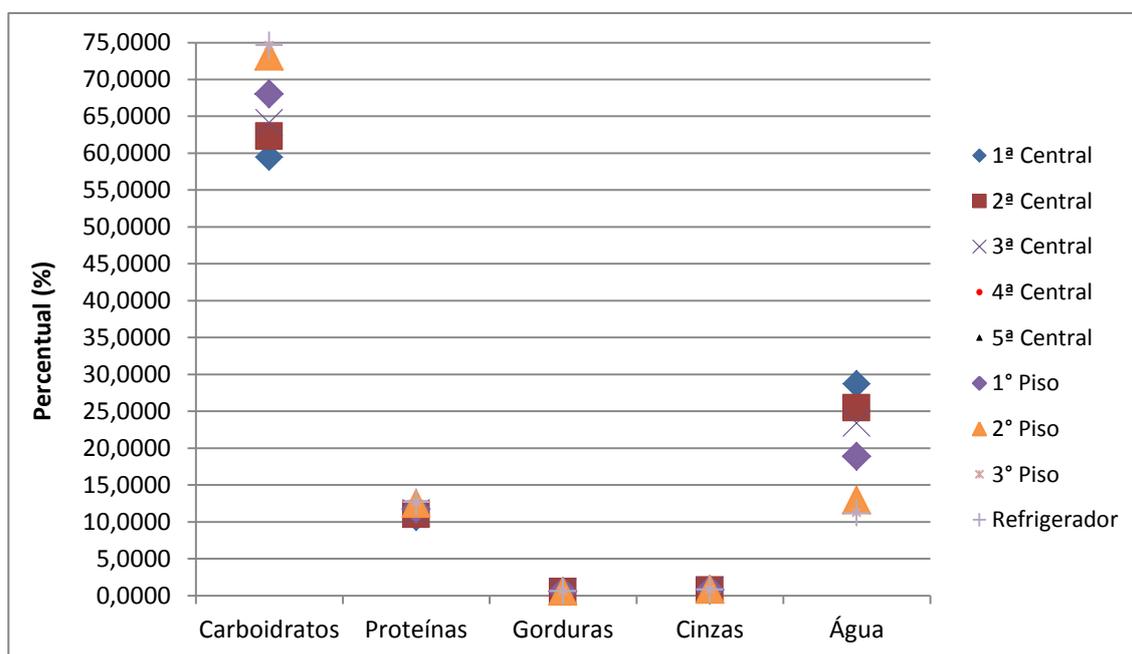


Figura 54 – Percentual de composição centesimal do espagete nas zonas do processo.

3º Passo: A determinação do calor demandado para o aquecimento ou resfriamento da massa nas zonas da secadora foi determinado aplicando a Equação 23 (a partir dos valores da vazão mássica), c_p e temperaturas de entrada e saída em cada zona, obtendo o calor utilizado para aquecimento (ou resfriamento da massa por zona de secagem como expresso na Tabela 36.

Tabela 36 – Calor de aquecimento (ou) resfriamento da massa nas zonas.

Calor de Aquecimento (ou) Resfriamento da Massa					
Zonas	\dot{m} Zona (kg/h)	c_p Massa Zona (kcal/kg. °C)	T_{Ent} (°C)	T_{Sai} (°C)	$Q_{Aquec/Resf.}$ (kcal/h)
1ª Zona/Enc.	2810,7700	0,5325	41,660	50,000	12483,0369
2ª Zona/Enc.	2638,3855	0,5110	50,000	58,000	10786,7418
3ª Zona/Enc.	2542,0844	0,4974	58,000	65,660	9684,9665
4ª Zona/Enc.	2364,8249	0,4689	65,660	68,330	2960,8565
5ª Zona/Enc.	2345,4806	0,4654	68,330	71,660	3634,8416
1º Piso	2359,1078	0,4679	71,660	74,660	3311,5300
2º Piso	2160,5181	0,4288	74,660	62,000	-11729,6729
3º Piso	2113,1596	0,4177	62,000	50,000	-10592,2486
Refrigerador	2111,4479	0,4173	50,000	45,000	-4405,4479

Pelos valores obtidos para Q, observa-se pela que houve aquecimento da massa (Figura 55), onde os valores foram positivos (da 1ª zona de secagem ao 1º piso), justamente onde ocorrem trocas de calor com a água aquecida na caldeira; e resfriamento onde os valores foram negativos (do 2º piso ao refrigerador), onde as trocas ocorrem com a água resfriada pelo chiller.

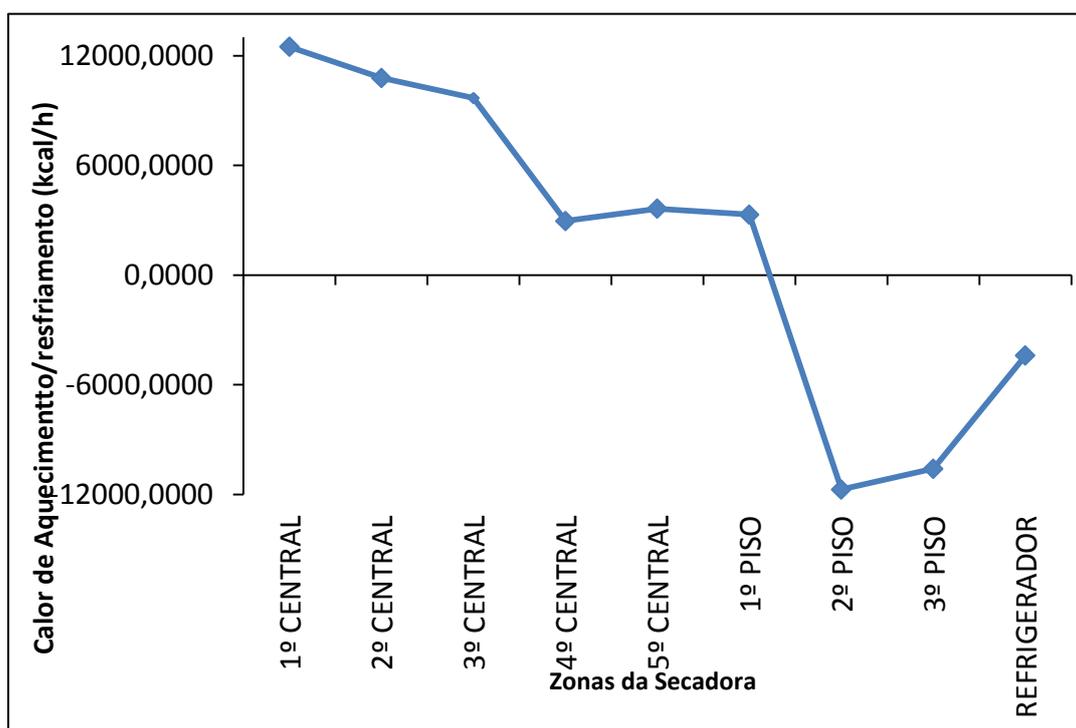


Figura 55 – Calor de aquecimento ou resfriamento da massa.

5.4.4 Calor de aquecimento das trocas de ar

Abaixo são apresentados os cálculos realizados para os 4 passos para determinação do calor de aquecimento das trocas de ar por zona de secagem:

1º Passo: O cálculo da vazão mássica de ar seco, $\dot{m}_{Ar\ Seco}$ (kg/h):

Para fins de cálculo da vazão mássica de ar seco, $\dot{m}_{Ar\ Seco}$ (kg/h), primeiramente foram extraídos os valores das variáveis psicrométricas para duas zonas (ambiente externo de entrada na secadora e 1ª zona do encartamento), utilizando-se dos valores de vazão mássica de água evaporada, e, a partir dos valores das temperaturas de bulbo seco e úmido extraídos do *software* psicrométrico Cytsoft Psychrometric Chart (2009), pode-se obter o valor de umidade absoluta para cada zona.

A partir destes valores, aplicou-se a Equação 24 (analisando-se as trocas de ar entre uma zona e outra), o que possibilitou calcular a vazão mássica de ar seco em cada zona de secagem (com as respectivas transformações de unidade) conforme se observa na Tabela 37:

Tabela 37 – Vazão mássica de ar seco por zona pelas variáveis psicrométricas.

Zonas	Vazão Mássica de Ar Seco				
	$\dot{m}_{\text{Água Evap.}}$ (kg/h)	$T_{\text{Bulbo Seco Ar}}$ (°C)	$T_{\text{Bulbo Úmido}}$ (°C)	W (g H ₂ O / kg Ar _{seco})	$\dot{m}_{Ar\ Seco}$ (kg/h)
* Amb.Ext.Ent	---	34,836	28,941	23,0990	---
1ª Zona/Enc.	172,3845	56,106	52,818	100,2370	2234,7549
2ª Zona/Enc.	96,2866	65,969	62,395	174,4150	1298,0474
3ª Zona/Enc.	177,2606	69,957	67,546	238,3670	2771,7750
4ª Zona/Enc.	19,3444	80,783	69,957	271,2980	587,4215
5ª Zona/Enc.	-13,6273	71,595	67,030	229,6420	-327,1394
1º Piso	198,5908	66,219	59,196	142,7540	2285,5956
2º Piso	47,3588	55,521	48,205	74,9580	698,5490
3º Piso	1,7117	48,871	43,738	58,4890	103,9328
Refrigerador	2,4915	43,829	36,960	38,1480	122,4877
* Amb.Ext.Sai	---	31,612	28,916	24,4370	---

* Não houve ocorrência de evaporação de água nos ambientes externos (de entrada e de saída), apenas no interior da secadora.

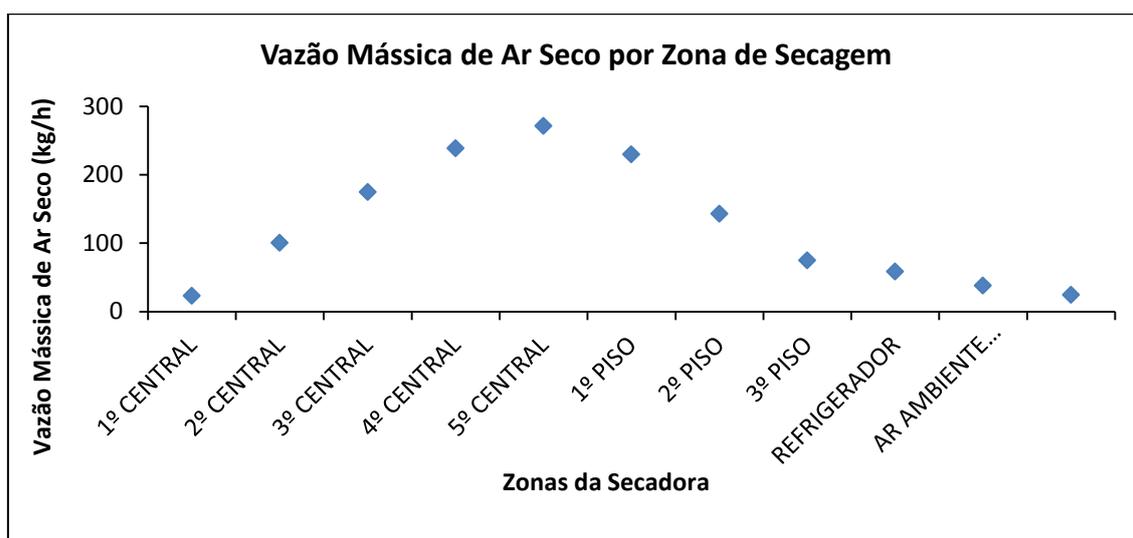


Figura 56 – Vazão mássica de ar seco por zona de secagem

Os valores refletem a diferença entre as umidades absolutas na seguinte relação: no 1ª, 2ª, 3ª e 4ª zona a umidade absoluta do ar foi maior que a da zona anterior (ver valores de W na Tabela 37), pois a água foi evaporada ($W_{Zona\ 2} > W_{Zona\ 1}$). Na 5ª zona, 1º, 2º, 3º piso e refrigerador a umidade absoluta do ar foi menor que a da zona anterior, pois a água evaporada nestas foi *resfriada*, condensando ($W_{Zona\ 2} < W_{Zona\ 1}$). O valor *negativo* da 5ª zona ocorreu em função do valor da vazão mássica da água evaporada ser *negativo*.

Para vazão mássica de ar seco (embora a Equação 24 indique a diferença entre a umidade absoluta na zona seguinte e anterior), na prática para todas as zonas foi calculada a vazão mássica do ar seco pela diferença entre a maior e a menor umidade absoluta (com exceção da 5ª zona), por esta razão os valores referentes ao 1º, 2º, 3º piso e refrigerador (que seriam negativos por haver resfriamento da massa), deram resultados positivos.

2º Passo: O cálculo das vazões volumétricas do ar *injetado*, $\dot{Q}_{Ar\ Injetado}$, e do ar *extraído*, $\dot{Q}_{Ar\ Extraído}$, em cada zona, foram obtidos pela aplicação da Equação 25 e da Equação 26 (a partir dos volumes específicos e vazões mássicas de ar seco), e expressos na Tabela 38.

Tabela 38 – Vazões volumétricas do ar extraído e injetado em cada zona.

Zonas	$\dot{m}_{Ar\ Seco}$ (kg/h)	v_{Zona} (m ³ /kg)	$\dot{Q}_{Ar\ Injetado\ Zona}$ (m ³ /h)	$\dot{Q}_{Ar\ Extraído\ Zona}$ (m ³ /h)
Amb. Externo _{Ent}	---	0,9046	---	---
1ª Zona Encart.	2234,7549	1,0820	2021,5593	2418,0048
2ª Zona Encart.	1298,0474	1,2280	1404,4873	1594,0022
3ª Zona Encart.	2771,7750	1,3420	3403,7398	3719,7221
4ª Zona Encart.	587,4215	1,4380	788,3197	844,7121
5ª Zona Encart.	-327,1394	1,3350	-470,4265	-436,7311
1º Piso	2285,5956	1,1810	3051,2701	2699,2884
2º Piso	698,5490	1,0420	824,9864	727,8881
3º Piso	103,9328	0,9975	108,2980	103,6730
Refrigerador	122,4877	0,9520	122,1815	116,6083
Amb. Externo _{Sai}	---	0,8960	---	---

3º Passo: A partir da umidade absoluta calculou-se o calor específico do ar úmido, $c_{P\ Ar\ Úmido}$, pela Equação 27. Com as vazões volumétricas e o tempo encontrou-se o volume do ar injetado através da Equação 28; e pelo volume específico determinou-se a massa de ar injetada nas zonas de secagem pela Equação 30 (Tabela 39).

Tabela 39 - Valores do calor específico do ar e da massa de ar para as zonas.

Zonas	$W_{Ar\ Zona}$ (kgH ₂ O/kgAr)	$C_{P\ Ar\ Zona}$ (kcal/kg.°C)	$\dot{Q}_{Ar\ Inj.Zona}$ (m ³ /h)	t (h)	V (m ³)	v_{Zona} (m ³ /kg)	$m_{Ar\ Zona}$ (kg)
Amb.Ext.Ent	0,0231	0,2504	---	---	---	---	---
1ª Zona	0,1002	0,2851	2021,5593	1	2021,5593	1,0820	1868,3542
2ª Zona	0,1744	0,3185	1404,4873	1	1404,4873	1,2280	1143,7193
3ª Zona	0,2384	0,3473	3403,7398	1	3403,7398	1,3420	2536,3187
4ª Zona	0,2713	0,3621	788,3197	1	788,3197	1,4380	548,2056
5ª Zona	0,2296	0,3433	-470,4265	1	-470,4265	1,3350	-352,3794
1º Piso	0,1428	0,3042	3051,2701	1	3051,2701	1,1810	2583,6326
2º Piso	0,0750	0,2737	824,9864	1	824,9864	1,0420	791,7336
3º Piso	0,0585	0,2663	108,2980	1	108,2980	0,9975	108,5694
Refrigerador	0,0381	0,2572	122,1815	1	122,1815	0,9520	128,3419
Amb.Ext.Sai	0,0244	0,2510	---	---	---	---	---

4º Passo: Cálculo do calor para aquecimento das trocas de ar ($Q_{Aquec.Trocas\ de\ Ar}$) nas zonas, aplicando os dados das temperaturas de entrada e saída somada aos valores do calor específico de ar úmido e da massa de ar úmido (Tabela 39), donde encontramos o calor para aquecimento das trocas de ar para as zonas pela aplicação da Equação 31 (Tabela 40).

No cálculo do calor de aquecimento das trocas de ar foi considerada a

diferença entre a maior e menor temperatura (tanto nas zonas de aquecimento e resfriamento). Na 5ª zona (que deveria indicar aquecimento) o valor foi negativo uma vez que a temperatura na saída foi menor que na entrada. No 1º, 2º, 3º pisos e refrigerador foram considerados a diferença entre a temperatura de entrada e saída (nestas ocorre resfriamento do ambiente), por isto os valores para o calor de aquecimento das trocas de ar foi positivo.

Tabela 40 – Calor de aquecimento das trocas de ar nas zonas da secadora.

Calor de Aquecimento das Trocas de Ar					
Zonas	$m_{Ar \text{ Úm. Zona}}$ (kg)	$c_{P \text{ Ar Úmido Zona}}$ (kcal/kg.°C)	$T_{Ar \text{ U.Ent}}$ (°C)	$T_{Ar \text{ U.Sai}}$ (°C)	$Q_{Aquec. T.Ar}$ (kcal/h)
1ª Zona/Enc.	1868,3542	0,2581	34,836	56,106	11329,8440
2ª Zona/Enc.	1143,7193	0,3185	56,106	65,969	3592,8403
3ª Zona/Enc.	2536,3187	0,3473	65,969	69,957	3512,8836
4ª Zona/Enc.	548,2056	0,3621	69,957	80,783	2149,0179
5ª Zona/Enc.	-352,3794	0,3433	80,783	71,595	-1111,4893
1º Piso	2583,6326	0,3042	71,595	66,219	4225,2191
2º Piso	791,7336	0,2737	66,219	55,521	2318,2296
3º Piso	108,5694	0,2663	55,521	48,871	192,2650
Refrigerador	128,3419	0,2572	48,871	43,829	166,4341

5.4.5 Calor fornecido pelos ventiladores

As variáveis elétricas dos tipos de motores dos ventiladores utilizados pela secadora (em especial potência elétrica) aparecem na Tabela 41, sendo que na Tabela 42 é indicado o número de ventiladores em operação por zona. Embora a quantidade no 1º, 2º e 3º pisos sejam idênticos (oito ventiladores tipo MV1 para cada), observou-se no monitoramento do processo que 3 ventiladores estavam inativos (todos no 3º piso da secadora), motivo pelo qual nesta zona é indicado 3 ventiladores a menos que no 1º e 2º piso.

Tabela 41 – Variáveis elétricas dos motores dos ventiladores da secadora.

Variáveis Elétricas dos Motores dos Ventiladores				
	MV1	MV2	MV2/3	Vent. Refrigerador
Potência (cv)	4	3	4	1,5
Corrente (A)	6,3	4,9	6,3	2,75
Tensão (V)	380	380	380	380

Tabela 42 – Quantidade x tipo de ventiladores em operação por zona.

	n_{MV1} (Uni)	n_{MV2} (Uni)	$n_{MV2/3}$ (Uni)	$n_{Vent. Refrig.}$ (Uni)
1ª Zona/Enc.	0	2	2	0
2ª Zona/Enc.	0	2	2	0
3ª Zona/Enc.	0	2	2	0
4ª Zona/Enc.	0	2	2	0
5ª Zona/Enc.	0	2	2	0
1º Piso	8	0	0	0
2º Piso	8	0	0	0
3º Piso	5	0	0	0
Refrigerador	0	0	0	4

Considerando que $1\text{ cv} = 746,043\text{ W} = 0,7460\text{ kW}$ e $1\text{ kW} = 860,4206\text{ kcal/h}$

Com a aplicação da Equação 43 aos dados da Tabela 41 e Tabela 42, foi possível a obtenção das potências elétricas dos motores dos ventiladores por zona; obtendo a quantidade de calor fornecido pelos motores dos ventiladores por zonas de secagem conforme Tabela 43.

Tabela 43 – Calor fornecido pelos motores dos ventiladores para as zonas.

Zonas	$P_{E\text{ Ventiladores Zona}}$ (cv)	$P_{E\text{ Ventiladores Zona}}$ (kW)	$Q_{\text{Motores Ventiladores}}$ (kcal/h)
1ª Zona/Enc.	14	10,4440	8986,2327
2ª Zona/Enc.	14	10,4440	8986,2327
3ª Zona/Enc.	14	10,4440	8986,2327
4ª Zona/Enc.	14	10,4440	8986,2327
5ª Zona/Enc.	14	10,4440	8986,2327
1º Piso	32	23,8720	20539,9606
2º Piso	32	23,8720	20539,9606
3º Piso	20	14,9200	12837,4754
Refrigerador	6	4,4760	3851,2426

5.4.6 Calor total absorvido pelo processo

O somatório entre o calor necessário para evaporação da água em cada zona, $Q_{\text{Água Evap. Zona}}$, o calor para aquecimento e resfriamento da massa por zona, $Q_{\text{Aquec./ Resf. Massa Zona}}$, o calor para aquecimento das trocas de ar por zona, $Q_{\text{Aquec. Trocas de Ar Zona}}$, e o calor fornecido pelos motores dos ventiladores, $Q_{\text{Motores dos Ventiladores Zona}}$, estão apresentados na Tabela 44 permitindo a obtenção do calor total absorvido por zona de secagem, $Q_{\text{Total Abs. Zona}}$,

calculado a partir da aplicação da Equação 33.

Tabela 44 – Calor total absorvido pelo processo.

Calor Total Absorvido pelo Processo					
Zonas	$Q_{\text{Água Evap.}}$ (kcal/h)	$Q_{\text{Aq.Resf.Massa}}$ (kcal/h)	$Q_{\text{Aquec.Troca Ar}}$ (kcal/h)	$Q_{\text{Motores Vent.}}$ (kcal/h)	$Q_{\text{Total Absorvido Z.}}$ (kcal/h)
1ª Zona/Enc.	97500,7741	12483,0369	11329,8440	-8986,2327	112327,4223
2ª Zona/Enc.	53905,9729	10786,7418	3592,8403	-8986,2327	59299,3222
3ª Zona/Enc.	98817,1087	9684,9665	3512,8836	-8986,2327	103028,7261
4ª Zona/Enc.	10658,4629	2960,8565	2149,0179	-8986,2327	6782,1046
5ª Zona/Enc.	-7583,4679	3634,8416	-1111,4893	-8986,2327	-14046,3484
1º Piso	111151,3138	3311,5300	4225,2191	-20539,9606	98148,1023
2º Piso	26802,4803	-11729,6729	2318,2296	-20539,9606	-3148,9236
3º Piso	975,2971	-10592,2486	192,2650	-12837,4754	-22262,1619
Refrigerador	1426,8535	-4405,4479	166,4341	-3851,2426	-6663,4029

5.4.7 Taxa de secagem

Aplicando os dados de tempo, massa e umidade para verificação da cinética de secagem do espaguete, as equações definidas na metodologia apresentadas possibilitaram a determinação da taxa de secagem ao longo do processo das zonas. A partir da umidade e valor da massa em cada zona, foi possível calcular a massa de água aplicando-se a Equação 36, e, através da Equação 37 a massa seca do espaguete para todas as zonas de secagem.

Foram determinados os valores de $X_{B,S}$ e $X_{B,U}$ para as zonas pela Equação 38 e Equação 39, e através destas variáveis aplicadas à Equação 40 encontrou-se a taxa de secagem (Tabela 45). Como houve redução de massa através da saída de água da amostra o resultado da taxa foi negativo. Considerando que para efeitos da perda de umidade o sinal não é relevante, este foi exposto como positivo.

Através dos dados (Tabela 45) foi possível o cálculo da taxa de secagem ao longo do processo, Na Tabela 46 são apresentados os dados para construção do diagrama de secagem (Figura 57), com a visualização do comportamento da temperatura, umidade relativa do ar e umidade do produto.

Tabela 45 – Determinação da taxa de secagem do espaguete no processo.

Zonas	Tempo (min)	Massa Total(kg)	$U_{B,U}$ (%)	Massa de Água(kg)	Massa Seca(kg)	$X_{B,S}$ (kg _{H2O} /kg _{M.S})	$X_{B,U}$	Taxa - $\partial X/\partial t$ (kg _{H2O} /kg _{M.S} .min)
Entrada	0	2810,7700	28,7241	807,3689	2003,4011	0,4030	0,2872	0,0032
1ª C. Encartamento	19	2719,0598	25,4613	692,3081	2026,7517	0,3416	0,2546	0,0023
2ª C. Encartamento	35	2662,5133	23,3817	622,5401	2039,9732	0,3052	0,2338	0,0044
3ª C. Encartamento	51	2547,3688	19,0570	485,4525	2061,9163	0,2354	0,1906	0,0005
4ª C. Encartamento	67	2533,6277	18,5176	469,1668	2064,4608	0,2273	0,1852	0,0004
5ª C. Encartamento	83	2543,3562	18,9016	480,7342	2062,6220	0,2331	0,1890	0,0000
Rototermo	85	2543,3562	18,9016	480,7342	2062,6220	0,2331	0,1890	0,0005
1º Piso	250	2392,2231	12,9593	310,0153	2082,2078	0,1489	0,1296	0,0001
2º Piso	416	2351,7248	11,2664	264,9543	2086,7705	0,1270	0,1127	0,0000
3º Piso	566	2350,2292	11,2028	263,2912	2086,9380	0,1262	0,1120	0,0001
Refrigerador	585	2348,0391	11,1096	260,8578	2087,1813	0,1250	0,1111	0,0002

Tabela 46 – Variáveis para construção do diagrama de secagem.

Zonas	Tempo (min)	UMassa _{B,U} Real (%)	Massa Total Real (kg)	UMassa _{B,U} Teórica(%)	Massa Total Teórica(kg)	T _{Espaguete} (°C)	T _{Ar} (°C)	U. R _{Ar} (%)
Entrada	0	28,7241	2810,7700	28,7241	2810,7700	41,660	34,836	64,766
1ª C. Encartamento	19	25,4613	2719,0598	28,0000	2790,4167	50,000	56,106	84,173
2ª C. Encartamento	35	23,3817	2662,5133	25,0000	2706,7042	58,000	65,969	84,369
3ª C. Encartamento	51	19,0570	2547,3688	22,0000	2625,5031	65,660	69,957	89,605
4ª C. Encartamento	67	18,5176	2533,6277	19,8000	2567,7420	68,330	80,783	62,532
5ª C. Encartamento	83	18,9016	2543,3562	17,8000	2516,3872	71,660	71,595	81,274
1º Piso	250	12,9593	2392,2231	13,0000	2395,6006	74,660	66,219	71,119
2º Piso	416	11,2664	2351,7248	12,5000	2383,6226	62,000	55,521	67,074
3º Piso	566	11,2028	2350,2292	12,0000	2371,7045	50,000	48,871	74,213
Refrigerador	585	11,1096	2348,0391	12,0000	2371,7045	45,000	43,829	64,522

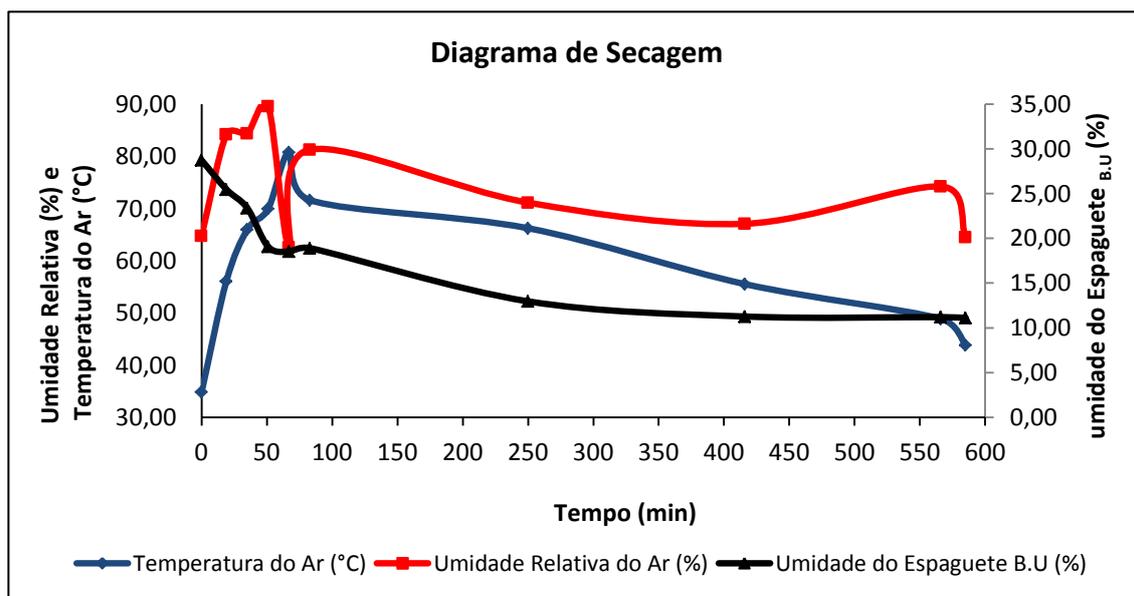


Figura 57 – Diagrama de secagem do processo.

Na

Figura 58 é apresentada a curva de secagem do espaguete no processo de secagem.

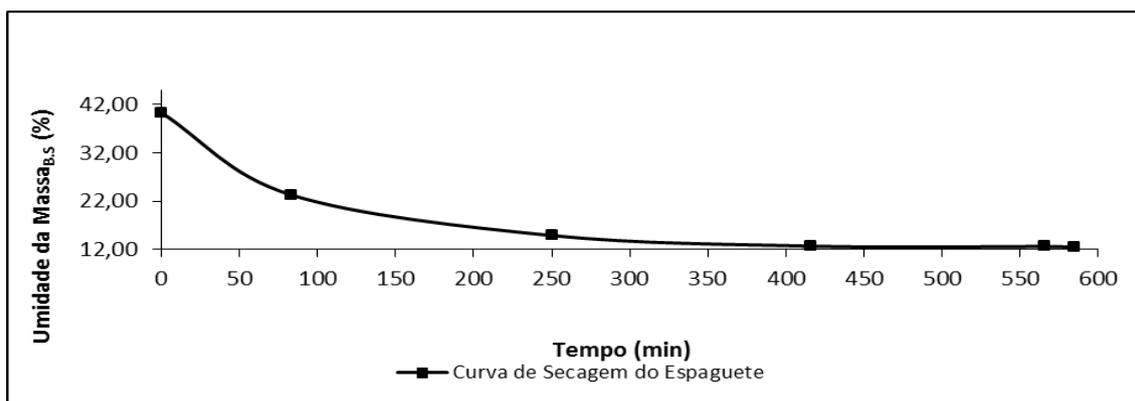


Figura 58 – Curva de secagem do espaguete.

Por fim é exibido no gráfico da

Figura 59 a secadora por partes (entrada, encartamento, 1º piso, 2º piso, 3º piso e refrigerador), a fim de analisar o comportamento da curva teórica (padrão) *versus* a curva real (experimental) de secagem a partir dos valores exibidos na Tabela 47.

Tabela 47 – Variáveis da secadora para comparativo real x teórico.

Zonas	Tempo (min)	UMassa _{B,U} Real (%)	Massa Total Real (kg)	UMassa _{B,U} Teórica (%)	Massa Total Teórica (kg)
Entrada	0	28,7241	2810,7700	28,7241	2810,7700
Encart.	83	18,9016	2543,3562	17,8000	2516,3872
1º Piso	250	12,9593	2392,2231	15,0000	2395,6006
2º Piso	416	11,2664	2351,7248	13,0000	2383,6226
3º Piso	566	11,2028	2350,2292	12,5000	2371,7045
Refrigerador	585	11,1096	2348,0391	12,0000	2371,7045

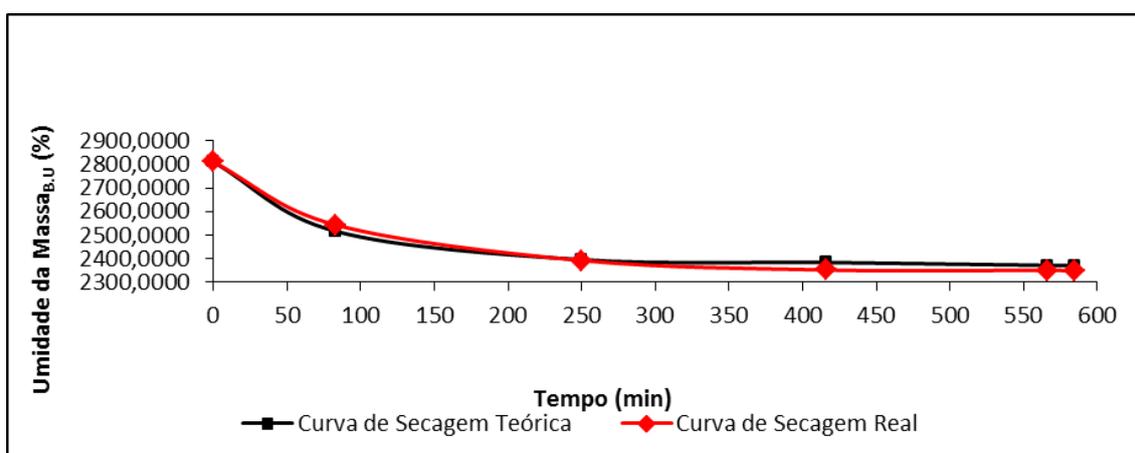


Figura 59 – Curva de secagem do espaguete padrão (teórico) X real na secadora.

5.4.1 Umidade Livre Crítica, X_{Cr}

A partir das variáveis apresentadas na Tabela 49 foi possível determinar a quantidade de fios de espagete por placa. Aplicando a Equação 41 a estes valores, foram obtidos os resultados que aparecem na Tabela 48 para obtenção da constante L_s/A . Aplicando-se a Equação 42 aos valores da Tabela 52 obteve-se a curva da taxa de secagem (R).

Tabela 48 – Valor médio da constante L_s/A .

Valor médio de L_s/A	
Amostras	L_s/A (kg/m^2)
Média	1,2122
Desvio Padrão	0,0389
Coeficiente de Variação (%)	3,2107

Tabela 49 – Número de fios das placas de espagete para cálculo do X_{Cr} .

Amostras	Largura da Placa L (m)	Comprimento da Placa C (m)	Diâmetro do Fio D (m)	Peso do Sólido (kg)	N.º Fios
1	0,119	0,255	0,0016	0,0586	72
2	0,103	0,253	0,0017	0,0468	62
3	0,149	0,254	0,0017	0,0733	90
4	0,204	0,253	0,0017	0,0997	122
5	0,129	0,254	0,0017	0,0632	78

Tabela 50 – Determinação da constante L_s/A .

Amostras	L_s Peso do Sólido (kg)	Área de troca, A (m^2)	L_s/A (kg/m^2)
1	0,0586	0,0477	1,2288
2	0,0468	0,0409	1,1427
3	0,0733	0,0594	1,2323
4	0,0997	0,0811	1,2298
5	0,0632	0,0515	1,2275

Tabela 51 – Valor médio da constante L_s/A .

Amostras	L_s/A (kg/m^2)
Média	1,2122
Desvio Padrão	0,0389
Coeficiente de Variação (%)	3,2107

Tabela 52 – Determinação da curva de secagem R.

Determinação da curva de secagem R					
Zonas	Tempo (h)	X _{bs} (KgW/kgsc)	TAXA $\partial X/\partial t$ (Kgw/kgsc.h)	Ls/A (kg/m ²)	R (Kgw/h.m ²)
Entrada	0,0000	0,4030	0,1939	1,2122	0,2351
1ª Central do Encart.	0,3167	0,3416	0,1366	1,2122	0,1655
2ª Central do Encart.	0,5833	0,3052	0,1199	1,2122	0,1454
3ª/4ª/ 5ª/ Central Encart.	1,1917	0,2322	0,0395	1,2122	0,0479
1º/2º/3º Piso e Refrig.	7,5708	0,1317	0,0167	1,2122	0,0203

O gráfico da Figura 60 indica a curva de secagem do espaguete (umidade em base seca em função do tempo) e a curva de secagem R versus a umidade em base seca na Figura 61.

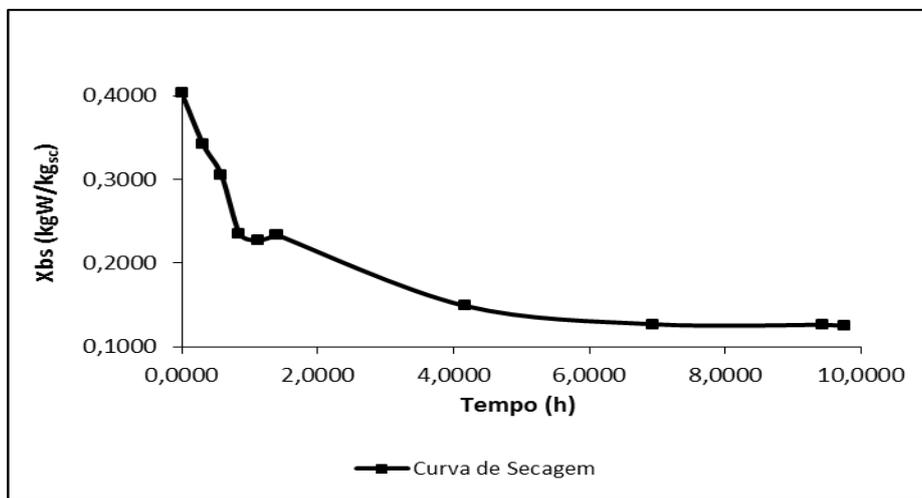


Figura 60 – Umidade em base seca x tempo.

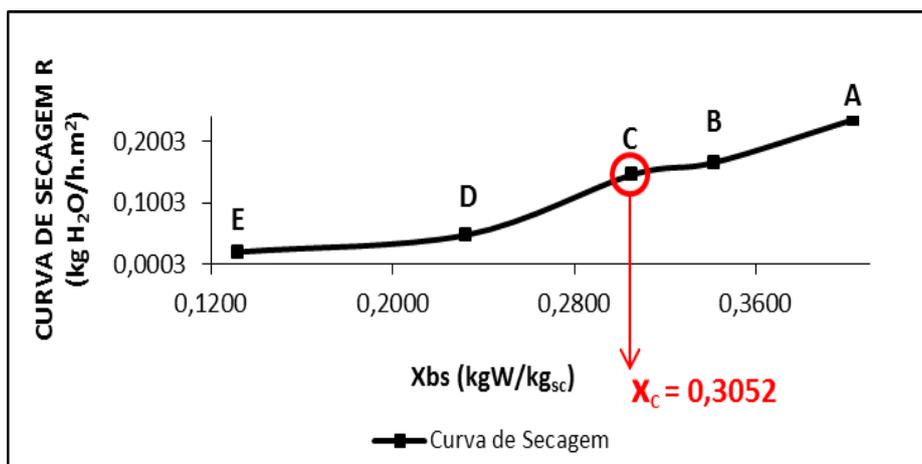


Figura 61 – Curva de secagem R versus Umidade em base seca.

Uma análise acerca da Figura 61 pode ser explicada com base no detalhamento das etapas conforme citadas por Geankoplis (2003).

A faixa de **A – B** geralmente é excluída nas análises por ser de adaptação. O ponto A pode estar abaixo de B (indicando que o produto possui superfície mais fria que o ambiente seguindo até o equilíbrio em B), ou acima como na Figura 61 onde a temperatura da massa entra no processo aquecido pelos radiadores na entrada do túnel de secagem.

A faixa de **B – C**, embora ocorra uma “ligeira inclinação” devido variação de temperaturas entre as zonas, este trecho corresponde ao período de taxa de secagem constante (ocorre por capilaridade). Este estágio ocorre desde que a saída de água até a superfície acompanhe a perda por evaporação na superfície, sendo que em **C** a taxa de secagem começa a reduzir ao entrar neste primeiro período de taxa de secagem decrescente (*difusão*) até atingir o ponto **D**, sendo que frequentemente a taxa expressa na linha **C – D** é linear.

Por fim, no ponto **D** a taxa de secagem reduz-se rapidamente, segundo Park *et al.* (2007), devido a redução da pressão parcial de vapor de água na superfície do produto, reduzindo a velocidade de secagem (neste estágio a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa elevando a temperatura do produto à temperatura do ar), até atingir o ponto **E**, onde o teor de equilíbrio do espaguete é igual a X^* , de modo que $X=X^*-X^*=0$. Existem casos em que o período de **C – D** inexistente ou pode constituir todo período de taxa de queda.

O período da taxa de secagem constante termina quando o sólido atinge a umidade crítica (X_{CR}). Após este ponto ocorrerá elevação de temperatura da superfície com rápida redução da velocidade de secagem (período de taxa decrescente em geral maior que o período de taxa constante, com menor redução de água), até que a taxa de secagem se aproxime de zero em um dado teor de umidade de equilíbrio que é a menor umidade obtida para o sólido, sob as condições de secagem aplicadas (Foust *et al.*, 1960).

Analisando ainda esta fase observa-se que 24,26% de água (em relação ao valor de umidade de entrada na secadora) foram evaporados da

massa no período de taxa de secagem constante. Muito embora esta fase seja curta em relação ao período total de secagem. Esta alta extração da água favorece ainda mais a ocorrência de fissuras no alimento.

Na transição entre a taxa de secagem constante para a taxa de secagem decrescente é justamente onde o teor de água crítico (X_{Cr}) é igual a 0,3052, ou $X_{Cr}=30,52\% \text{ H}_2\text{O}_{B.S.}$. A partir deste valor não existe no espaguete água suficiente na superfície que mantenha um filme contínuo de água, reduzindo-se continuamente a área molhada neste primeiro período de queda até que toda superfície esteja seca.

5.5 Quadros gerais da matéria-prima, processo e espaguete obtido.

As variáveis do processo de secagem estão relacionadas na Tabela 53, e as variáveis do produto ao fim do processo na secadora Pavan ML 2000 kg/h indicadas na Tabela 54.

Tabela 53 - Variáveis gerais do processo de secagem

VARIÁVEL	Variáveis do processo de secagem											
	Ambiente Externo de Entrada	1ª Central	2ª Central	3ª Central	4ª Central	5ª Central	Rototermo	1º Piso	2º Piso	3º Piso	Refrigerador	Ambiente Externo de Saída
Tempo de secagem teórico por zona, t	0:00:00	0:14:47	0:14:47	0:14:47	0:14:47	0:14:47	0:02:00	2:28:14	2:28:14	2:28:14	0:16:00	0:00:00
Tempo de secagem teórico acumulado, t	0:00:00	0:14:47	0:29:34	0:44:21	0:59:08	1:13:55	1:15:55	3:44:09	6:12:23	8:40:37	8:56:37	8:56:37
Tempo de secagem real por zona (cronometrado), t	0:00:00	0:19:00	0:16:00	0:16:00	0:16:00	0:16:00	0:02:00	2:45:00	2:46:00	2:30:00	0:19:00	0:00:00
Tempo de secagem real acumulado (cronometrado), t	0:00:00	0:19:00	0:35:00	0:51:00	1:07:00	1:23:00	1:25:00	4:10:00	6:56:00	9:26:00	9:45:00	9:45:00
Tempo de secagem (horário), t	10:31	10:50	11:06	11:22	11:38	11:54	11:56	14:41	17:27	19:57	20:16	20:16
Umidade de entrada da massa $U_{B,U}$ (%)	28,724	28,724	25,461	23,382	19,057	18,518	---	18,902	12,959	11,266	11,203	11,110
Umidade de entrada da massa $U_{B,S}$ (%)	40,300	40,300	34,167	30,517	23,544	22,726	---	23,307	14,889	12,697	12,616	12,498
Temperatura de entrada da massa T (°C)	41,660	41,660	50,000	58,000	65,660	68,330	---	71,660	74,660	62,000	50,000	31,000
Temperatura do ar T (°C)	28,941	52,818	62,395	67,546	69,957	67,030	---	59,196	48,205	43,738	36,960	28,916
Temperatura do ar T (°C)	34,836	56,106	65,969	69,957	80,783	71,595	---	66,219	55,521	48,871	43,829	31,612
Umidade relativa do ar, $U_{R,A}$ (%)	64,766	84,173	84,369	89,605	62,532	81,274	---	71,119	67,074	74,213	64,522	81,927
Umidade Absoluta do ar, W_A (g H ₂ O/ kg de ar seco)	23,100	100,237	174,415	238,367	217,298	229,642	---	142,754	74,958	58,489	38,148	24,437
Volume específico do ar, u_A (m ³ / kg de ar seco)	0,905	1,082	1,228	1,342	1,438	1,335	---	1,181	1,042	0,998	0,952	0,896
Vazão mássica da massa, \dot{m} (kg/h)	2810,770	2638,390	2542,080	2364,820	2345,480	2359,110	---	2160,520	2113,160	2111,450	2108,960	2108,960
Massa de água evaporada, m (kg)	---	172,385	96,287	177,261	19,344	-13,627	---	198,591	47,359	1,712	2,492	---
Calor para evaporação da água, Q (kcal/h)	---	97500,774	53905,973	98817,109	10658,463	-7583,468	---	111151,314	26802,480	975,297	1426,854	---
Calor específico da massa, C_p (kcal/kg.°C)	---	0,533	0,511	0,497	0,469	0,465	---	0,468	0,429	0,418	0,417	---
Calor para aquecimento/resfriamento da massa, Q (kcal/h)	---	12483,037	10786,742	9684,967	2960,857	3634,842	---	3311,530	-11729,673	-10592,249	-4405,448	---
Vazão mássica do ar seco, \dot{m} (kg/h)	---	2234,755	1298,047	2771,775	587,422	-327,139	---	2285,596	698,549	103,933	122,488	---
Vazão mássica de ar injetado, \dot{m} (kg/h)	---	2021,559	1404,487	3403,740	788,320	-470,427	---	3051,270	824,986	108,298	122,182	---
Vazão mássica de ar extraído, \dot{m} (kg/h)	---	2418,005	1594,002	3719,722	844,712	-436,731	---	2699,288	727,888	103,673	116,608	---
Calor para aquecimento das trocas de ar, Q (kcal/h)	---	11329,844	3592,840	3512,884	2149,018	-1111,489	---	4225,219	2318,230	192,265	166,434	---
Potência elétrica dos ventiladores, P (cv)	---	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	---	32,000	32,000	20,000	6,000	---
Calor fornecido pelos ventiladores, Q (kcal/h)	---	8986,233	8986,233	8986,233	8986,233	8986,233	---	20539,961	20539,961	12837,475	3851,243	---
Calor total absorvido pelo processo, Q (kcal/h)	---	112327,422	59299,322	103028,726	6782,105	-14046,348	---	98148,102	-3148,924	-22262,162	-6663,403	---

Tabela 54 - Variáveis gerais do espaguete obtido após finalização do processo

Variáveis do espaguete obtido		
Umidade _{Base úmida}	U _{B,U} (%)	11,110
Umidade _{Base Seca}	U _{B,S} (%)	12,498
Cor	L	54,14
	a*	9,48
	b*	20,90
Comprimento	mm	249,3
Espessura	mm	1,689
Tempo de cocção	min	0:09:52
Constituintes Bioquímicos	Carboidratos (%)	74,733
	Proteínas (%)	12,719
	Gorduras (%)	0,593
	Cinzas (%)	0,845
	Água (%)	11,110
Coefficiente de incremento de peso	Adimensional	2,419
Coefficiente de incremento de volume	Adimensional	3,212
Sólidos solúveis	%	10,668
Microscopia Eletrônica de Varredura	Presença de fissuras no corpo da estrutura do espaguete além dos grânulos do remoído de massa reprocessada.	
Sabor	Normal	4,00
Odor	Normal	4,00
Textura	mediana (tendendo a regular)	3,00
Flavor	Normal	4,00
Consistência	Mediana	3,00
Corpo	Mediana	3,00
Pastosidade	Alta	2,00
Viscosidade	Alta	2,00
Elasticidade	Mediana	3,00
Aparência	Regular	2,00

A partir das variáveis sensoriais temos na Figura 62 a correlação final entre a massa real e os padrões sugeridos pela literatura.

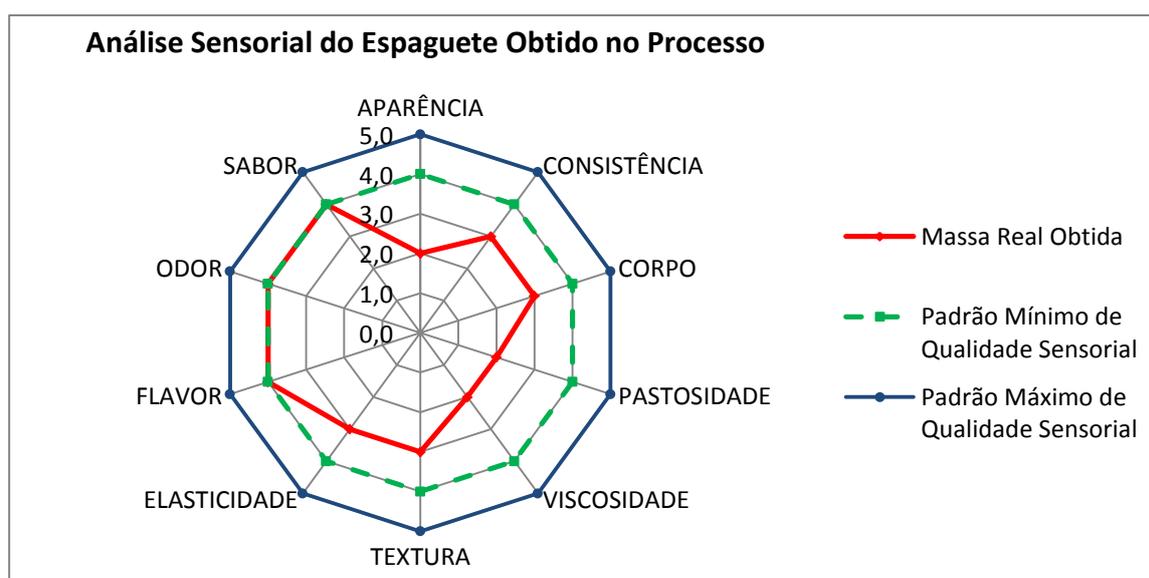


Figura 62 – Análise sensorial do espaguete obtido ao fim do processo.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Os resultados obtidos com base nas análises das matérias-primas utilizadas e o processo de secagem do espaguete permitiram verificar o efeito das características físico-químicas da farinha de trigo tipo comum proveniente de trigo duro e a dinâmica do processo de secagem na secadora Pavan ML 2000 kg/h, sobre a estrutura e qualidade do espaguete tipo comum.

Em relação à cor da massa, apesar dos valores de L^* , a^* e b^* expressarem uma farinha com claridade e tendências para o tom vermelho e amarelo satisfatórios, ocorreram reação de escurecimento da massa no processo de secagem (reação de *Maillard*) tendo influência sobre a cor final do produto, resultando em tonalidade mais escura do espaguete ao final da linha em função das temperaturas empregadas no processo em contato com o açúcar livre presente na farinha.

Analisando o teor de sólidos solúveis, parte do amido da farinha fluiu para a água de cocção não ficando retido no interior dos grânulos, provocando perdas das características organolépticas e estruturais do espaguete com aumento da pegajosidade do produto, representando enorme perda de qualidade, e classificando a *massa* como *ruim* conforme padrão da literatura.

Apesar da qualidade da farinha analisada nesta pesquisa possuir características físico-químicas em conformidade com o demandado, as implicações negativas à massa deram-se em função das distorções no processo de secagem. A aplicação do diagrama de secagem de forma inadequada (pré-secagem insuficiente no encartamento e secagem mais acentuada na fase que deveria ser de estabilização - 1º piso) favoreceu a presença de regiões onde o amido ficou livre com as moléculas de água presente entre os cristais, gerando *fraqueza* da massa, resultando na massa pegajosa após cocção. Esta dispersão do material amiláceo e grânulos de

remoído de reprocesso da massa para água de cocção elevou o teor de sólidos solúveis na água.

Isto pôde ser comprovado pelos gráficos da curva e taxa de secagem, além das imagens de MEV onde aparecem fissuras ao longo da estrutura da massa (que provocaram rupturas no produto após cocção), e da presença de corpúsculos (grânulos do remoído de reprocesso da massa), modificando a textura e aparência dos fios.

O valor de umidade final da massa foi abaixo do padrão (corroborando com os resultados que demonstraram uma secagem forçada, no 1º piso da secadora). Em relação ao coeficiente de incremento de peso e de volume, a massa apresentou valores abaixo do especificado; contudo o tempo de cocção foi ligeiramente menor que o indicado pela literatura, não representando um desvio acentuado.

Fazendo-se um paralelo entre o padrão da literatura (teórico) e o real obtido, observa-se que para estas cinco importantes variáveis: a umidade, tempo de cocção, coeficiente de incremento de peso, coeficiente de incremento de volume e o teor de sólidos solúveis, em todas elas o espagete esteve fora do padrão recomendado.

O teor final de umidade caracterizado como abaixo do recomendado gerou perda direta no valor econômico do espagete devido redução do peso do produto. O espagete após cocção não alcançou o volume e peso satisfatórios, gerando reflexos diretos na percepção de qualidade pelo consumidor final, uma vez que o aumento de volume e peso são duas das características deste alimento mais perceptíveis quando no consumo, salientando ainda que quando se compara a qualidade total da massa *versus* sólidos solúveis, o espagete foi classificado como *ruim* devido o alto teor de S.S.

Em relação às análises sensoriais, como esperado, não houve nota 5 para nenhum atributo sensorial (característico de massa produzida com farinha do tipo grano duro). Com nota 4,0 - relativo ao padrão mínimo de qualidade recomendado após cocção, foi obtido como satisfatório o sabor, odor e flavor,

demonstrando que o processo de secagem, embora tenha apresentado desvios, não comprometeram estas três últimas variáveis.

Com nota 3,0 foram pontuadas a textura, corpo, consistência e elasticidade. A textura devido baixa resistência da massa à mastigação; o corpo e consistência avaliação mediana, e a elasticidade foi abaixo do esperado (rompendo-se com facilidade ao ser tensionada), sendo estas características reflexas de uma massa pouco resistente.

Por fim, com menor pontuação sensorial (nota 2) foi obtido para os parâmetros de aparência, pastosidade e viscosidade. A aparência foi regular devido as inconformidades apresentadas na superfície (fissuras) e a presença de corpos de remoído de reprocesso gerando enrugamento dos filetes. A alta pastosidade está relacionada à geração de massa bastante flácida, e também a alta viscosidade devida elevação da pegajosidade após cocção.

Pelas análises *psicrométricas* e os resultados das variáveis obtidas no processo de secagem, observou-se que a remoção de água no encartamento não ocorreu conforme o padrão, sendo necessário realizar uma drástica evaporação de água no 1º piso, com o objetivo de compensar o estágio anterior, justamente num estágio onde é necessária uma maior estabilização da massa com uma secagem mais tênue. A passagem pelos pisos da secadora - embora ainda devam proporcionar a migração de água do meio interno ao externo em tempos maiores, tem como objetivo principal a estabilização da massa com os fechamentos dos poros para formação ideal do espaguete.

Conforme a literatura, uma elevação brusca de temperatura nestas fases de estabilização reflete diretamente sobre a formação e qualidade do produto, somado ainda ao fato de que na passagem do 1º piso ao 2º piso houve rápida queda de temperatura. Estes choques térmicos detectados pela variação de umidade absoluta em função da vazão mássica de ar seco com a queda acentuada no teor de água no ar justamente entre a 5ª central do encartamento e o 1º piso - somado ao pico de temperatura no 1º piso para ajuste da umidade da massa ao calor para aquecimento das trocas de ar, tiveram reflexos diretos sobre a geração de fissuras na MEV.

Com base nos resultados apresentados ao longo do trabalho, pode-se inferir que apesar da farinha de trigo comum ser satisfatória conforme os padrões estabelecidos, o processo de secagem na Linha PAVAN - Modelo 2000 kg/h com variações abruptas na secagem de forma não periódica sem a correta estabilização da massa, provocaram alterações nas características de qualidade do produto final, tendo enorme influencia na sua formação e estrutura física, química e organoléptica.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolver modelo dinâmico para a simulação do processo de secagem, permitindo criar um *software* para o controle e tomada de decisão a partir das variáveis de processo e da matéria-prima, visando obtenção do espaguete com qualidade assegurada.
- A partir deste *software*, viabilizar a interface *produção x consumo de gás* nas caldeiras visando otimizar o consumo deste recurso energético.
- Realizar estudo similar para espaguete tipo especial, onde a adição de outros ingredientes podem provocam mudanças estruturais na massa e incidir sobre a dinâmica do processo.
- Aplicar estudo de secagem para massa curta (*parafuso*), analisando a influência da geometria do produto no processo de secagem.
- Estudar minuciosamente as transferências de calor e massa, bem como as extrações de água que ocorrem no encartamento da linha Pavan 2000 kg/h, verificando a possibilidade de redução máxima do teor de água neste estágio com manutenção da qualidade da massa.
- Incluir em ensaios futuros as análises microbiológicas e parasitológicas, verificando a influência destes agentes na qualidade do espaguete.

7. REFERÊNCIAS

ABIMA; NIELSEN. Estatística: Mercado mundial e nacional de massas. <http://www.abima.com.br/estMercNacMassas.asp>, 2010. Acesso em: 28/02/2012.

BENASSI, V. D. T.; WATANABE, E. **Fundamentos da Tecnologia de Panificação**. EMBRAPA-CTAA. Rio de Janeiro: 1997. 5-28.

BHW LITE HOBOWARE. **HOBOWare Pro**. www.onsetcomp.com: Onset Computer Corporation 2010.

BONAZZI, C.; DUMOULIN, E. **Quality Changes in Food Materials as Influenced by Drying Processes** Modern Drying Technology. 3 2011.

BRUNEEL, C. et al. **The impact of the protein network on the pasting and cooking properties of dry pasta products** Food Chemistry. Laboratory of Food Chemistry and Biochemistry and Leuven Food Science and Nutrition Research Centre, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven 2009.

BUREAU, L. I. História da Luteína. <http://brasil.luteininfo.com/about2>, 2012. Acesso em: 28/02/2012.

CIACCO, C. F.; CHANG, Y. K. **Como fazer massas**. Editora Ícone. Campinas: 1986. 21-37.

CINDIO, B. D. et al. **Modelling of drying for high quality pasta production**. 3rd International Symposium on Food Rheology and Structure. Zurich 2009.

COMBELLI, R. F. **Fabricación de Fideos y Otras Pastas Alimenticias**. Imprenta Clarasó. Barcelona: 1952. 1-318.

CYTOSOFT PSYCHROMETRIC CHART. **CYTSoft Psychrometric**. <http://www.cytsoft.com> 2009.

CÁNOVAS, G. V. B.; MERCADO, H. V. **Deshidratación de Alimentos**. Editorial Acribia S.A. Zaragoza: 2000. 22-55.

DALGLEISH, J. M. Deshidratación y Productos Desecados. In: (Ed.). **Manual de Industrias de Los Alimentos**. Acribia. Zaragoza, 1993. cap. 14, p.499-506.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. D. **Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas**. Ciência Rural. Santa Maria. 39: 3 p. 2009.

DIDONÈ, G. **Tecnologia della Pasta**. PAVAN S.p.A: Scuola di tecnologia della pasta. Galliera veneta: 2003. 17-29.

ELSTOW, W. E.; WALLINGTON, D. J. Harina y Productos Horneados. In: (Ed.). **Manual de Industrias de Los Alimentos**. Acribia. Zaragoza, 1993. cap. 4, p.151-192.

FILHO, J. M. **Aspectos Nutricionais de Óleos e Gorduras**. Seminário Sobre Óleos e Gorduras. Campinas: 13 p. 1993.

FOUST, A. S. et al. **Principles of Unit Operations**. John Wiley & Sons. New York: 1960.

GARCIA, A. E. B. et al. **Inovações Tecnológicas na Indústria de Massas Alimentícias e Biscoitos**. ITAL - Instituto de Tecnologia de Alimentos. Campinas: 1990. 95-97.

GEANKOPLIS, J. C. **Transport Processes and Separation Process Principles**. New Jersey. 4: 520-541 p. 2003.

GONÇALVES, A. C. P. et al. **Economia Aplicada**. Editora FGV. Rio de Janeiro: 2010. 26.

HIZAJI, A. S.; MAGHSOUDLOU, Y.; JAFARI, S. M. **Effect of water temperature, variety and shelf life on rehydration kinetics of microwave dried potato cubes**. Latin American Applied Research. Buenos Aires. 41 2011.

HOU, G. G. **Asian Noodles: Science, Technology, and Processing**. Wiley. Portland: 2010.

INMETRO. Regulamento Técnico de Identidade e de Qualidade para a Classificação da Farinha de Trigo http://www.inmetro.gov.br/barreirastecnicas/pontofocal/..%5Cpontofocal%5Ctextos%5Cregulamentos%5CBRA_162.pdf, 2005. Acesso em: 16/03/2014.

JÚNIOR, D. C.; OLIVEIRA, J. B. **Controle de Qualidade de Trigo e Derivados: tratamento e tipificação de farinhas**. Granotec do Brasil (apostila). Curitiba: 1998. 6-53.

JÚNIOR, J. J. S. S.; HAYASHI, T. C. **Efeitos da Cinética de Secagem de Espaguete Sobre as Características do Produto Final em Secadora Industrial de Fluxo Contínuo**. Reunião Regional da SBPC no Recôncavo da Bahia 2010.

LEITÃO, R. F. D. F. et al. **Tecnologia de Macarrão**. ITAL - Instituto de Tecnologia de Alimentos. Campinas: 1990. 1-62.

LUCATO, M. **Uma proposta de modelagem para secadores de macarrão de corte longo**. Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul 2009.

MAACHE-REZZOUG, Z.; ALLAF, K. **Study of the effect of hydrothermal process conditions on pasta quality**. Université de La Rochelle, Laboratoire. France 2009.

MASTROMATTEO, M. et al. **Influence of Heat Treatment on the Quality of Functional Gluten-Free Spaghetti**. Food and Nutrition Sciences. <http://www.SciRP.org/journal/fns> 2012.

MELLO, A. V. et al. Avaliação da composição centesimal e da rotulagem de barras de cereais. **e-Scientia**, Universidade Presbiteriana Mackenzie, v. 5, n. 2, p. 43-47, 2012.

MENDES, D. E. N. et al. Propriedades Psicrométricas. http://www2.pucpr.br/educacao/ist/software_psico_prop1.html, 2007. Acesso em: 22/12/2010.

MORETTO, E.; FETT, R. **Processamento e Análise de Biscoito**. Livraria Varela. São Paulo: 1999. 1-4.

OGAWA, T.; KOBAYASHIA, T.; ADACHIA, S. **Prediction of Drying Process of Pasta Based on Thermogravimetric Analysis**. Graduate School of Agriculture. Kyoto University. 2012.

OLIVEIRA, E. P. et al. **Study of drying of fruit and seeds of mamona the chain of productive mamona (Ricinnus comunis L).** V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Salvador 2008.

OLIVERI, D. V.; COSTA, D. M. **Curso de Atualização Tecnológica em Massas Alimentícias**. Braibanti do Brasil S.A Indústria e Comércio/ABIMA - Associação Brasileira das Indústrias de Massas Alimentícias. 1994. 3-160.

OSBORNE, D. R.; VOOGT, P. **Análisis de Los Nutrientes de Los Alimentos**. Editorial Acribia S.A. Zaragoza: 1986. 5-12.

PARK, K. J.; ANTÔNIO, G. C. **Análises de Materiais Biológicos**. Campinas, p.2-20. 2006

PARK, K. J. et al. **Seleção de Processos e Equipamentos de Secagem**. Campinas. 2006

PARK, K. J. B. et al. **Considerações Termodinâmicas das Isotermas**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. Campina Grande. 10: 83-94 p. 2008.

PARK, K. J. P. et al. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. UNICAMP. Campinas: 2007.

PAUCAR-MENACHO, L. M. et al. Desenvolvimento de massa alimentícia fresca funcional com a adição de isolado protéico de soja e polidextrose utilizando páprica como corante **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 4, p. 768-769, 2008.

PAVAN. **Seminário de Técnica e Tecnologia de Fabricação de Massas**: PAVAN Group. Único: 78-257 p. 2010.

PETITOT, M.; ABECASSIS, J.; MICARD, V. **Structuring of pasta components during processing: impact on starch and protein digestibility and allergenicity** Food Science & Technology. Montpellier 2009.

PIMENTEL, D.; PIMENTEL, M. **Alimentação, Energia e Sociedade**. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa: 1990. 8-23.

PIZZINATTO, A. **Qualidade da Farinha de Trigo: Conceito, Fatores Determinantes e Parâmetros de Avaliação e Controle**. Campinas 1999.

QUAGLIA, G. **Ciencia y Tecnología de la Panificación**. Editorial Acribia. Zaragoza: 1991. 1-67.

RANKEN, M. D. **Manual de Industrias de los Alimentos**. Editorial Acribia S.A. Zaragoza: 1993. 16-27.

REES, J. A. G.; BETTISON, J. **Procesado Térmico y Envasado de Los Alimentos**. Editorial Acribia S.A. Zaragoza: 1994. 251-267.

REIS, F. M. **Tecnologia dos Produtos Agro-Alimentares**. Clássica Editora. Lisboa: 1982. 52-53.

RESENDE, O. et al. **Cinética da secagem de clones de café (Coffea canephora Pierre) em terreiro de chão batido** Instituto Nacional de Pesquisas Amazônia 2010.

RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. G. **Química de Alimentos**. Editora Edgard Blücher. São Paulo: 2007.

ROSSI, R. M.; NEVES, M. F. **Estratégias para o trigo no Brasil**. Editora Atlas. São Paulo: 2004. 59-194.

RUSSELL, J. B. **Química Geral**. Makron Books. São Paulo: 1994. 40.

SANTOS, C. J. R. D. **Secagem de sementes de girassol via radiação infravermelho e convecção forçada de ar aquecido**. Universidade Tiradentes. Aracaju 2009.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to Food Engineering**. 4ª. Mason: Food Science and Technology International Series, 2009. 258.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**. 5ª Edição. Porto Alegre: 2002. 488-492.

SMITH, J. M.; NESS, H. C. V.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. Editora LTC. Rio de Janeiro: 2007. 540-543.

SOLOMONS, T. W. G. **Química Orgânica**. Editora LTC. Rio de Janeiro: 2009.

STUKNYTE, M. et al. Spaghetti from durum wheat: Effect of drying conditions on heat damage, ultrastructure and in vitro digestibility. **Food Chemistry**, www.elsevier.com/locate/foodchem, 2013.

SÃO PAULO, A. L. D. E. D. **Decreto N° 12.486, de 20 de outubro de 1978. Normas Técnicas Especiais Relativas a Alimentos e Bebidas: 36-66 p.** 1978.

TERRON, L. R. **Termodinâmica Química Aplicada**. Editora Manole. Barueri: 2009. 623-632.

UHLIG, H. **Industrial Enzymes And Their Applications**. John Wiley & Sons. New York: 1998. 40 - 287.

VELADAT, R.; ASHTIANI, F. Z.; RAHMANI, M. **A rigorous analysis of simultaneous heat and mass transfer in the pasta drying process**. Department of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology. Tehran 2013.

VILMA ALIMENTOS. **Curso Básico de Panificação**. Contagem: Vilma Alimentos: 5-23 p. 2011.

VISENTAINER, J. V.; FRANCO, M. R. B. **Ácidos Graxos em Óleos e Gorduras: Identificação e Quantificação**. Varela. São Paulo: 2006. 14-15.

VOLLHARDT, K. P. C.; SCHORE, N. E. **Química Orgânica: Estrutura e Função**. 4ª Edição. Porto Alegre: 2004. 758.

WEST, R. **Whole Grain Pasta: A Physicochemical and Sensory Study**. University of Guelph 2012.

WONG, D. W. S. **Food Enzymes: Structure and Mechanism**. Chapman & Hall. New York: 1995. 37-38.

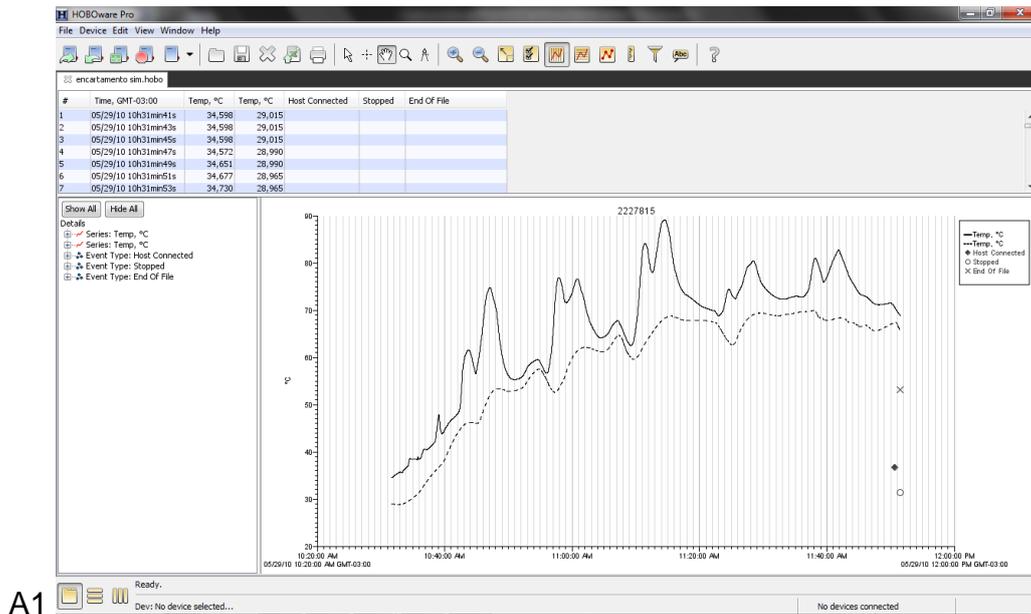
ZUCHI, J. **Curva de secagem de frutos de mamona**. Informativo Abrates. Vacaria 2012.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4ª. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012. 6-10.

8. ANEXO

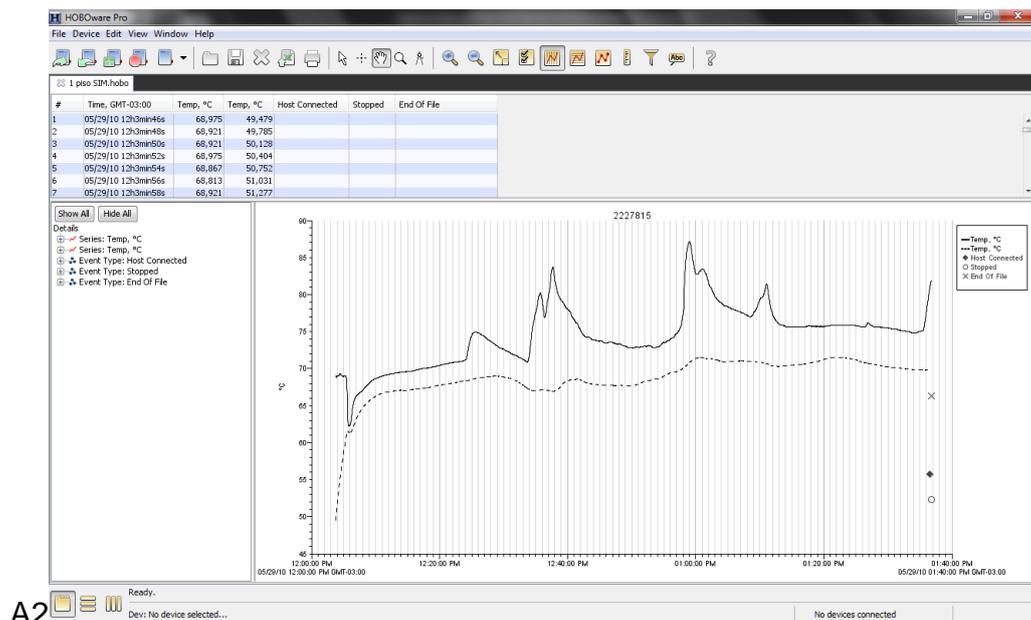
ANEXO A – Imagens gráficas do comportamento das temperaturas de B.S (linha contínua) e B.U (linha pontilhada) em todas as zonas da secadora plotados pelo software HOBOWare Pro (Bhw Lite Hoboware, 2010).

Figura 1 – Variação da temperatura de B.S ao longo do encartamento da secadora, sendo visível as 5 zonas de secagem onde aparecem os 5 picos.



A1

Figura 2 – Variação da temperatura de B.S e B.U ao longo do 1º piso



A2

Figura 3 – Variação da temperatura de B.S ao longo do 2º piso da secadora.

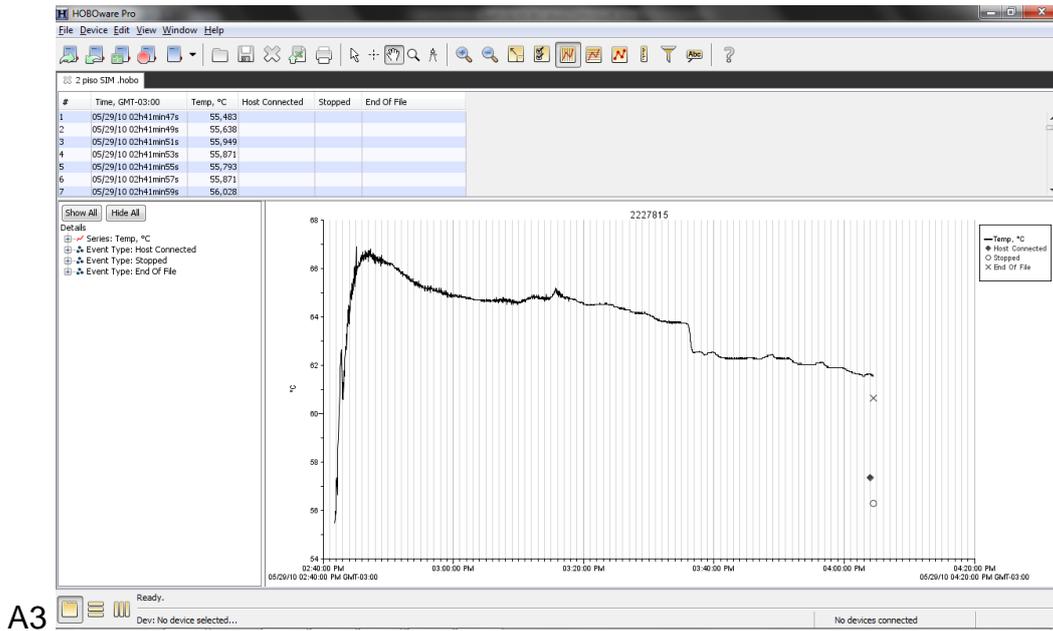


Figura 4 – Variação da temperatura de B.S ao longo do 3º piso da secadora.

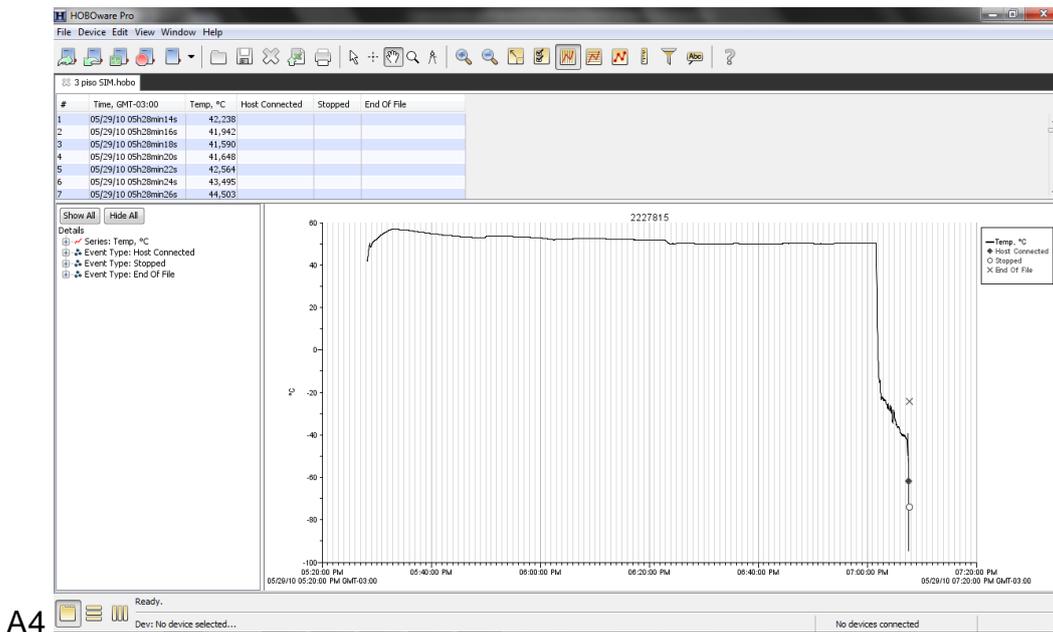
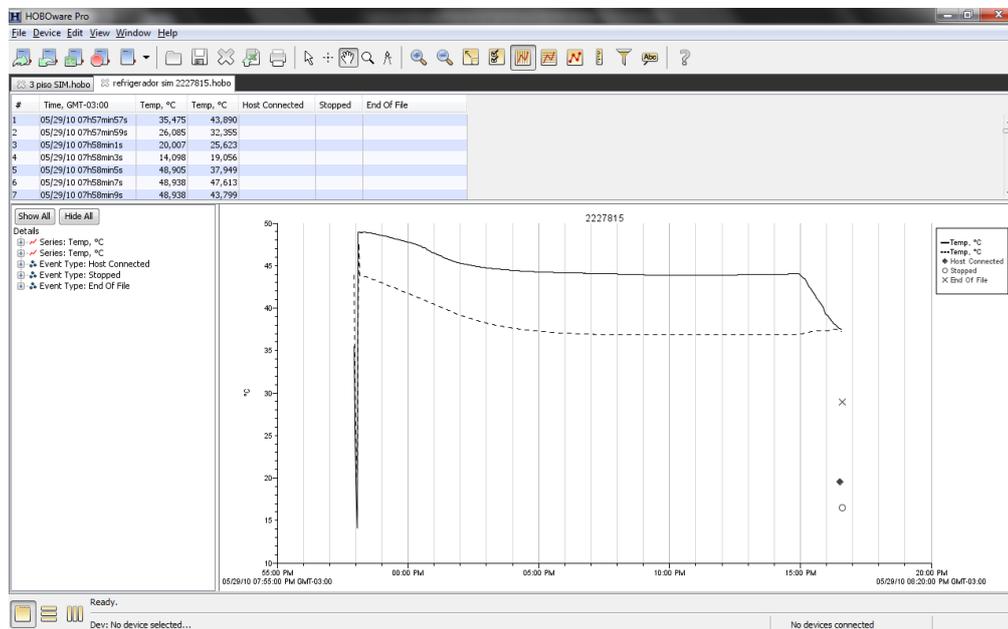
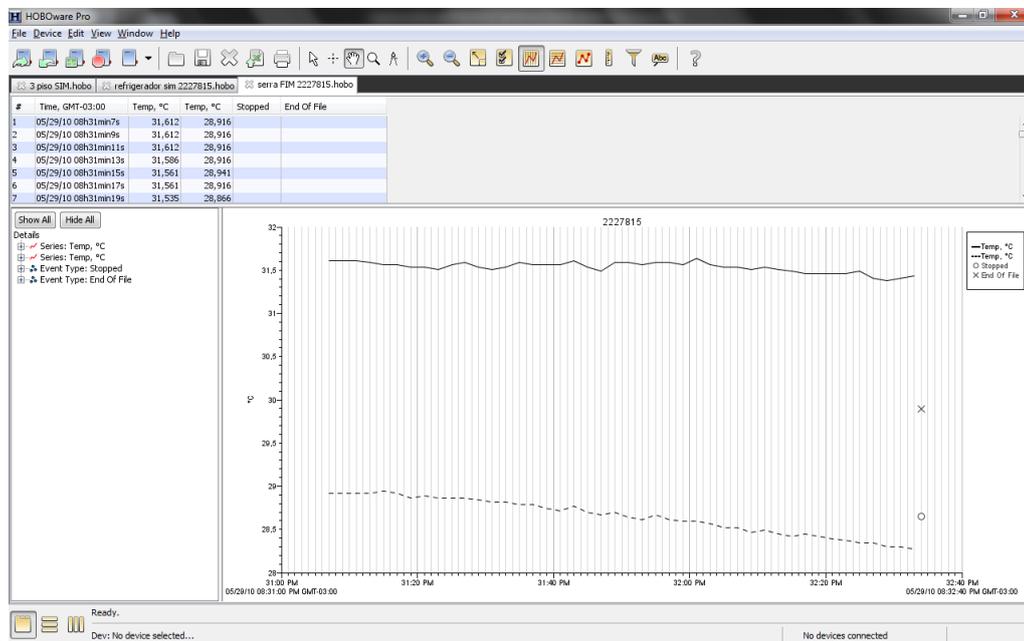


Figura 5 – Variação da temperatura de B.S e B.U ao longo do refrigerador da secadora.



A5

Figura 6 – Registro da temperatura de B.S e B.U da parte externa da secadora.



A6

ANEXO B – Imagens gráficas das cartas psicrométricas em todas as zonas da secadora plotados pelo *software Cytsoft Psychrometric Chart 2.2* (*software de propriedades psicrométricas*) (Cytsoft Psychrometric Chart, 2009).

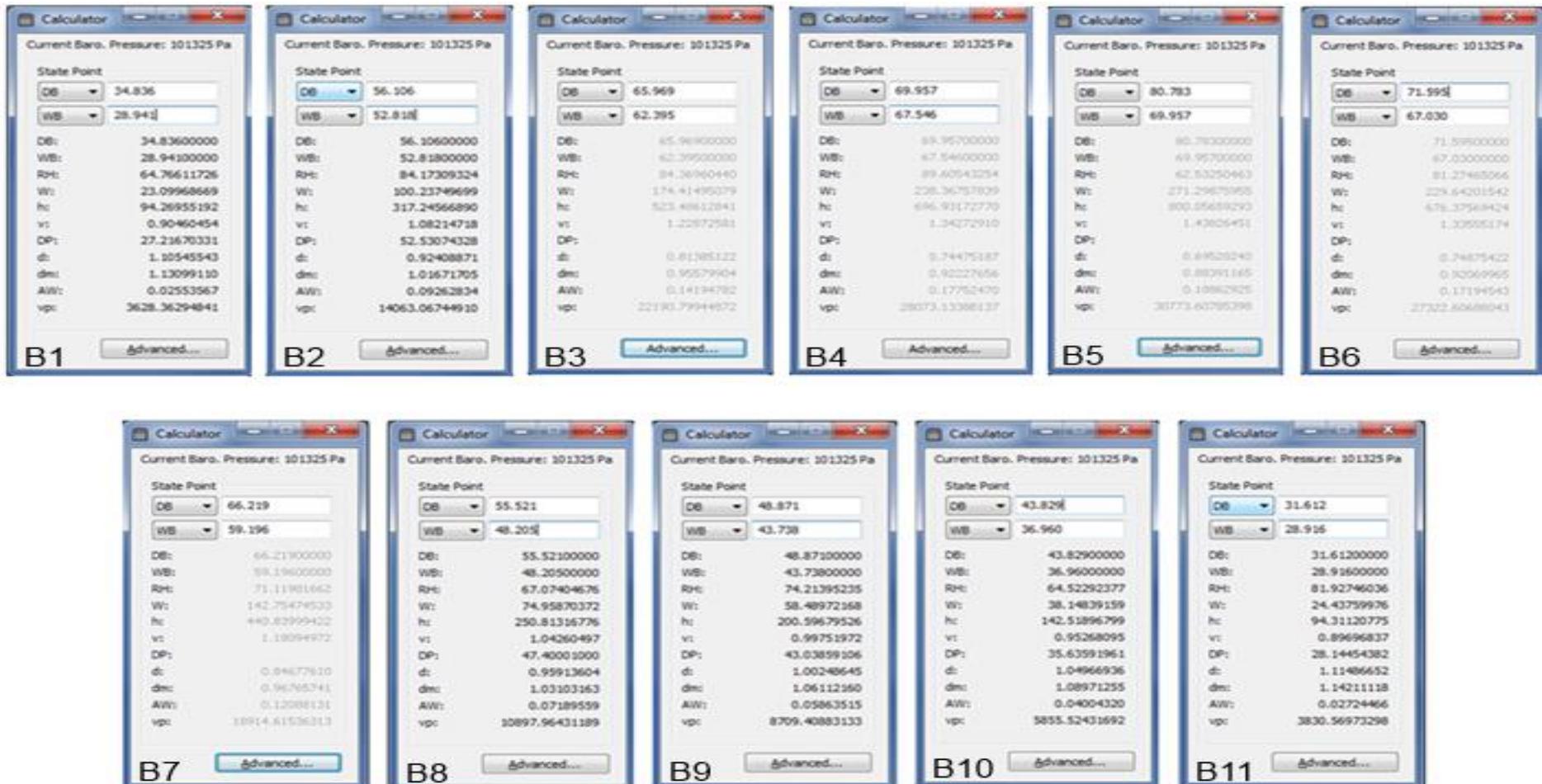


Figura B1: Variáveis psicrométricas do ambiente externo de entrada no início do processo

Figura B2: Variáveis psicrométricas da 1ª central do encartamento

Figura B3: Variáveis psicrométricas da 2ª central do encartamento

Figura B4: Variáveis psicrométricas da 3ª central do encartamento

Figura B5: Variáveis psicrométricas da 4ª central do encartamento

Figura B6: Variáveis psicrométricas da 5ª central do encartamento

Figura B7: Variáveis psicrométricas do 1ª piso

Figura B8: Variáveis psicrométricas do 2ª piso

Figura B9: Variáveis psicrométricas do 3ª piso

Figura B10: Variáveis psicrométricas do refrigerador

Figura B11: Variáveis psicrométricas do ambiente externo de saída ao fim do processo

ANEXO C – Umidades em base úmida e base seca obtidas das amostras após análise em estufa.

Tabela 55 - Umidades em base úmida e base seca obtidas das amostras após análise em estufa.

Umidade das Amostras Coletadas						
<i>Amostras</i>	<i>m_C(g)</i>	<i>m_A(g)</i>	<i>m_{C+A}(g)</i>	<i>m_{C+R}(g)</i>	<i>U_{B,U}%</i>	<i>U_{B,S}%</i>
Farinha T. Comum1	29,3872	2,0056	31,3930	31,1236	13,432	15,517
Farinha T. Comum 2	28,3786	2,0049	30,3834	30,1147	13,402	15,476
Massa Após Mistura 1	29,7227	2,0087	31,7309	31,1162	30,602	44,096
Massa Após Mistura 2	30,3246	2,0037	32,3283	31,7129	30,713	44,328
Massa Após Mistura 3	30,2277	2,0029	32,2277	31,6163	30,526	43,938
Remoído de Reproc. 1	30,0788	2,0017	32,0806	31,8550	11,270	12,702
Remoído de Reproc. 2	29,1725	2,0028	31,1753	30,9494	11,279	12,713
Remoído de Reproc. 3	29,9606	2,0009	31,9619	31,7358	11,300	12,739
Massa Amb. Externo 1	28,5569	2,0019	30,5584	29,9838	28,703	40,258
Massa Amb. Externo 2	28,5574	2,0024	30,5580	29,9824	28,746	40,342
Massa Saí 1ª Central1	29,3396	2,0027	31,3416	30,8202	26,035	35,199
Massa Saí 1ª Central2	29,5691	2,0046	31,5715	31,0726	24,888	33,134
Massa Saí 2ª Central1	29,1053	2,0035	31,1075	30,6384	23,414	30,572
Massa Saí 2ª Central2	28,4485	2,0022	30,4498	29,9823	23,349	30,462
Massa Saí 3ª Central1	30,2377	2,0071	32,2441	31,8646	18,908	23,317
Massa Saí 3ª Central2	28,2468	2,0004	30,2472	29,8630	19,206	23,772
Massa Saí 4ª Central1	28,8157	2,0033	30,8163	30,4457	18,499	22,699
Massa Saí 4ª Central2	28,4185	2,0007	30,4200	30,0521	18,389	22,532
Massa Saí 4ª Central3	25,5445	2,0011	30,5449	30,1714	18,665	22,948
Massa Saí 5ª Central1	29,7302	2,0030	31,7315	31,3531	18,892	23,292
Massa Saí 5ª Central2	28,4317	2,0067	30,4385	30,0584	18,942	23,368
Massa Saí 5ª Central3	29,1718	2,0062	31,1766	30,7980	18,871	23,261
Massa Saída 1º Piso 1	28,7153	2,0036	30,7210	30,4638	12,837	14,727
Massa Saída 1º Piso 2	28,3740	2,0024	30,3765	30,1188	12,870	14,770
Massa Saída 1º Piso 3	30,0939	2,0013	32,0982	31,8346	13,171	15,169
Massa Saída 2º Piso 1	28,6784	2,0076	30,6871	30,4596	11,332	12,780
Massa Saída 2º Piso 2	29,2885	2,0090	31,2965	31,0715	11,200	12,612
Massa Saída 2º Piso 3	28,7330	2,0093	30,7409	30,5145	11,268	12,698
Massa Saída 3º Piso 1	29,9714	2,0036	31,9762	31,7525	11,165	12,568
Massa Saída 3º Piso 2	29,9583	2,0040	31,9620	31,7356	11,297	12,736
Massa Saída 3º Piso 3	29,2019	2,0034	31,2053	30,9820	11,146	12,544
Massa Saí Refriger. 1	29,1732	2,0004	31,1756	30,9521	11,173	12,578
Massa Saí Refriger. 2	28,6167	2,0023	30,6186	30,3989	10,972	12,325
Massa Saí Refriger. 3	30,0470	2,0065	32,0533	31,8289	11,184	12,592

ANEXO D – Variáveis gerais das matérias-primas utilizadas.

Tabela 56 – Variáveis gerais das matérias-primas utilizadas.

Variáveis das matérias-primas				
Água				
Características		Potável, tratada em filtro interno, sensorialmente insípida, incolor e inodora.		
Densidade	μ (g/cm ³)	0,9970		
Trigo				
Tempo de descanso, h	h	20		
Farinha de trigo				
Densidade	μ (g/cm ³)	1,5076	Abs (%)	59,0
Umidade Base úmida	U _{B,U} (%)	13,417	T _c (min)	1,17
Umidade Base Seca	U _{B,S} (%)	15,496	T _S (min)	10,5
Teor de Cinzas Base Seca	Cz _{B,S} (%)	0,706	T _{DM} (min)	6,0
Cor	L	91,29	E (min)	9,33
	a*	0,35	ITM (U.F)	40,0
	b*	10,14	T _Q (min)	10,5
	Ai	9470	A (cm ²)	109,50
Amido Danificado	UCD	22,8	R (U.E)	370,00
	AACC	5,31	RM (U.E)	502,50
Proteínas Totais	%	10,625	E (mm)	175,00
	Base úmida	27,40	D (R/E)	2,11
Glúten	Base seca	9,01	Nox (A.E/R)	5,15
	Index	0,89	A (cm ²)	149,10
Lípidios	%	0,4955	R (U.E)	475,00
Falling Number	s	330	RM (U.E)	602,50
	180 μ m	6,61	E (mm)	172,50
Granulometria (%)	150 μ m	8,39	D (R/E)	2,78
	125 μ m	18,00	Nox (A.E/R)	5,45
	106 μ m	13,00	A (cm ²)	130,70
Alveograma	Fundo	54,00	R (U.E)	525,00
	P (mm)	93,70	RM (U.E)	675,00
	L (mm)	61,00	E (mm)	151,50
	P/L	1,54	D (R/E)	3,46
	W (10 ⁻⁴ J)	226,20	Nox (A.E/R)	3,74
	G	17,30		
	le	51,60		
Outras informações				
Temperatura da Água de Empasto	T (°C)	34,40	L	81,39
Temperatura da água de resfriamento do cilindro	T (°C)	28,27	Cor do remoldo	a*
Temperatura da massa após mistura (empasto)	T (°C)	38,00		b*
Temperatura da trafilha	T (°C)	63,33	Pressão de Extrusão no cabeçote	kgf/cm ²
Temperatura da massa após extrusão	T (°C)	55,33	Pressão do vácuo	kgf/cm ²
Umidade da massa após mistura (empasto)	U _{B,U} (%)	30,61	Tempo de vara	s
Umidade da massa após extrusão	U _{B,U} (%)	28,72	Massa da vara úmida	kg
Umidade do remoldo de reprocesso	U _{B,U} (%)	11,28	Percentual de retalho	%
Teor de cinzas do remoldo de reprocesso	Cz _{B,S} (%)	0,61	Massa da vara seca	kg
Teor de cinzas da massa após mistura	Cz _{B,S} (%)	0,70	Percentual de residuo	%
Percentual de Curva	%	5,08		10,00

ANEXO E – Certificado de calibração dos sensores de temperatura utilizados na pesquisa.

D1



VIO.10 0000147-1

São Paulo, 10 de março de 2010.

A

JOSÉ JORGE

E-mail: jorge@nephel.ro@gmail.com

REF: COTAÇÃO DE LOCAÇÃO

Atendendo a vossa solicitação, apresentamos a cotação para locação dos instrumentos como segue abaixo:

ITEM	QTD	Especificação	Tabela de dias	Preço por 7 dias corridos
01	01	U12-606 REGISTRADOR 4 CANAIS EXTERNOS LINHA IN DOOR Temperatura de operação: -20° a 70°C Faixa do sensor externo: -40° a 100°C Escala de umidade: de 0 a de 95%, não condensada Exatidão de Tempo: Aproximadamente o ± 1 minuto por o mês em 25°C Capacidade de registro: 43.000 registros	7 dias corridos	R\$ 300,00 + R\$ 25,00 de frete para envio por sedex Será cobrado + R\$ 42,00 por excedente
02	02	TMC50-HD SENSOR EXTERNO TEMPERATURA AR/ÁGUA/SOLO Sensor de temperatura: Faixa do sensor: -40° a 50° C na água ou no solo -40° a 100° C no ar Comprimento: Disponível em comprimentos de cabo do pé de 0.3m, de 1.8m, de 6.1m, e de 15.2m (1, 6, 20, e 50 pés)		
03	01	BHW-LITE HOBOWare Lite FOR WINDOWS SOFTWARE E INTERFACE PARA REGISTRADORES SÉRIE U10 / U12 / U14 / U23 - Include CD/USB cable		

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO nº. TEU-10-154

Nome do Cliente: VECTUS IMPORTATUM INTR. PREC. LTDA
Endereço: R. CARLOS BUZZI, 14
Bairro: JARDIM DAS ACÁCIAS
Cidade: SÃO PAULO **CEP:** 04703-040

1 DESCRIÇÃO DO INSTRUMENTO:

Tipo:	Registrador 4 Canais Externos	Data da calibração:	25/05/2010
Marca:	ONSET	Data da emissão:	26/05/2010
Modelo:	U12-006	Freq. de calibração:	Anual
Tipo:	Registrador 4 Canais Externos		
Número de série:	2227815		
Sensor Externo:	TMC 50 - HA		
Nº. Sensor:	42348	Canal 1	
Sensor Externo:	TMC 50 - HA		
Nº. Sensor:	42349	Canal 2	
Exatidão:	±0,70°C (temperatura)	Faixa nominal do Instrumento:	-40,0 à 100 °C
Erro máximo admitido:	±0,70°C (temperatura)	Faixa de calibração:	5 à 35 °C

2 EQUIPAMENTOS / PADRÕES

INSTRUMENTO	FABRICANTE	Nº. DE SÉRIE	MODELO	Nº. DO CERTIFICADO	ORGÃO EXP.
TERMOHIGROMETRO	ROTRONIC	52454 013	HYGROPALM	LV 19064/09	VISOMES
VALIDADE	FAIXA DE MEDIÇÃO	EXATIDÃO	RESOLUÇÃO	TEMP. DE OPERAÇÃO	UMID. DE OPERAÇÃO
23/06/2010	-10 a 60°C	+/- 0,2°C	0,1°C	-10 a + 60°C	0 a 99% não condensada.

INSTRUMENTO	FABRICANTE	Nº. DE SÉRIE	MODELO	Nº. DO CERTIFICADO	ORGÃO EXP.
TERMOHIGROMETRO	ROTRONIC	52454 013	HYGROPALM	LV 19064/09	VISOMES
VALIDADE	FAIXA DE MEDIÇÃO	EXATIDÃO	RESOLUÇÃO	TEMP. DE OPERAÇÃO	UMID. DE OPERAÇÃO
23/06/2010	0 a 100%	+/-1,5%	0,1%	-10 a + 60°C	0 a 99% não condensada.

INSTRUMENTO	FABRICANTE	Nº. DE SÉRIE	MODELO	Nº. DO CERTIFICADO	ORGÃO EXP.
TERMORESISTÊNCIA	PRESYS	555.09.05	T-25N	LV 12290/10	VISOMES
VALIDADE	FAIXA DE MEDIÇÃO	EXATIDÃO	RESOLUÇÃO	TEMP. DE OPERAÇÃO	UMID. DE OPERAÇÃO
11/05/2011	-25 à 125 °C	+/- 0,2% da leitura	0,01°C	23,0 °C	75,0 %

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO nº. TEU-10-154

3 RESULTADOS

TEMPERATURA – Sensor Externo – CANAL 1

MÉDIA DAS LEITURAS (°C)	VALOR PADRÃO TEMPERATURA (°C)	DIFERENÇA DOS VALORES DA TEMPERATURA (°C)	DESVIO DA LEITURA (%)	DESVIO DO FUNDO DE ESCALA (%)
5,04	5,00	0,04	0,74	0,03
14,96	15,00	-0,04	-0,27	-0,03
24,94	25,00	-0,06	-0,22	-0,04
34,86	35,00	-0,14	-0,39	-0,10

TEMPERATURA – Sensor Externo – CANAL 2

MÉDIA DAS LEITURAS (°C)	VALOR PADRÃO TEMPERATURA (°C)	DIFERENÇA DOS VALORES DA UR (°C)	DESVIO DA LEITURA (%)	DESVIO DO FUNDO DE ESCALA (%)
5,05	5,00	0,05	1,00	0,04
14,97	15,00	-0,03	-0,19	-0,02
24,98	25,00	-0,02	-0,08	-0,01
34,94	35,00	-0,06	-0,17	-0,04

4 NOTAS

$$\text{Desvio da Leitura} = \frac{\text{Leituras Calculadas} - \text{Valor Padrão}}{\text{Valor Padrão}} \times 100$$

$$\text{Desvio do Fundo Escala} = \frac{\text{Diferença Valores}}{\text{Fundo Escala}} \times 100$$

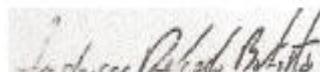
UR = Umidade Relativa

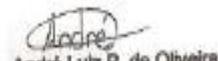
Durante a execução da calibração foram registradas as variações de temperatura e umidade relativa apresentadas abaixo:

Temperatura: 20,8 à 21,4°C

Umidade Relativa: 50,2 à 51 %

Os resultados apresentados representam a média das leituras e medições efetuadas.


Anderson Delgado Batista
Control de Qualidade


André Luiz R. de Oliveira
Assistente Técnico