

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMULAÇÃO E DAS
CONDIÇÕES OPERACIONAIS DOS TIPOS DE
CONGELAMENTO NA QUALIDADE DA MASSA E DO PÃO**

Myriam de las Mercedes Salas-Mellado
Engenheira de Alimentos

Prof. Dr. Yoon Kil Chang
Orientador

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por **Myriam de Lás Mercedes Salas Mellado**, aprovada pela Comissão Julgadora em 05 de agosto de 2003.

Campinas, 05 de agosto de 2003.

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Doutor em Tecnologia de Alimentos


Prof. Dr. Yoon Kil Chang
Presidente da Banca

Campinas
2003

UNIDADE	CC
Nº CHAMADA	71110212
	Sa31e
V	EX
TOMBO BCI	55058
PROC.	16.124103
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	17/1/03
Nº CPD	

CM00188938-7

Bd-id 300075

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

Sa31e	<p>Salas-Mellado, Myriam de las Mercedes</p> <p>Estudo da influência da formulação e das condições operacionais dos tipos de congelamento na qualidade da massa e do pão / Myriam de las Mercedes Salas-Mellado. – Campinas: [s.n.], 2003.</p> <p>Orientador: Yoon Kil Chang</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.</p> <p>1.Tecnologia de Alimentos. 2.Pão – Qualidade. 3.Criogênica. I.Chang, Yoon Kil. II.Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.</p>
-------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

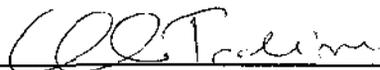
BANCA EXAMINADORA



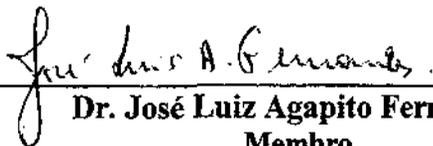
Prof. Dr. Yoon Kil Chang
Orientador



Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.
Membro



Dra. Carmen Cecília Tadini
Membro



Dr. José Luiz Agapito Fernandes
Membro

Dra. Fernanda Paula Collares
Membro

Dr. Marcelo Cristianini
Membro



Prof. Dr. Ahmed Athia El-Dash
Membro

Campinas, de de 2003

DEDICATÓRIA

Ao Carlos, companheiro de todas as horas,
que facilitou minha caminhada até aqui.

Aos filhos, Alvaro, Pablo e Janice,
pelo carinho, compreensão e por ter acreditado que,
apesar da idade, eu conseguiria.

Ao Tomás, que chegou por último,
pela alegria da renovação

Dedico

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus agradecimentos sinceros:

Ao Prof. Dr. Yoon Kil Chang, pela orientação e apoio durante todo o desempenho do trabalho.

Ao Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior, pela disponibilidade, paciência, sugestões e ensinamentos indispensáveis à realização deste trabalho.

À Prof. Dra. Fernanda Paula Collares, pela correção íntegra da tese, principalmente da redação e do idioma português.

À Prof. Dra. Carmen Cecília Tadini, pela correção, críticas técnicas e sugestões da tese.

Aos Dres. José Luiz Agapito Fernandes e Marcelo Cristianini, pela correção da tese.

Ao Departamento de Química da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, na pessoa do Prof. Dr. Carlos Prentice-Hernández, que absorveu toda a minha carga docente durante o período em que me mantive afastada de Rio Grande.

À CAPES, pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo auxílio financeiro.

À White Martins Gases Industriais S/A, pela cessão da câmara criogênica e de alguns cilindros de nitrogênio líquido.

À Fleischmann Royal Ltda., pela cessão dos fermentos biológicos, à Oxiteno, pelo fornecimento do polissorbato 80, e à Rhodia S/A, pelo fornecimento do glúten de trigo.

Ao pessoal do Laboratório de Tecnologia de Cereais, Raízes e Tubérculos da FEA/UNICAMP, especialmente à técnica Kelly Azevedo, pela colaboração nas análises reológicas das massas.

Ao pessoal do Laboratório de Refrigeração do Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA/UNICAMP, especialmente ao professor Lincoln Camargo Neves, técnicos e alunos de pós graduação, que me ajudaram na etapa do congelamento das massas.

À professora Ana Lourdes Gandara, do Laboratório de Microbiologia do Departamento de Tecnologia de Alimentos da FEA/ UNICAMP, pela ajuda nas análises de contagem de leveduras.

Ao Zé e ao Nilo, funcionários da Padaria da FEA, pela ajuda na elaboração das massas

À Engenheira de Alimentos, Eliza Mami Ota, que me auxiliou durante a parte experimental do congelamento das massas.

À Engenheira de Alimentos, Araceli Fiorussi, pela colaboração nos ensaios experimentais.

Ao aluno de Eng. Química da FURG, Laone Neitzel, pelo apoio na elaboração da parte escrita da tese.

À Dra. Janaína de Medeiros Burkert, pela ajuda na análise estatística dos dados.

Aos amigos Teresa e Hermes, pela amizade incondicional oferecida durante minha permanência em Campinas.

Ao Prof. Dr. Nelson Horácio Pezoa e família, pela amizade e “interesse” na conclusão deste trabalho.

Às amigas Maria Inés Abecia Soria e Cáritas J. S. Mendonça, pela companhia “caseira”.

Aos amigos e colegas: Kelly, Beth e Jorge, Martha, Álvaro, Leonard, Héctor, Cida, Manoel, Miguel, Ricardo, Marcus, Francly, pela ajuda, amizade e alegria compartilhadas.

Às amigas Caroline Steel e Veridiana de Rosso, pela amizade e colaboração nos trâmites finais.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xx
LISTA DE ANEXOS	xxv
RESUMO GERAL	xxvi
GENERAL ABSTRACT	xxvii
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
1.1. FORMULAÇÃO	4
1.1.1. Farinha	4
1.1.2. Água	6
1.1.3. Leveduras	9
1.1.3.1. Fermentação e efeito do congelamento nas células de levedura	9
1.1.3.2. Resistência ao frio e papel da trealose	11
1.1.3.3. Prevenção ao efeito prejudicial do congelamento	13
1.1.4. Aditivos e outros ingredientes	15
1.1.4.1. Oxidantes	16
1.1.4.2. Surfactantes/emulsificantes	18
1.1.4.3. Gorduras	18
1.1.4.4. Enzimas	19
1.2. PROCESSO	21
1.2.1. Métodos de panificação e mistura da massa	21
1.2.2. <i>Make-up</i> da massa	23
1.2.3. Congelamento	25
1.2.3.3. Efeitos das condições de congelamento na estabilidade da massa congelada	27
1.2.3.3.1. Efeito da velocidade e da temperatura de congelamento	27
1.2.3.1. Equipamentos	29
1.3. EMBALAGEM	31
1.4. ARMAZENAMENTO CONGELADO	32
1.5. DESCONGELAMENTO E FORNEAMENTO	34

1.6. EFEITO DO CONGELAMENTO NA PROPRIEDADE DE RETENÇÃO DE GÁS DAS MASSAS	36
1.7. MECANISMOS DAS MUDANÇAS NAS PROTEÍNAS INDUZIDAS PELO CONGELAMENTO	37
1.7.1. Dano mecânico	37
1.7.2. Desidratação	38
1.7.3. Concentração dos sais	40
1.7.4. Desnaturação das proteínas em massas congeladas	40
1.7.5. Modificações da microestrutura da massa devidas ao congelamento	41
1.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
CAPÍTULO II: EFEITO DA FORMULAÇÃO NA QUALIDADE DE MASSAS CONGELADAS PARA PÃO	52
RESUMO	52
ABSTRACT	53
2.1. INTRODUÇÃO	54
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	56
2.2.1. Matéria-prima, ingredientes e formulação da massa	56
2.2.2. Métodos	56
2.2.2.1. Preparo da massa, congelamento, descongelamento e elaboração do pão	56
2.2.2.2. Determinação das características reológicas da massa	57
2.2.2.3. Determinação de viabilidade de leveduras	57
2.2.2.4. Determinação do volume e da dureza do pão	58
2.2.2.5. Determinação do escore das características tecnológicas do pão	59
2.2.2.6. Análise estatística	59
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
2.3.1. Da análise estatística	60
2.3.1.1. Efeito da formulação	61
2.3.1.2. Efeito do fermento	62
2.3.1.3. Efeito do tempo de armazenamento	63
2.3.2. Viabilidade de leveduras	66
2.4. CONCLUSÕES	68

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
CAPÍTULO III: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO PESO DA BISNAGA NA QUALIDADE PANIFICÁVEL DA MASSA CONGELADA EM CÂMARA CRIOGÊNICA	75
RESUMO	75
ABSTRACT	76
3.1. INTRODUÇÃO	77
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	79
3.2.1. Material	79
3.2.1.1. Matéria-prima	79
3.2.1.2. Ingredientes e reagentes	80
3.2.1.3. Equipamentos	80
3.2.2. Métodos	82
3.2.2.1. Formulação e preparo da massa	82
3.2.2.2. Dimensões das bisnagas de massa	83
3.2.2.3. Congelamento em câmara criogênica: calibração de termopares e operação de congelamento	83
3.2.2.4. Armazenamento	84
3.2.2.5. Descongelamento e fermentação	85
3.2.2.6. Avaliação da qualidade da massa	85
3.2.2.6.1. Determinação das leveduras viáveis	85
3.2.2.6.2. Determinação da microextensibilidade	86
3.2.2.6.3. Determinação da altura da massa e do volume de CO ₂ produzido pelas leveduras	86
3.2.2.7. Elaboração e avaliação da qualidade do pão	88
3.2.2.7.1. Elaboração do pão	88
3.2.2.7.2. Determinação do volume específico do pão	88
3.2.2.7.3. Determinação do escore do pão	89
3.2.2.7.4. Determinação da dureza do miolo	89
3.2.2.8. Planejamento experimental e avaliação estatística dos resultados	90
3.2.3. Estudo do tempo de armazenamento	92

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
3.3.1. Obtenção das curvas de congelamento	93
3.3.2. Estudo do efeito das variáveis temperatura e peso de bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão	96
3.3.2.1. Para a condição com ventilação	96
3.3.2.1.1. Após 1 dia de congelamento	96
3.3.2.1.2. Após 15 dias de armazenamento congelado	97
3.3.2.1.3. Após 50 dias de armazenamento congelado	100
3.3.2.2. Efeito das variáveis temperatura e peso de bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão para a câmara criogênica sem ventilação	104
3.3.2.2.1. Após 1 dia de congelamento	104
3.3.2.2.2. Após 15 dias de armazenamento congelado	106
3.3.2.2.3. Após 50 dias de armazenamento congelado	108
3.3.3. Estudo da influência do tempo de armazenamento nas características da massa e do pão de amostras congeladas em congelador criogênico com ventilação	115
3.3.3.1. Efeito do tempo de armazenamento nas características reológicas da massa	117
3.3.3.2. Efeito do tempo de armazenamento nas características tecnológicas do pão	119
3.3.3.3. Efeito do tempo de armazenamento sobre a viabilidade das leveduras e a produção de CO ₂	121
3.4. CONCLUSÕES	123
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
CAPÍTULO IV: ESTUDO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NA QUALIDADE PANIFICÁVEL DA MASSA CONGELADA EM TÚNEL DE AR FORÇADO	128
RESUMO	128
ABSTRACT	129
4.1. INTRODUÇÃO	130
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	135
4.2.1. Material	135
4.2.1.1. Matéria-prima	135
4.2.1.2. Ingredientes e reagentes	135
4.2.1.3. Equipamentos	135

4.2.2. Métodos	137
4.2.2.1. Formulação e preparo da massa	137
4.2.2.2. Dimensões das bisnagas de massa	137
4.2.2.3. Congelamento em túnel de ar forçado: calibração de termopares, determinação de velocidade de ar do túnel e operação de congelamento	138
4.2.2.4. Armazenamento	139
4.2.2.5. Descongelamento e fermentação	140
4.2.2.6. Avaliação da qualidade da massa	140
4.2.2.7. Elaboração e avaliação da qualidade do pão	140
4.2.2.8. Planejamento experimental e avaliação estatística dos dados	140
4.2.2.9. Estudo do tempo de armazenamento	142
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	143
4.3.1. Obtenção das curvas de congelamento	143
4.3.2. Estudo do efeito das variáveis temperatura, peso de bisnaga e velocidade do ar nas variáveis resposta da massa e do pão	143
4.3.2.1. Após 1 dia de congelamento	143
4.3.2.2. Após 30 dias de armazenamento sob congelamento	147
4.3.2.3. Após 60 dias de armazenamento sob congelamento	151
4.3.3. Verificação de modelos empíricos que relacionam as variáveis independentes (temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga) com as variáveis resp	151
4.3.3.1. Verificação dos modelos quadráticos que relacionam as variáveis estudadas com as respostas obtidas	158
4.3.3.1.1. Verificação do modelo quadrático para o volume de CO ₂ liberado pelas leveduras após 30 dias de armazenamento congelado	160
4.3.3.1.2. Superfície de resposta do modelo que relaciona o volume de CO ₂ com a temperatura do ar e o tamanho da bisnaga	162
4.3.3.1.3. Verificação do modelo quadrático para o volume específico do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento	163
4.3.3.1.4. Superfície de resposta do modelo que relaciona o volume específico do pão com a temperatura do ar e a velocidade de ar do túnel	165
4.3.3.2. Verificação dos modelos empíricos lineares que relacionam as variáveis estudadas	

com as respostas obtidas	166
4.3.3.2.1. Modelos preditivos apresentados pelas massas após 1 dia de congelamento	166
4.3.3.2.1.1. Verificação do modelo linear para a variável escore do pão após 1 dia de congelamento	167
4.3.3.2.1.2. Verificação do modelo linear para a variável dureza do pão após 1 dia de congelamento	168
4.3.3.2.1.3. Superfície de resposta do modelo que relaciona a dureza do pão com a temperatura do ar e o peso da bisnaga	170
4.3.3.2.1.4. Superfície de resposta do modelo que relaciona a dureza do pão com a velocidade do ar e o peso da bisnaga	171
4.3.3.2.2. Modelos preditivos apresentados pelas massas após 30 dias de armazenamento sob congelamento	173
4.3.3.2.2.1. Verificação do modelo linear para a variável dureza do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento	173
4.3.3.2.2.2. Superfície de resposta do modelo que relaciona a dureza do pão com a velocidade do ar e o peso da bisnaga	175
4.3.3.2.2.3. Verificação do modelo linear para a variável contagem de leveduras após 30 dias de armazenamento sob congelamento	176
4.3.3.2.2.4. Superfície de resposta do modelo que relaciona a contagem de leveduras com a velocidade do ar e a temperatura	178
4.3.3.2.2.5. Superfície de resposta do modelo que relaciona a contagem de leveduras com a velocidade do ar e o peso da bisnaga	180
4.3.3.2.2.6. Verificação do modelo linear para a variável volume de CO ₂ após 30 dias de estocagem sob congelamento	181
4.3.3.2.2.7. Superfície de resposta do modelo que relaciona o volume de CO ₂ com a velocidade do ar e a temperatura	183
4.3.3.2.2.8. Superfície de resposta do modelo que relaciona o volume de CO ₂ com a temperatura e o peso da bisnaga	184
4.3.3.2.3. Modelos preditivos apresentados pelas massas armazenadas durante 60 dias	186
4.3.3.2.3.1. Verificação do modelo linear para a variável volume de CO ₂ após 60 dias de armazenamento congelado	186

4.3.3.2.3.2. Superfície de resposta do modelo que relaciona o volume de CO ₂ com a velocidade do ar e a temperatura pós 60 dias de armazenamento sob congelam	188
4.3.4. Estudo da influência do tempo de armazenamento nas características da massa e do pão de amostras congeladas nos ensaios T1 a T8 em túnel de ar forçado	191
4.3.4.1. Características reológicas das massas congeladas	193
4.3.4.2. características tecnológicas do pão obtido das massas congeladas	196
4.3.4.3. Características de fermentação das massas congeladas	198
4.4. CONCLUSÕES	200
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	202
CAPÍTULO V: VELOCIDADE E TEMPO DE CONGELAMENTO DOS PROCESSOS CRIOGÊNICO E EM TÚNEL DE AR FORÇADO	207
RESUMO	207
ABSTRACT	208
5.1. INTRODUÇÃO	209
5.2. MATERIAL E MÉTODOS	215
5.2.1. Material	215
5.2.1.1. Condições de ventilação, temperatura e tamanho de bisnaga	215
5.2.2. Métodos	216
5.2.2.1. Determinação das três etapas de cada curva	216
5.2.2.2. Determinação do período de congelamento	216
5.2.2.3. Determinação das velocidades parciais e totais de cada congelamento	216
5.2.2.4. Determinação do tempo de congelamento total real e teórico	217
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	219
5.3.1. Determinação das temperaturas iniciais e finais dos congelamentos lineares criogênicos e em túnel de ar forçado	219
5.3.2. Determinação do período de congelamento	219
5.3.3. Determinação das velocidades parciais e globais dos congelamentos criogênico e em túnel	226
5.3.4. Determinação do tempo total de congelamento real e calculado	231
5.4. CONCLUSÕES	235

5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	235
CONCLUSÕES GERAIS	239
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	242
ANEXOS	243

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1. Fluxograma de elaboração da massa e do pão	58
Figura 2.2. Curva de congelamento da massa do pão	60
Figura 2.3. Efeito da formulação da massa no volume específico e na dureza do pão	63
Figura 2.3. Efeito do tempo de armazenamento no volume específico e na dureza do miolo do pão	65
Figura 2.4. Efeito da formulação na taxa de sobrevivência das leveduras para os fermentos A e B	67

CAPÍTULO III

Figura 3.1. Mini freezer criogênico	81
Figura 3.2. Posição dos termopares colocados dentro do congelador criogênico	84
Figura 3.3. Curva de extensibilidade da massa determinada no texturômetro TAXT2 da SMS	87
Figura 3.4. Curvas de desenvolvimento da massa e liberação gasosa determinadas no reofermentômetro Chopin F3	88
Figura 3.5. Curva de dureza do miolo de pão determinada no texturômetro	90
Figura 3.6. Histórico das temperaturas do produto e do meio no congelamento criogênico com ventilação	94
Figura 3.7. Histórico das temperaturas do produto e do meio no congelamento criogênico sem ventilação	95
Figura 3.8. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada 1 dia e dos pães resultantes (com ventilação)	98
Figura 3.9. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada 15 dias e dos pães resultantes (com ventilação)	99
Figura 3.10. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada 50 dias e dos pães resultantes (com ventilação)	102
Figura 3.11. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada 1 dia e dos pães resultantes (sem ventilação)	105

Figura 3.12. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada 15 dias e dos pães resultantes (sem ventilação)	108
Figura 3.13. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada 50 dias e dos pães resultantes (sem ventilação)	110
Figura 3.14. Índice de ganho/perda na força da massa congelada em congelador criogênico com ventilação	117
Figura 3.15. Índice de ganho/perda na altura da massa congelada em congelador criogênico com ventilação	118
Figura 3.16. Índice de ganho/perda na dureza do pão obtido de massa congelada em congelador criogênico com ventilação	119
Figura 3.17. Índice de ganho/perda no escore do pão obtido de massa congelada em congelador criogênico com ventilação	120
Figura 3.18. Índice de ganho/perda no volume específico do pão obtido de massa congelada em congelador criogênico com ventilação	120
Figura 3.19. Índice de ganho/perda na contagem de leveduras da massa congelada em congelador criogênico com ventilação	121
Figura 3.20. Índice de ganho/perda no volume de CO ₂ da massa congelada em congelador criogênico com ventilação	122

CAPÍTULO IV

Figura 4.1. Túnel de congelamento de ar forçado utilizado para congelamento das massas	136
Figura 4.2. Pontos de medição da velocidade do ar no túnel de congelamento	138
Figura 4.3. Efeitos das variáveis sobre as características da massa e do pão após 1 dia de congelamento	145
Figura 4.4. Efeitos das interações das variáveis sobre as características da massa e do pão após 1 dia de armazenamento sob congelamento	146
Figura 4.5. Efeitos das variáveis sobre as características da massa e do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento	149
Figura 4.6. Efeitos das interações das variáveis sobre as características da massa e do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento	150

Figura 4.7. Efeitos das interações das variáveis sobre as características da massa e do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento	153
Figura 4.8. Efeitos das interações das variáveis sobre as características da massa e do pão após 60 dias de armazenamento congelado	154
Figura 4.9. Superfície de resposta para a produção de CO ₂ com 30 dias de armazenamento congelado em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga (a). Curva de contorno para a produção de CO ₂ em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga (b). (Modelo Quadrático: MQ)	162
Figura 4.10. Superfície de resposta para o volume específico do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga (a). Curva de contorno para o volume específico do pão após 60 dias de armazenamento (b) (MQ)	165
Figura 4.11. Superfície de resposta da dureza do pão em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga (a). Curva de contorno da dureza do pão em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga (b) (Modelo Linear: ML)	171
Figura 4.12. Superfície de resposta da dureza do pão em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga após 1 dia de congelamento (a). Curva de contorno da dureza do pão em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga (b) (ML)	172
Figura 4.13. Superfície de resposta da dureza do pão em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga após 30 dias de armazenamento congelado (a). Curva de contorno da dureza do pão em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga após 30 dias de armazenamento congelado (b) (ML)	176
Figura 4.14. Superfície de resposta da contagem de leveduras em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento congelado (a). Curva de contorno da contagem de leveduras em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga após 30 dias de armazenamento sob congelamento (b) (ML)	179
Figura 4.15. Superfície de resposta da contagem de leveduras em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento congelado (a). Curva de contorno da contagem de leveduras em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento sob congelamento (b) (ML)	180
Figura 4.16. Superfície de resposta do volume de CO ₂ em função da velocidade do ar e	

da temperatura após 30 dias de armazenamento congelado (a). Curva de contorno do volume de CO ₂ em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento sob congelamento (b) (ML)	183
Figura 4.17. Superfície de resposta do volume de CO ₂ em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga após 30 dias de armazenamento congelado (a). Curva de contorno do volume de CO ₂ em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga após 30 dias de armazenamento sob congelamento (b) (ML)	185
Figura 4.18. Superfície de resposta do volume de CO ₂ em função da velocidade do ar e da temperatura após 60 dias de armazenamento sob congelamento (a). Curva de contorno da velocidade do ar e da temperatura após 60 dias de armazenamento congelado (b) (ML)	189
Figura 4.19. Índice de ganho ou perda da característica força da massa ao longo do armazenamento das massas congeladas em túnel de ar forçado	194
Figura 4.20. Índice de ganho ou perda da característica altura da massa ao longo do armazenamento das massas congeladas em túnel de ar forçado	195
Figura 4.21. Índices de ganho ou perda das características tecnológicas do pão obtido da massa congelada em túnel e armazenada 1, 30 e 60 dias. (a) Escore do pão, (b) Volume do pão, (b) Volume específico do pão, (c) Dureza do miolo do pão	197
Figura 4.22. Índices de ganho ou perda das características de fermentação das massas congeladas e armazenadas 1, 30 e 60 dias. (a) Contagem de leveduras, (b) Produção de CO ₂	199

CAPÍTULO V

Figura 5.1. Curva temperatura/tempo característica do congelamento de produtos alimentícios	213
Figura 5.2. Indicação das temperaturas e tempos para determinação das três fases dos congelamentos criogênicos: (a) C1; (b) C2; (c) C3; e (d) C4	220
Figura 5.3. Indicação das temperaturas e tempos para determinação das três fases dos congelamentos criogênicos: (a) C5; (b) C6; (c) C7; e (d) C8	221
Figura 5.4. Indicação das temperaturas e tempos para determinação das três fases dos congelamentos em túnel: (a) T1; (b) T2; (c) T3; e (d) T4	222

Figura 5.5. Indicação das temperaturas e tempos para determinação das três fases dos congelamentos em túnel: (a) T5; (b) T6; (c) T7; e (d) T8	223
Figura 5.6. Períodos do patamar dos congelamentos criogênico e em túnel	225
Figura 5.7. Velocidades parciais (V_{p1}) e globais (V_{p2}) dos congelamentos criogênicos e em túnel	228
Figura 5.8. Tempos totais reais e teóricos dos congelamentos criogênicos e em túnel	233
Figura 5.9. Comparação das velocidades parciais dos congelamentos mais adequados	234

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 2.1. Formulação das massas para pão a serem congeladas	57
Tabela 2.2. Valores médios de volume específico e dureza do miolo para as diferentes formulações de massa para pão	61
Tabela 2.3. Valores médios de volume específico, de dureza e de escore do pão com relação ao tempo de armazenamento congelado	64
Tabela 2.4. Valores de contagem de leveduras e taxa de sobrevivência para as diferentes formulações	66

CAPÍTULO III

Tabela 3.1. Formulação básica de pão tipo francês	82
Tabela 3.2. Dimensões das bisnagas de massa de pão antes do congelamento	83
Tabela 3.3. Localização e legenda dos termopares distribuídos na câmara criogênica	85
Tabela 3.4. Matriz de planejamento geral	91
Tabela 3.5. Condições dos congelamentos realizados na câmara criogênica para o estudo do tempo de armazenamento	92
Tabela 3.6. Valores das respostas dos congelamentos com ventilação das massas e do pão após 1 dia de estocagem congelada	96
Tabela 3.7. Análise dos efeitos nas variáveis resposta da massa e do pão dos congelamentos com ventilação após 1 dia de armazenamento congelado	97
Tabela 3.8. Valores das respostas dos congelamentos com ventilação das massas e do pão após 15 dias de armazenamento sob congelamento	98
Tabela 3.9. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 15 dias	99
Tabela 3.10. Valores das respostas dos congelamentos com ventilação das massas e do pão após 50 dias de armazenamento sob congelamento	101
Tabela 3.11. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 50 dias	101
Tabela 3.12. Valores das respostas dos congelamentos “sem ventilação” das massas e	

do pão após 1 dia de armazenamento sob congelamento	104
Tabela 3.13. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 1 dia	105
Tabela 3.14. Valores das respostas dos congelamentos “sem ventilação” das massas e do pão após 15 dias de armazenamento sob congelamento	106
Tabela 3.15. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 15 dias	106
Tabela 3.16. Valores das respostas dos congelamentos “sem ventilação” das massas e do pão após 50 dias de armazenamento sob congelamento	108
Tabela 3.17. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 50 dias	109
Tabela 3.18. Velocidades de congelamento dos experimentos que apresentaram os melhores resultados	113
Tabela 3.19. Características da massa e do pão dos congelamentos mais promissórios após a avaliação estatística dos resultados	114
Tabela 3.20. Valores das respostas da massa e do pão obtido da massa sem congelar e após congelamento em câmara criogênica com ventilação, armazenadas durante 1, 15 e 50 dias	115
Tabela 3.21. Valores de perda (%) ou ganho (%) dos parâmetros de qualidade da massa e do pão de massas congeladas em câmaras criogênicas com ventilação	116

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1. Dimensões das bisnagas de massa de pão antes do congelamento	137
Tabela 4.2. Velocidades de ar obtidas variando a frequência do motor do ventilador do túnel de congelamento	139
Tabela 4.3. Matriz do planejamento experimental fatorial completo de dois níveis	141
Tabela 4.4. Valores das variáveis medidas na massa e no pão dos congelamentos realizados em túnel após 1 dia de armazenamento sob congelamento	144
Tabela 4.5. Efeito da temperatura, da velocidade do ar, do peso da bisnaga e suas interações nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 1 dia	144
Tabela 4.6. Valores das variáveis medidas na massa e no pão dos congelamentos	

realizados em túnel após 30 dias de armazenamento sob congelamento	147
Tabela 4.7. Efeito da temperatura, da velocidade do ar, do peso da bisnaga e suas interações nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 30 dias	148
Tabela 4.8. Valores das variáveis medidas na massa e no pão dos congelamentos realizados em túnel após 60 dias de armazenamento congelado	151
Tabela 4.9. Efeito da temperatura, da velocidade do ar, do peso da bisnaga e suas interações nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 60 dias	152
Tabela 4.10. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão após 1 dia de congelamento (Modelo Quadrático: MQ)	158
Tabela 4.11. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento (MQ)	159
Tabela 4.12. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento (MQ)	159
Tabela 4.13. Coeficiente de regressão para o volume de CO ₂ com 30 dias de armazenamento sob congelamento (MQ)	160
Tabela 4.14. Tabela ANOVA para o volume de CO ₂ com 30 dias de armazenamento congelado (MQ)	161
Tabela 4.15. Coeficiente de regressão para o volume específico do pão com 60 dias de armazenamento sob congelamento (MQ)	163
Tabela 4.16. Tabela ANOVA para o volume específico do pão com 60 dias de armazenamento sob congelamento (MQ)	164
Tabela 4.17. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão após 1 dia de congelamento (Modelo Linear: ML)	166
Tabela 4.18. Coef. de regressão para escore do pão após 1 dia de cong (ML)	167
Tabela 4.19. Tabela ANOVA para o escore do pão após 1 dia de cong (ML)	168

Tabela 4.20. Coef. de regressão para dureza do pão após 1 dia de cong (ML)	169
Tabela 4.21. Tabela ANOVA para dureza do pão após 1 dia de congelamento (ML)	169
Tabela 4.22. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão após 30 dias de armazenamento congelado (ML)	173
Tabela 4.23. Coeficiente de regressão para dureza do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento (ML)	174
Tabela 4.24. Tabela ANOVA para dureza do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento (ML)	174
Tabela 4.25. Coeficiente de regressão para contagem de leveduras após 30 dias de Armazenamento (ML)	177
Tabela 4.26. Tabela ANOVA para contagem de leveduras após 30 dias de armazenamento sob congelamento (ML)	177
Tabela 4.27. Coeficiente de regressão para o volume de CO ₂ após 30 dias de armazenamento sob congelamento (ML)	181
Tabela 4.28. Tabela ANOVA para volume de CO ₂ após 30 dias de armazenamento sob congelamento (ML)	182
Tabela 4.29. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento (ML)	186
Tabela 4.30. Coeficiente de regressão para o volume de CO ₂ após 60 dias de armazenamento sob congelamento (ML)	187
Tabela 4.31. Tabela ANOVA para o volume de CO ₂ após 60 dias de armazenamento sob congelamento (ML)	187
Tabela 4.32. Valores e índices de perda ou ganho ao longo do armazenamento das características de força e altura das massas congeladas nos ensaios lineares T1 a T8	191
Tabela 4.33. Valores e índices de perda ou ganho ao longo do armazenamento das características de escore, volume específico e dureza do pão obtido das massas congeladas nos ensaios lineares T1 a T8	192
Tabela 4.34. Valores e índices de perda ou ganho ao longo do armazenamento da	

contagem de leveduras e volume de CO ₂ das massas congeladas nos ensaios lineares T1 a T8	191
------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO V

Tabela 5.1. Condições de ventilação, temperatura do ar e dimensões de bisnaga dos congelamentos criogênico e em túnel	215
Tabela 5.2. Temperaturas iniciais e finais dos ensaios lineares criogênicos e em túnel de ar forçado	219
Tabela 5.3. Valores dos tempos e temperaturas iniciais e finais do patamar da mudança de fase dos congelamentos criogênico e em túnel de ar forçado	224
Tabela 5.4. Tempos iniciais e finais para o cálculo das velocidades parciais e totais dos congelamentos criogênico e em túnel de ar forçado	227
Tabela 5.5. Classificação dos congelamentos em ordem decrescente de velocidade global de congelamento	229
Tabela 5.6. Tempos de congelamento real e teórico dos ensaios criogênicos e em túnel de ar forçado	232

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Avaliação da qualidade do pão

ANEXO 2. Curvas experimentais dos ensaios criogênicos lineares

ANEXO 3. Curvas experimentais dos ensaios em túnel lineares

ANEXO 4. Valores das características de qualidade da massa e do pão dos congelamentos realizados em túnel de ar forçado: (a) 30 dias de armazenamento;
(b) 60 dias de armazenamento

ANEXO 5. Dados necessários para o cálculos dos tempos teóricos de congelamento, conforme Pham, 1986

RESUMO GERAL

Com o objetivo de estudar a influência das variáveis do processo de congelamento sobre os parâmetros de qualidade de panificação da massa congelada compararam-se dois sistemas de congelamento: o criogênico e o mecânico em túnel de ar forçado, utilizados para congelar massas com formulação adicionada de 4% de glúten vital (base: farinha) e 10% de trealose (base: matéria seca das leveduras). Determinou-se mediante desenho experimental um planejamento fatorial 2^2 para o congelamento criogênico e um planejamento fatorial 2^3 para o congelamento em túnel. As variáveis independentes foram: temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga de massa. As variáveis resposta foram as características reológicas (força e altura da massa), características de fermentação (contagem de leveduras e volume de CO_2 produzido) e as características tecnológicas do pão (escore, volume específico e dureza do miolo). A análise estatística dos resultados permitiu concluir, no caso do congelamento criogênico, que a temperatura de $-30\text{ }^\circ\text{C}$ e a bisnaga de 80 g foram benéficas à qualidade de panificação, na condição com ventilação. A condição sem ventilação na câmara criogênica foi considerada inadequada pelo prejuízo da qualidade da massa e do pão e pelo alto consumo de nitrogênio líquido. No caso do congelamento em túnel as condições de maior estabilidade da massa e do pão foram: temperatura do ar na faixa de -20 a $-25\text{ }^\circ\text{C}$, velocidade do ar do túnel na faixa de 4,2 a 5,14 m/s e peso de bisnaga de massa de 80 a 120 g. O estudo das velocidades globais de congelamento permitiu concluir que trabalhando com faixas de velocidade de $0,59\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ a $1,27\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ consegue-se massas estáveis ao armazenamento sob congelamento de oito semanas. O estudo do tempo de armazenamento demonstrou perda de qualidade de todas as características da massa e do pão avaliadas ao longo do armazenamento, mais drástica nas condições de temperaturas menores de congelamento.

GENERAL ABSTRACT

With the objective to study the influence of the freezing process variables on the baking quality parameters, two freezing systems were compared: the cryogenic and the conventional mechanical blast tunnel that had been utilized to freeze doughs with a formulation containing 4% vital gluten (flour basis) and 10% trehalose (yeast dry matter basis). Experimental design was used to determine a factorial planning 2^2 for the cryogenic freezing and a factorial planning 2^3 for the blast tunnel. The independent variables were: air velocity, air temperature and dough piece weight. The response variables were: the rheological dough characteristics (dough strength and dough height), the fermentation characteristics (yeast count and released CO_2 volume) and the technological bread characteristics (score, specific volume and bread crumb hardness). Statistical analysis of the data of the cryogenic experiments showed that an air temperature of -30°C and a bread dough piece of 80 g were beneficial to the bread dough baking quality in "with ventilation" condition. The condition "without ventilation" was considered inadequate for the damage effect on the overall bread and dough quality, as well as for the high consumption of liquid nitrogen. The better operating condition for the tunnel freezing were a temperature range of -20 to -25°C , an air velocity range of 4,2 to 5,14 m/s and a weight range of 80 to 120 g for the dough piece. The global and partial freezing rates values obtained from the experimental freezing curves allowed to conclude that working with global freezing rates in the range of 0,59 $^\circ\text{C}/\text{min}$ to 1,27 $^\circ\text{C}/\text{min}$ it is possible to obtain bread dough stability during frozen storage of eight weeks. It was observed loss of the dough baking quality over the frozen storage for all the experiments, more drastic for the lowest freezing temperatures conditions.

INTRODUÇÃO GERAL

As massas congeladas para pão converteram-se em uma alternativa popular crescente, comparadas com o processo convencional de panificação. O uso de massas congeladas permite elaborar produtos recém forneados, economizando custos de equipamentos e trabalho. Nos anos recentes, a qualidade desses produtos tem melhorado, devido aos avanços na tecnologia e na formulação porém, ainda há lugar para melhorias. Os problemas associados com as massas congeladas para pão incluem tempos longos de fermentação da massa, volumes reduzidos e textura ruim do pão e perda de qualidade. A levedura é necessária para proporcionar quantidades suficientes de gás para o crescimento da massa e a sua destruição, durante o congelamento, resulta em diminuição da produção de gás que, junto com o enfraquecimento da estrutura da massa, pela danificação da rede do glúten, reduzem também a capacidade de retenção de gás (Kenny *et al.* 1999).

Através dos anos, os padeiros tem procurado estender a vida útil da massa que é grandemente limitada pelo processo natural da fermentação pelas leveduras, a atividade enzimática e o relaxamento da estrutura do glúten. A melhoria na eficiência de produção tem sido a força motriz para os padeiros procurar tais extensões da vida da massa. Por exemplo, alguns produtos são necessários em quantidades pequenas, precisando da mistura de pequenas bateladas de massa, porém, a eficiência máxima de produção é conseguida pela produção de quantidades maiores de massa do que aquelas necessárias para um único dia de vendas. Outras forças motrizes para a prolongação da vida útil das massas incluem a eliminação das horas de trabalho “não sociáveis” e restrições dos locais noturnos de trabalho.

Devido a que a fermentação é significativamente reduzida pela diminuição da temperatura da massa é natural que a atenção tenha sido focalizada na aplicação de temperaturas de refrigeração e ultra-congelamento nas massas que contém leveduras. Se a temperatura da massa é reduzida até valores suficientemente baixos, a fermentação pode se deter completamente e a massa poderá ser mantida num estado próximo ao de suspensão (Cauvain, 1999). As primeiras pesquisas com refrigeração de massas contendo leveduras

levaram até os processos conhecidos como de massas retardadas, que utilizam equipamentos de refrigeração especializados. Existem duas semelhanças e diferenças significativas entre as massas retardadas e as massas congeladas. Elas compartilham os problemas comuns, associados à baixa condutividade da massa, porém precisam equipamentos totalmente diferentes quando ambos processos são realizados sob condições ótimas. Na introdução das técnicas do retardamento e do congelamento no Reino Unido, na década de 1950, os produtos contendo leveduras foram aceitos com sucesso, porém as limitações da tecnologia e dos equipamentos reduziram seu impacto na indústria de panificação. A evolução das padarias “*in store*” resultaram na renovação do interesse pelas massas retardadas no Reino Unido. Em outros países europeus, o uso das massas retardadas tem permanecido mais estável desde sua introdução, devido em parte à sobrevivência contínua de grande número de pequenos profissionais de panificação com limitações das práticas de trabalho ou em locais onde o processo de retardamento parece ter provocado uma contribuição positiva à qualidade do produto.

A produção de massas congeladas apresenta um apelo menor da arte do padeiro sendo mais adequada à produção centralizada das unidades congeladas com distribuição em pontos satélites e forneada nesses lugares. A popularidade dos produtos feitos com massas congeladas tem sido sempre menor na Europa do que nos EUA, onde existe um número significativo de unidades “*bake off*” usando a tecnologia das massas congeladas.

O pão produzido a partir de massas congeladas representa um mercado altamente produtivo nos EUA e em Canadá. Nos EUA, a vida útil da massa congelada é geralmente menor que 10 dias. Porém, em outros países como a Austrália, que apresenta longas distâncias entre os centros de produção e os consumidores, poderão ser necessários maiores tempos de vida útil, tornando-se importante o prolongamento do armazenamento congelado, aumentando assim significativamente as oportunidades de comercialização destes produtos (Zounis *et al.*, 2002a).

O armazenamento congelado da massa para pão está limitado por várias mudanças que acontecem durante o estado congelado. A perda de qualidade das massas congeladas

para pão provém de várias fontes: as células de levedura morrem durante o congelamento e o armazenamento congelado, o que resulta em menor poder gaseificante, diminuindo a levedação efetiva. Ocorre também um enfraquecimento da estrutura da massa, principalmente pela formação e crescimento de cristais de gelo durante o armazenamento congelado. Tal deterioração é promovida por flutuações de temperatura que ocorrem durante a distribuição e armazenamento dos produtos.

Este trabalho teve como objetivo estudar:

- A influência da formulação da massa, na estabilidade ao congelamento e na qualidade tecnológica do pão,
- A influência do congelamento criogênico, considerando as variáveis temperatura do ar e peso da bisnaga de massa, na qualidade tecnológica da massa e do pão,
- A influência do congelamento em túnel de ar forçado, considerando as variáveis temperatura e velocidade do ar e peso da bisnaga de massa, na qualidade tecnológica da massa e do pão,
- A influência do tempo de armazenamento das massas congeladas em congelador criogênico e em túnel de ar forçado, e
- Os sistemas criogênico e em túnel, comparando tempos e velocidades de congelamento.

CAPÍTULO I. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. FORMULAÇÃO

1.1.1. Farinha

A farinha de trigo é o ingrediente mais importante em panificação, devido à presença de glúten, que forma e mantém a estrutura celular da massa até a gelatinização do amido no cozimento, quando é formada a estrutura final do pão. A farinha adequada para uso em massas congeladas deve ter um conteúdo mínimo de proteína de 12%, e um W real na ordem de 250, valor que deve derivar-se de uma curva alveográfica bem equilibrada, cuja relação P/L deve estar em torno de 0,8 e com um G superior a 20. Estas condições são necessárias para diminuir o efeito negativo dos cristais de gelo formados durante o congelamento (Caetano, 1999).

As reações físicas e químicas que acontecem durante o processo de congelamento e a armazenagem sob congelamento são o resultado da formação de gelo e das interações massa-levedura. A formação de gelo é geralmente responsável pela interrupção física das ligações químicas presentes na massa, alterando as proteínas e causando mudanças nas propriedades funcionais da massa.

Sabe-se que a deterioração da qualidade durante o armazenamento sob congelamento pode ser diminuída usando uma farinha apropriada (Inoue e Bushuk, 1991).

Neyreneuf e Van der Plaat (1991) compararam a estabilidade de massas congeladas para pão francês feito com duas farinhas de conteúdos protéicos diferentes (11,1 e 12,8%). As massas elaboradas com a farinha de maior conteúdo protéico apresentaram maior estabilidade que aquelas elaboradas com a farinha de conteúdo protéico menor.

Inoue e Bushuk (1991), avaliando o comportamento reológico de massas congeladas submetidas a armazenamento à baixas temperaturas, concluíram que, para obter

pão de boa qualidade, a força da massa original deve ser maior que a requerida para a produção de pão padrão de massas não congeladas. Na prática, isto pode ser conseguido selecionando-se uma farinha forte, adicionando um oxidante apropriado ou suplementando a farinha com glúten Vital. Os mesmos autores, em 1992, observaram que uma variedade de trigo muito forte teve um melhor desempenho nas massas congeladas do que farinhas consideradas ótimas para panificação convencional. O melhor desempenho desta farinha foi atribuído à sua capacidade de manter “*oven-springs*” maiores durante o forneamento, mesmo após ter perdido um pouco de sua força intrínseca durante o congelamento e o armazenamento sob congelamento. Este estudo sugere que o conteúdo protéico é menos importante que a qualidade da proteína. O volume do pão diminuiu acentuadamente após o congelamento e gradualmente durante o armazenamento. Resultados nos quais a atividade da levedura manteve-se no mesmo nível das massas não congeladas, mostraram que a perda da força da massa durante o congelamento, o descongelamento e o armazenamento sob congelamento, foi a causa principal do declínio do volume do pão.

Nemeth *et al.* (1996) compararam farinhas canadenses provenientes de um trigo vermelho de primavera do Oeste do Canadá (CWRS) com um conteúdo protéico de 12,7%, absorção farinográfica de 64%, tempo de desenvolvimento de 6,5 minutos e estabilidade de 11,5 minutos, e uma farinha proveniente de um trigo canadense extra-forte (CWES) com 11,7% de proteína, absorção de água de 60,2%, tempo de desenvolvimento de 9 minutos e com estabilidade de 17,5 minutos (velocidade do farinógrafo de 94 rpm) para estudar o desempenho na panificação de massas congeladas. Eles concluíram que o uso de ambas farinhas, pelo fato de serem muito fortes, impartiram uma tolerância superior às massas congeladas quando as condições do processo e os ingredientes não foram otimizados.

A partir do trabalho de Lu e Grant (1999b), que compararam as frações de farinha forte de trigo Glupro com a farinha fraca do trigo Prospect e seu desempenho na panificação de massas congeladas, os autores concluíram que as frações da farinha forte Glupro tiveram um impacto positivo no desempenho de panificação das massas congeladas e as frações da farinha fraca Prospect apresentaram um impacto negativo. Entre as 4 frações isoladas da farinha, a glutenina apresentou papel predominante na qualidade. Os efeitos da

fração gliadina e da fração amido foram significativos porém não tão definitivos como os observados na fração glutenina. Neste estudo, eles concluíram que o glúten foi mais fortalecido pela adição de pentosanas solúveis em água do que pelas pentosanas insolúveis e que a glutenina tem um papel importante na qualidade das massas congeladas, corroborando os resultados obtidos por Inoue e Bushuk em 1991 e 1992, que determinaram que farinhas com glúten forte possuem melhor desempenho que farinhas com glúten fraco em massas congeladas e que a proteína do glúten, que controla a expansão do pão, parece ser a glutenina, o que foi demonstrado pelos valores de “oven-spring”. Os dados de Khan e Bushuk (1979) também indicaram que as frações de glutenina tem um papel predominante na melhoria da qualidade dos pães feitos com massas congeladas. Eles sugeriram que há interações entre as frações das farinhas e que os efeitos dessas interações são complexos. Seus resultados permitiram discutir que as interações entre as “mesmas frações”, derivadas de farinhas diferentes, apresentaram diferentes desempenhos na panificação e que a natureza destas interações pode determinar até um certo grau o comportamento final de panificação das massas congeladas.

1.1.2. Água

Juntamente com a farinha de trigo, a levedura e o sal, a água representa um ingrediente primário sem o qual não seria possível a formação da massa de pão. As propriedades viscoelásticas da massa são refletidas nas características gerais do pão, e podem ser total ou parcialmente determinadas pelo nível de absorção de água pela farinha de trigo durante a mistura.

No preparo das massas congeladas, utiliza-se quantidades de água ligeiramente inferiores às usadas em massas comuns, a fim de se obter massas mais firmes que as normais e de mais fácil manuseio, maquinabilidade e retenção da forma durante o processo de congelamento. A quantidade de água deve ser suficiente para se elaborar uma massa firme, procurando limitar movimentos da água durante a operação de congelamento e os fenômenos de cristalização e relaxamento no decorrer do descongelamento. A temperatura recomendada da água para produção de massas congeladas é de 0° C. Como o

enfraquecimento da massa durante o congelamento e armazenamento sob congelamento é uma das principais causas de deterioração da qualidade das massas congeladas, estas devem conter menos água que as massas usadas na panificação convencional. Geralmente, a absorção de água é reduzida em 3 a 5 %, comparada com as massas convencionais (Inoue e Bushuk, 1991).

A importância da água foi confirmada no trabalho de Lu e Grant (1999a), que informaram que a água é um componente estrutural e químico muito importante das massas congeladas e que está relacionada com a sua qualidade. Eles se basearam em estudos de Davies e Webb (1969), que estipularam que a água congelável é a água que pode formar gelo no sistema massa quando esta é submetida ao congelamento e armazenamento a baixas temperaturas. A cristalização e a recristalização do gelo estão estreitamente relacionadas com a mobilidade da água na massa durante o congelamento, o armazenamento e o transporte das massas congeladas até as padarias satélites. Os mesmos autores, estudando os efeitos da estocagem prolongada a temperaturas de congelamento sobre o amido e a qualidade de panificação de massas congeladas, concluíram que o amido danificado, a viscosidade intrínseca e a capacidade de ligação da água de isolados de amido de 4 farinhas foram positivamente associados com a força do glúten das cultivares de trigo das quais derivaram. Estes resultados indicaram que deve existir uma relação entre certas propriedades do amido e as propriedades reológicas da massa. Eles ainda acrescentaram que as influências ambientais podem ter uma influência importante nessas observações, porém esta é uma área que necessita pesquisas adicionais. Eles também estabeleceram que um dos problemas que acontece durante o processo de congelamento da massa é que a água migra nas massas congeladas e se separa da proteína e do amido, acumulando-se em poças que depois se cristalizam. Eles demonstraram que durante o armazenamento prolongado, a quantidade de água que pode congelar aumentou significativamente, mas a velocidade do aumento variou entre as 4 cultivares estudadas. O conteúdo protéico, assim como a qualidade da proteína, em termos de força de glúten, pareceu influenciar a quantidade de água congelável na massa. A quantidade de água congelável na cultivar de maior conteúdo protéico (Glupro) aumentou 41,6%, no entanto, para a cultivar Prospect, o aumento foi de 24% após 16 semanas de estocagem congelada.

Román-Gutierrez *et al.* (2002), estudando o conteúdo de água congelada e não congelada das farinhas de trigo e seus componentes e tentando relacionar esta característica com os conceitos de água ligada e livre, consideraram que a descrição das interações entre a água e os componentes da farinha de trigo (amido, proteínas e pentosanas) é um fator chave para entender os eventos físico-químicos que ocorrem durante o processamento dos produtos de cereais. Dependendo do conteúdo de umidade e das características dos componentes do trigo, a água apresenta-se ligada diretamente com os componentes ou como um fase de água livre na massa e também que a água ligada proporciona a quantidade de água necessária para hidratar totalmente e tornar plásticos os componentes do trigo, contribuindo diretamente para a organização supra-molecular da estrutura da massa. O conteúdo de água ligada na farinha tem sido estimado em 27 a 32 % (bs) a partir de determinação de equilíbrio de sorção (Baker *et al.*, 1946; Bushuk e Mehrotra, 1977; Leung e Steinberg, 1979). A quantidade de água não congelada na farinha de trigo tem sido determinada como sendo de 30 a 35% (Davies e Webb, 1969; Bushuk e Mehrotra, 1977; Kaletunc e Breslauer, 1996). O estudo objetivou descrever as propriedades da água não congelada em duas farinhas de trigo diferentes: forte e fraca, pelo comportamento de seus componentes principais: glúten, amido, amido danificado, pentosanas solúveis e insolúveis em água. As propriedades de ligação da água foram estimadas por medidas da água congelada e não congelada usando Calorimetria Diferencial de Varredura Modulada (MDSC). Eles concluíram que não foi possível calcular ou prever o conteúdo da água não congelada das farinhas de trigo a partir do comportamento de seus componentes. A simples soma das contribuições de cada componente não pôde ser usada para estimar o comportamento global das farinhas e que configurações estruturais específicas dos componentes na farinha de trigo (envolvendo a exposição de sítios hidrófilos ou hidrófobos) e as interações entre os componentes poderiam ser responsáveis por estes resultados. De fato, o uso de dados de MDSC em componentes puros, para descrever sistemas complexos como a farinha de trigo, ignora as interações entre os componentes poliméricos e a alteração potencial das propriedades dos componentes individuais que pode ocorrer como resultado do processo de purificação.

1.1.3. Leveduras

1.1.3.1. Fermentação e efeito do congelamento nas células da levedura

A levedura que atua na fermentação da massa é a *Saccharomyces cerevisiae*, que consome os açúcares fermentescíveis disponíveis e os transforma em álcool, gás carbônico e outros compostos orgânicos. Esta fermentação, chamada de alcoólica, ocorre de forma ideal em condições de temperatura controlada a 32° C. A ação da levedura se inicia a 7° C, a fermentação láctica ocorre a 20° C e a fermentação butírica a 35° C. Por isso, é necessário um rígido controle de temperatura, para que não se desenvolvam compostos indesejáveis dentro da massa. O início precoce da fermentação (ainda na etapa de mistura) pode provocar uma estrutura de miolo heterogênea, com bolhas grandes, devido à formação de dióxido de carbono. Para reduzir ao máximo esta formação, é necessário que a massa incorpore a maior quantidade de ar possível na etapa da mistura e que sua temperatura fique em torno de 25° C.

O fenômeno que acontece durante o congelamento de microrganismos pode ser explicado pela teoria dos “dois fatores” proposta por Mazur (1963). Este autor discrimina dois mecanismos de inativação celular, isto é, o efeito de concentração e o efeito de recristalização. Quando as células estão sendo congeladas elas perdem água por dois mecanismos: pela saída de líquido do citoplasma celular e pela formação de gelo. Isto leva ao aumento da concentração de solutos na célula, sendo que alguns compostos podem até precipitar. As altas concentrações de sais causam dano à membrana celular (Clegg *et al.*, 1982; Franks *et al.*, 1983) e simultaneamente desnaturação de proteínas como resultado das alterações de pH. Estes fenômenos são designados como “efeitos de concentração”, assumindo-se que a extensão da inativação celular depende, principalmente, da duração da operação de congelamento. Altas velocidades de congelamento resultarão em um maior número de células sobreviventes, devido ao congelamento de água intracelular, porém formam-se muitos cristais de gelo pequenos no citoplasma, os quais tendem a recristalizar formando partículas maiores, ainda a baixas temperaturas. A formação de cristais de gelo grandes por recristalização posterior produz injúria celular. A ação de ambos efeitos

dependem reversivelmente da velocidade de congelamento. Obviamente, a velocidade de congelamento ótima será suficientemente baixa para prevenir a formação de cristais de gelo intracelulares e, simultaneamente, rápida suficiente para evitar as injúrias severas provocadas pelos efeitos de concentração (Gehrke *et al.*, 1992).

O crescimento e a viabilidade de células de levedura são alterados pelo congelamento, resultando em atividade fermentativa enfraquecida. A injúria das funções fisiológicas da levedura devida ao congelamento, resulta de várias causas: a desnaturação das proteínas funcionais pelas baixas temperaturas, a perda de materiais intracelulares das leveduras devido à desintegração de membranas plasmáticas pela formação de cristais de gelo e às mudanças de pressão osmótica causadas pela condensação de materiais celulares (Murakami *et al.*, 1994). Sabe-se pouco sobre o comportamento fisiológico das células de levedura submetidas à tensão por congelamento e acerca dos fatores que fazem uma cepa de levedura mais resistente que outra. Estes autores advertem que a sensibilidade ao congelamento depende do tamanho das células de levedura, dos gêneros e das espécies. A modificação da distribuição de água na complexa matriz da massa pode resultar em grandes variações do microambiente da levedura, podendo levar a danos celulares reversíveis ou irreversíveis durante as operações de congelamento/ descongelamento e no armazenamento sob congelamento (Mazur, 1976).

Brown (1991), estudando o efeito do frio sobre os microrganismos, postulou que células que não são mortas durante o congelamento podem ser injuriadas “subletalmente” sendo tal danificação reversível, já que as células restabelecidas voltam a ter as características de células normais. As células injuriadas perdem sua viabilidade quando expostas a um meio ambiente estressante ou que contenha agentes inibidores. Ele estabeleceu que, quando se utilizaram temperaturas adequadas e se forneceram nutrientes, a maioria das células injuriadas voltou a apresentar suas características originais em algumas horas e que as conseqüências da injúria pelo frio não foram transmitidas à divisão celular, indicando que o congelamento não causa mudanças permanentes ao material genético das células. Os locais do dano celular e o mecanismo de restabelecimento têm sido identificados e revistados em alguns detalhes por Ray (1986).

1.1.3.2. Resistência ao frio e o papel da trealose

A trealose [O- α -D glucopiranosil, (1 \rightarrow 1)- α -D glucopiranosídeo] é um dissacarídeo não redutor com dois resíduos de glicose unidos em α -1,1. A trealose está amplamente distribuída entre microrganismos, plantas e insetos, possuindo várias funções biológicas interessantes como substância de reserva, proteção de proteínas e membranas celulares ao calor e às mudanças osmóticas (Reed *et al.*, 1996; Epstein, 1996).

A trealose e o glicogênio podem ser acumulados nas leveduras em quantidades similares, porém de modos diferentes. O glicogênio é formado somente durante a fase exponencial de crescimento da levedura, sendo subsequente consumido. Por outro lado, os níveis de trealose são altos na fase estacionária e extremamente baixos durante o crescimento rápido (Thevelein, 1984; Van Laere, 1989).

Sanderson (1985), fazendo uma revisão do tipo de leveduras usadas em panificação, explica que as leveduras instantâneas secas e ativas (IADY) devem possuir um conteúdo mínimo de trealose de 12% para torná-las apropriadas para uso em massas congeladas.

Méric *et al.* (1995) consideraram que é de interesse tecnológico que as leveduras de panificação apresentem alta resistência ao armazenamento sob congelamento, com alta capacidade fermentativa e baixa sensibilidade aos ciclos de congelamento/descongelamento. Os autores concluíram que a resistência das leveduras de panificação através do armazenamento não se relacionou com seu conteúdo de trealose celular de uma maneira simples. A degradação de 2,5% de trealose (base matéria seca de levedura) durante a mistura e pré-fermentação não afetou significativamente o comportamento das células de levedura quando um ciclo de congelamento/descongelamento foi aplicado. Por outro lado, um conteúdo de 4-5% deste composto (base matéria seca de levedura) foi requerido para proteger durante a seqüência de pré-fermentação, congelamento, armazenamento congelado e descongelamento. Teores de trealose acima deste nível não conferiram claramente uma maior resistência ao frio. Estes autores sugeriram que as reservas de trealose celular não são

o único fator de proteção das leveduras contra a injúria por congelamento na massa. Uma cepa de levedura denominada B, foi capaz de reter 62% de sua capacidade gasosa após 4 semanas de tensão por congelamento, enquanto que a capacidade de outra cepa de levedura denominada A, sob as mesmas condições e com um conteúdo de trealose similar, caiu para 34 %. Outro mecanismo que poderia contribuir para a alta resistência da cepa B ao frio é a funcionalidade das membranas celulares. Estes autores também demonstraram que não somente o acúmulo de trealose, mas também o controle de seu metabolismo até o momento do congelamento deveria ser levado em conta para obter maior resistência das leveduras ao frio. Eles observaram que em concentrações de trealose menores que 4 a 5 %, a degradação do açúcar se relacionou com uma maior redução do poder gaseificante. A principal conclusão é, portanto, que 4 a 5 % é a concentração limite para que este dissacarídeo proteja a membrana e o citoplasma celular. Este nível é também suficiente para atuar na recuperação da atividade metabólica e possível recuperação do dano após tensão por congelamento.

As leveduras de panificação são susceptíveis à danificação pelo frio durante o armazenamento da massa congelada, de tal maneira que as células de levedura não podem reter sua capacidade de produção de gás original após o congelamento e descongelamento (Godkin e Cathcart, 1949; Hirasawa *et al.*, 2001). Por isso, atualmente têm sido desenvolvidos vários tipos de levedura para panificação tolerantes ao congelamento (Hino *et al.*, 1990, Takagi *et al.*, 1997). O mecanismo da tolerância ao congelamento das leveduras de panificação tem sido estudado para diminuir a susceptibilidade ao dano pelo frio (Takagi *et al.*, 1997; Park *et al.*, 1997). Hirasawa *et al.* (2001) informaram que o conteúdo intracelular de trealose e a composição dos lipídios das membranas das leveduras de panificação foram fatores que afetaram sua tolerância ao congelamento, assim como afirmaram Murakami *et al.* em 1994 e 1996.

A *Saccharomyces cerevisiae* possui dois tipos de atividade de transporte de trealose dentro da célula: transporte de alta e de baixa afinidade, sendo o último facilitado por um processo de difusão. Hirasawa *et al.* (2001) aproveitaram esta propriedade das leveduras para aumentar o acúmulo de trealose pelo segundo mecanismo, melhorando a tolerância ao

congelamento. A tolerância das leveduras sensíveis ao congelamento foi marcadamente melhorada pelo encharcamento em trealose quando comparada com a das leveduras tolerantes. Eles concluíram, então, que o efeito da trealose dependerá da cepa de levedura e como as leveduras tolerantes ao frio já possuem uma membrana citoplasmática resistente ao congelamento, não apresentaram o efeito esperado.

Murakami *et al.* (1996) já tinham informado que a composição lipídica de leveduras comerciais tolerantes ao frio possuía uma maior fluidez da membrana citoplasmática, sugerindo que esta característica estava relacionada com a tolerância ao frio apresentada por estes microrganismos.

1.1.3.4. Prevenção ao efeito prejudicial do congelamento

O dano experimentado pelas leveduras de panificação pode ser reduzido até certo ponto omitindo ou minimizando o período de fermentação da massa antes do congelamento e mudando os níveis dos ingredientes na formulação (Hahn e Kawai, 1990; Salas-Mellado, 1992).

Para Casey e Foy (1995), o desenvolvimento de produtos de qualidade provenientes de massas congeladas precisa mais do que a seleção de uma cepa de leveduras resistente ao congelamento. Os processos relacionados com a fabricação de leveduras para panificação e as práticas envolvidas na produção de produtos de panificação congelados podem afetar o desempenho das leveduras nas massas congeladas. Os efeitos interativos das variáveis relacionadas com a levedura, a fabricação e a panificação devem ser considerados no desenvolvimento de estratégias que visem a melhoria do desempenho das leveduras das massas congeladas.

Torner *et al.* (1992), trabalhando com 5 marcas de leveduras prensadas comerciais congeladas a -18°C por 90 dias, descongeladas a 8°C e posteriormente avaliadas quanto à capacidade fermentativa, desempenho na panificação (qualidade tecnológica do pão) e atividades enzimáticas (maltase e invertase), concluíram que não houve alterações

significativas dos parâmetros avaliados, ou seja, todas as marcas de levedura prensada mantiveram suas características após o armazenamento sob congelamento durante o período estudado. Neyreneuf e Van Der Plaat (1991) concluíram que uma formulação com levedura prensada de “atividade reduzida” mostrou maior estabilidade que a “levedura rápida” num período de armazenamento de 90 dias, apesar da levedura rápida ter produzido uma quantidade levemente maior de CO₂ num período de 140 minutos.

Van Dam e Hille (1992) sugeriram a utilização de uma levedura osmotolerante em massas com altos conteúdos de açúcar para massas congeladas. Eles se apoiaram no fato de que o congelamento e o descongelamento envolvem a transição de estados com atividade de água extremamente baixa, onde seria promissor o uso desta cepa. Eles acrescentaram ainda que as cepas osmotolerantes que suportam 10 a 30% de açúcar (base farinha), conseguiram a regulação osmótica pelo acúmulo intracelular de solutos de baixo peso molecular como a trealose, o arabitol e o glicerol.

O trabalho de Neyreneuf e Delpuech (1993) sugere que os fenômenos decorrentes do uso das temperaturas de congelamento criogênico abaixo de -60°C e que afetaram a atividade fermentativa das leveduras, poderiam estar relacionados com a atividade termodinâmica da água e com a cristalização. Os autores observaram aumentos nos tempos de fermentação, o que poderia ser resultante de um estresse severo sobre as células de levedura dispersas na matriz da massa, envolvendo um aumento de pressão osmótica interna, com prejuízo da funcionalidade de suas membranas, afetando grandemente a viabilidade e a produção de gás destes microrganismos.

Por outro lado, Wang e Ponte (1995) testaram o efeito do glúten Vital, que é o produto que contém as proteínas da farinha de trigo após a remoção das substâncias solúveis e do amido, para fortalecer a estrutura da massa congelada. Esses pesquisadores estudaram o efeito de diferentes tipos de glúten Vital em massas congeladas estocadas por períodos longos (12 semanas). Eles concluíram que a perda de atividade das leveduras com a estocagem sob temperaturas de congelamento foi o principal fator que contribuiu com o prolongamento dos tempos de fermentação da massa. Ainda que o glúten adicionado à

massa tenha reduzido grandemente o tempo de fermentação quando comparado com a massa sem adição do mesmo, não reverteu totalmente o aumento progressivo dos tempos de fermentação causado principalmente pela perda de atividade das leveduras.

Outros autores, entre eles El-Hady *et al.* (1996) observaram que a produção total de gás pelas leveduras apresentou uma queda após congelamento e armazenamento sob congelamento de 1 e 7 dias em massas congeladas para pão processadas em diferentes condições. Estes pesquisadores demonstraram que a temperatura e a velocidade do ar das câmaras de congelamento afetaram de maneira diferenciada as leveduras e sua capacidade de produção de gás. Eles observaram ainda que a levedura seca instantânea ativa (IADY) teve um melhor desempenho do que a levedura prensada quando os volumes de gás produzidos nas massas não congeladas foram comparados com os volumes das massas que sofreram congelamento.

Para diminuir o efeito da morte celular, o usual é aumentar a dose de fermento até 50% do utilizado no processo convencional de panificação. Outro cuidado é não permitir a fermentação da massa antes do congelamento, pois as células de levedura tornam-se mais sensíveis à morte pelo frio quando se encontram na fase exponencial de crescimento. Este efeito pode ser diminuído congelando-se as massas logo após a modelagem e tendo o cuidado para que a temperatura no fim da etapa de mistura não exceda os $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

1.1.4. Aditivos e outros ingredientes

De Stefanis (1995), considerou que as massas congeladas são mais sensíveis aos ingredientes e às condições do processo sendo portanto, mais complexas que as massas convencionais. As leveduras não são o único elemento responsável por tal sucesso como convencionalmente se pensava. Os oxidantes do tipo melhoradores do pão exercem uma grande influência na estabilidade da massa durante o armazenamento congelado. A ação benéfica dos oxidantes nas massas congeladas foi demonstrada por muitos pesquisadores (Kline e Sugihara, 1968; Hsu *et al.*, 1979a; Varriano-Marston, 1980; Dubois e Blockolsky, 1986; Salas-Mellado, 1992).

1.1.4.1. Oxidantes

Os oxidantes, sejam de origem natural ou química, produzem o efeito melhorador na massa e na qualidade do produto. Um oxidante mostra seu efeito melhorador aumentando o volume do pão nos primeiros 5 minutos de cozimento (*oven-spring*). Em geral, o volume aumenta em proporção direta à concentração de oxidante, mas tem-se notado que as massas misturadas a temperaturas de 17 a 19 °C precisam de um nível maior de oxidante que as misturadas a 27 °C, para conseguir o mesmo volume do pão. Estes resultados sugerem que se precisa de um nível maior de oxidação à medida que a temperatura da massa na mistura diminui. As massas congeladas precisam níveis maiores de oxidação, o que está relacionado com o método de panificação, que no caso são métodos rápidos denominados *no-time*. Entre as substâncias oxidantes mais usadas em panificação temos o bromato de potássio ($KBrO_3$), o iodato de potássio (KIO_3), a azodicarbonamida (ADA) e o ácido ascórbico (AA). Estes oxidantes trabalham a velocidades diferentes: $KBrO_3$ é de ação lenta, ADA e KIO_3 de ação rápida, e AA de ação intermediária. As massas congeladas são preparadas e processadas sob condições especiais, como: temperaturas inferiores de mistura; valores menores de absorção de água da farinha; e podem ainda estar sujeitas a ciclos de congelamento/descongelamento, neste caso, deve ser considerada a velocidade de atuação do oxidante. O bromato em forma isolada não é muito eficiente, porém sua atividade é aumentada com a adição do ácido ascórbico, sugerindo uma ação sinérgica de ambas substâncias. O ácido ascórbico (vitamina C) é utilizado extensamente como um melhorador da massa, especialmente nos países onde o bromato não é permitido. O ácido ascórbico é tão eficiente como o bromato, porém mais eficiente que a ADA. As massas que contêm ácido ascórbico necessitam tempos de mistura levemente maiores que aqueles com bromato. O efeito melhorador do ácido ascórbico depende da farinha e do tipo de masseira. Padarias que utilizam masseiras com fluxo de ar restrito não são adequadas para este aditivo, já que pesquisas sugerem que a ação benéfica do ácido ascórbico está relacionada com a quantidade de oxigênio do ar que é absorvido durante a mistura da massa.

A influência da ação do ácido ascórbico e do estearoil lactilato de sódio (SSL) na microestrutura das massas congeladas e na qualidade do pão de massas submetidas à armazenagem sob congelamento de 3 meses e submetidas a ciclos de congelamento/descongelamento foi estudada por El-Hady *et al.* (1995). Eles observaram que o ácido ascórbico proporcionou principalmente maior firmeza à matriz do glúten e que o SSL permitiu a formação de membranas de glúten de paredes mais finas e com área maior. Além disto, eles constataram que o armazenamento de 3 meses da massa com aditivos não teve nenhuma influência perceptível na estrutura da massa, em comparação com um armazenamento curto. Por outro lado, foi constatado que os ciclos de congelamento/descongelamento produziram grandes modificações na massa, pelo rompimento das membranas da matriz do glúten pelas bolhas de gás, assim como a saída dos grânulos de amido para fora da matriz do glúten. A danificação foi menos pronunciada nas massas com aditivos que nas massas sem aditivos. Os pães elaborados com massas com uma combinação de 20 ppm de ácido ascórbico e 0,5% de SSL mostraram ainda após 3 meses de armazenagem uma qualidade aceitável, no entanto, os pães obtidos de massas congeladas sem aditivos mostraram uma qualidade inaceitável após 2 meses de armazenagem sob congelamento.

Nos últimos anos, Nemeth *et al.* (1996), estudando os efeitos dos ingredientes e das condições do processamento na qualidade do pão feito com massas congeladas, durante a armazenagem prolongada, concluíram que a remoção do ácido ascórbico (150 ppm base farinha) resultou em uma grande e significativa diminuição do volume e das notas das características tecnológicas do pão em todo o período de armazenagem estudado. Estes mesmos pesquisadores também comprovaram que a remoção dos condicionadores de massa SSL e DATEM (ésteres de ácido tartárico diacetilo de monoglicerídeos), juntamente com o ácido ascórbico, teve um efeito mais marcante na qualidade do pão que a remoção unicamente do ácido ascórbico. Por outro lado, a remoção de um (SSL: 0,375%) ou outro (DATEM: 0,6%) não teve um efeito significativo na qualidade do pão, indicando que estes condicionadores parecem ser igualmente efetivos nos níveis usados. Ambos condicionadores já foram usados em outras pesquisas e demonstraram ser melhoradores efetivos em massas congeladas (Marston, 1978; Davis, 1981; Wolt e D'Appolonia, 1984b).

1.1.4.2. Surfactantes/emulsificantes

Os surfactantes geralmente modificam as propriedades da massa e do pão. Estão divididos em duas categorias principais: amaciadores do miolo (p. ex.: monoglicéridos) e os reforçadores da massa (ex: mono e diglicéridos etoxilados, estearoil lactilato de sódio e de cálcio). Existem alguns compostos com ambas propriedades como o estearoil lactilato de sódio (SSL). Os reforçadores da massa são os mais adequados para uso em massas congeladas pois eles agem preferencialmente nas proteínas do glúten, que são as responsáveis pela força estrutural da massa que influi na estabilidade ao congelamento.

El-Hady *et al.* (1999) estudaram o efeito da adição de ácido ascórbico e/ou bromato de potássio como oxidantes e/ou estearoil 2-lactilato de sódio (SSL) como emulsificante, individualmente ou em forma de misturas, sobre as características reológicas e a qualidade de panificação de massas congeladas para pão. Eles observaram que a resistência máxima aumentou e a extensibilidade diminuiu nas massas contendo oxidantes, e que a situação oposta se apresentou quando oxidantes não foram usados ou quando se utilizou somente SSL. A altura da massa, medida com o reofermentômetro, foi aumentada pela adição de ácido ascórbico na formulação da massa comparada com aquelas sem ácido ascórbico ou as adicionadas com bromato de potássio e SSL individualmente. A adição de ácido ascórbico, individualmente ou misturado com bromato de potássio ou SSL, melhorou o escore final do pão, medido por avaliação sensorial.

1.1.4.3. Gorduras

Recomenda-se a adição de gordura em massas que serão congeladas em quantidades maiores do que as usadas normalmente. Utiliza-se entre 3 a 5 % de gordura, propiciando-se, assim, um aumento considerável do tempo de armazenamento das massas congeladas, resultando em pães com células internas menores, mais uniformes e finas, e uma textura mais suave e macia.

Inoue *et al.* (1995), trabalhando com o efeito de sistemas de gordura (*shortening*) nas propriedades reológicas de panificação de massas congeladas, concluíram que, comparando vários sistemas utilizados após 10 semanas de armazenamento sob congelamento, o sistema de emulsão óleo/água (O/W) foi associado com os menores tempos de fermentação final e os maiores volumes do pão. Os dois agentes de superfície, CSL (estearoil lactilato de cálcio) e DATEM melhoraram as propriedades de panificação das massas não congeladas, porém não melhoraram a estabilidade das massas durante o armazenamento à temperatura de congelamento. Os resultados demonstraram que a perda do potencial de panificação das massas congeladas durante o armazenamento, pode ser diminuída pela inclusão na massa de um sistema de gordura especialmente formulado para este tipo de produto.

1.1.4.4. Enzimas

As enzimas desempenham um papel chave entre os condicionadores da massa que estão disponíveis comercialmente. A maioria das enzimas usadas em panificação hidrolisam algum componente do cereal usado na elaboração do pão e, por esta razão, tais enzimas possuem certas limitações técnicas, devido aos efeitos negativos que podem ocorrer quando usadas em quantidades inadequadas, na maioria dos casos resultando em massas grudentas.

São ingredientes funcionais importantes nas massas fermentadas, afetando o processo e a qualidade dos produtos finais. As enzimas amilolíticas proporcionam a ação catalítica que converte o amido em açúcares fermentáveis, nutrientes essenciais para a fermentação das leveduras. Em vários países, as enzimas amilolíticas são adicionadas à farinha de trigo pelos moinhos. O uso de enzimas amilolíticas em massas congeladas é importante no que se refere a retenção de água na massa, melhoria na tolerância à fermentação da mesma, aumento no volume do pão e melhoria do gosto e aroma. As propriedades favoráveis foram atribuídas à capacidade das amilases de desdobrar parcialmente o amido da farinha, permitindo assim a incorporação de uma quantidade maior de água, que é retida de uma maneira mais homogênea na massa, reduzindo assim a

possibilidade de formar cristais de gelo grandes nas massas congeladas. As enzimas, tais como as presentes no malte e as alfa-amilases microbianas, têm sido amplamente usadas pela indústria de panificação por décadas para melhorar o processamento da massa e influenciar a qualidade final do pão (Diez Poza, 2002; Zounis *et al.*, 2002a)

A trans-glutaminase (TG) é uma enzima relativamente nova usada na elaboração de produtos de panificação. Sabe-se que durante a elaboração do pão, o desenvolvimento de uma rede de glúten estável durante a formação da massa é um pré-requisito para obter uma massa com extensibilidade boa e adequada capacidade de retenção de gás. Junto com o amido e as hemiceluloses, o glúten é responsável pelas propriedades da massa influenciando todo o processo de panificação até o produto final. A TG realiza sua ação formando ligações cruzadas entre as proteínas do glúten e, portanto, reforça o glúten, melhorando as propriedades reológicas da massa durante a elaboração do pão. A tecnologia de panificação moderna e a demanda crescente dos consumidores por qualidade e frescor precisam de novas técnicas de panificação (Diez Poza, 2002). Por isso, as massas são freqüentemente congeladas ou de fermentação retardada, de tal maneira que elas possam ser forneadas após ter sido armazenadas por horas, dias e semanas. Os preparados enzimáticos que contém TG melhoram a qualidade do pão quando usados no processo de massas congeladas e asseguram uma maior estabilidade aos ciclos de congelamento/descongelamento da rede de glúten da massa através da ação da formação de ligações cruzadas. A ligação cruzada estabiliza a estrutura do glúten deixando a rede mais forte e menos susceptível à danificação pelos cristais de gelo. A TG proporciona os mesmos benefícios no processo de massas retardadas no qual a massa “descansa” a temperaturas de refrigeração por várias horas antes que as últimas etapas do processo de panificação aconteçam. Preparados enzimáticos comerciais contém principalmente, combinações de TG, xilanases e/ou amilases em diferentes proporções e balanceadas para aplicações específicas.

1.2. PROCESSO

1.2.1. Métodos de panificação e mistura da massa

Na maioria das produções comerciais de massa congelada nos EUA, se utiliza o método de panificação denominado “*no time*”, altos níveis de levedura e congeladores de túnel para minimizar os efeitos deletérios do congelamento na qualidade da massa e do pão (Nemeth, 1996).

Os métodos de massa direta (Kenny *et al.*, 2001) ou *no-time*, assim como o processo de panificação *Chorleywood* (CBP) proporcionam os processos mais adequados para a produção de massas congeladas. O método esponja-massa também pode ser utilizado tomando-se o cuidado para que a fase esponja seja combinada com uma etapa de massa *no-time* (Cauvain, 1999).

Com a finalidade de obter uma massa congelada estável é necessário um adequado desenvolvimento do glúten pela mistura de uma massa mais rígida, devido à diminuição da absorção de água e à baixa temperatura. Misturadeiras de alta velocidade são adequadas a este propósito. A temperatura da massa após a mistura deve ser baixa suficiente para minimizar a fermentação antes do congelamento. Geralmente, uma temperatura da massa de 20° C após a mistura é recomendada se comparada com a de 27-30° C das massas convencionais. Conseqüentemente, é necessário o uso de água gelada, adição de gelo na massa ou um efetivo resfriamento da misturadeira por meio de jaqueta (Inoue e Bushuk, 1991). A adição tardia de leveduras com atividade reduzida durante a mistura tem sido recomendada para a preparação de massas congeladas (Neyreneuf e Van der Plaat, 1991; Dubois e Blockolsky, 1986).

Os produtos de panificação que utilizam frio na sua elaboração são produzidos mediante sistemas denominados *no-time* ou de massa direta (Sideleau, 1987), sendo que dois pontos importantes sobre este método devem ser enfatizados:

1. Usar masseira de alta velocidade com camisa refrigerada para manter a temperatura em torno de 18 a 21° C. Esta temperatura retarda a fermentação, produz uma massa plástica de fácil manipulação, induzindo a um congelamento mais rápido. O controle de temperatura da massa é crítico, por isso são necessários termômetros e indicadores de temperatura;
2. Assegurar o desenvolvimento ótimo do glúten durante a mistura, a fim de se obter uma boa retenção de gás na massa e evitar o relaxamento da mesma durante o descongelamento. Se o glúten não for bem desenvolvido nesta etapa, a massa ficará pegajosa, com ingredientes mal dispersados, resultando em pães com volume reduzido, aspecto ruim e estrutura grosseira do miolo.

Por outro lado, massas super desenvolvidas (*over-mixed*) são difíceis de manipular, pegajosas e pastosas, produzindo pães com falhas semelhantes aos das massas pouco desenvolvidas.

Vários fatores influem no tempo ótimo de mistura: a força da farinha, a temperatura da massa, os ingredientes, o tipo de masseira e a velocidade de mistura. Os métodos que utilizam a adição tardia do sal e de gordura, são preferidos porque reduzem o tempo de mistura e melhoram o desenvolvimento da massa e sua extensibilidade.

A fermentação da massa antes do congelamento, parece ser um dos fatores mais importantes que afetam a estabilidade das massas congeladas. Muitos pesquisadores acreditam que a fermentação de massa antes do congelamento é prejudicial à viabilidade das leveduras. Eles atribuem a maior estabilidade das massas não fermentadas à condição relativamente “dormente” das leveduras.

Alguns pesquisadores (Godkin e Cathcart, 1949; Merrit, 1960) demonstraram que a estabilidade das massas congeladas é inversamente proporcional ao tempo de fermentação antes do congelamento. Com mais de uma hora de fermentação, a estabilidade durante a armazenagem foi reduzida algumas semanas. Com ½ hora de fermentação, a estabilidade foi satisfatória por 3 a 4 meses; quando não houve fermentação, a massa manteve-se estável

por 12 meses, deixando claro que a formulação da massa, a mistura, o congelamento, a embalagem e as práticas de armazenamento foram adequadas. Por outro lado, a falta de fermentação da massa antes da divisão e moldagem dos pães impede a formação de ácidos orgânicos e esta carência é prejudicial ao equilíbrio biológico da massa, assim como à qualidade do pão, do ponto de vista do gosto e da conservação.

1.2.2. *Make-up* da massa

No preparo das massas congeladas, a etapa de mistura, junto com as subseqüentes operações mecânicas (divisão, boleamento, laminação e moldagem), é muito importante, provavelmente mais do que no processo convencional de produção de pão, pois somente nestas etapas acontece a formação e modificação do glúten. Ao contrário da panificação normal, não há outras oportunidades no processo de massas congeladas para corrigir qualquer defeito na reologia da massa por um novo trabalho mecânico (*reworking*) após o congelamento das mesmas. Por esta razão, as peças de massa obtidas após congelamento devem possuir propriedades reológicas ótimas, tais como força e extensibilidade, com um glúten totalmente desenvolvido. Estes fatores refletirão nos tempos de fermentação das massas e nas características de qualidade do produto final, principalmente volume específico, estrutura do grão do miolo, textura do miolo e aparência externa do pão.

Depois da mistura, a massa deve ser transferida imediatamente para os equipamentos onde serão realizadas as operações do *make-up* (divisão, boleamento e modelagem). Apesar das massas se apresentarem mais “firmes”, os tempos destinados a estas operações deverão ser suficientes para assegurar que a massa seja extensível para a laminação e modelagem adequadas.

Após a mistura, a massa é dividida em pedaços e boleada. Os pedaços de massa devem ser manipulados com um mínimo de descanso, para minimizar a atividade das leveduras. Normalmente, as massas boleadas descansam por 15 a 20 minutos, antes do *make up*. Sabe-se que as massas misturadas a baixas temperaturas precisam de um tempo de descanso menor. O efeito global é aumentar a estabilidade da massa congelada. No

entanto, a redução drástica da fermentação antes do *make up* fornece massas imaturas. Massas imaturas perdem as propriedades de retenção de gás e não podem expandir-se satisfatoriamente no forno (Inoue e Bushuk, 1991).

Neyreneuf e Van der Plaat (1991) estudaram os efeitos de temperatura da massa na produção de pão francês. Os resultados obtidos mostraram que uma temperatura de 18° C não produziu uma massa com adequada capacidade de retenção de gás. O efeito dos oxidantes adicionados à massa e a produção de CO₂ pelas leveduras sobre a estrutura do glúten, que ocorre durante a fermentação, proporcionou massas com ótimas propriedades de retenção de gás. Concordando com isto, quando se utiliza uma pré-fermentação excessivamente reduzida com a finalidade de obter uma massa congelada altamente estável, deve se usar outros meios para compensar a abreviada maturidade da massa. Os mesmos autores, citados por Inoue e Bushuk (1996), com a finalidade de compensar este efeito, laminaram e formataram a massa fria por 3 vezes, não afetando grandemente a temperatura, mas conseguindo um aumento de 370 cm³ no volume final do pão, feito com massa de 450 g.

As operações de *make up* devem ser feitas enquanto a massa se apresenta firme, com a finalidade de contrabalançar o enfraquecimento da massa que ocorrerá durante o congelamento, armazenamento e descongelamento. A temperatura para realizar o *make up* deve ser suficientemente baixa para minimizar a fermentação.

Kenny *et al.* (2001), trabalhando com metodologia de superfície de resposta para pesquisar os efeitos das condições de processamento na qualidade e estabilidade da massa congelada, concluíram que a temperatura da massa após a mistura não deve exceder os 22° C. Eles também informaram que as massas misturadas na faixa de 15 a 20° C apresentaram um desempenho ruim na panificação. A explicação para este fato seria que as massas ficaram pouco desenvolvidas. Quando estes pesquisadores compararam temperatura da massa, tempo de descanso e tempo de descongelamento, a temperatura da massa foi a que apresentou o maior efeito na qualidade das massas congeladas. Eles estudaram também o efeito do tempo de descanso das massas chegando à conclusão que tempos curtos de 5 a

15 minutos foram benéficos para o desenvolvimento da massa, no entanto, tempos longos de descanso de até 45 minutos reduziram a qualidade global da massa congelada após 20 semanas de armazenamento.

1.2.3. Congelamento

Um dos efeitos do congelamento é fixar as dimensões da peça de massa podendo ser necessário uma série de ajustes no moldador, para assegurar que as peças de massa ficarão bem ajustadas em moldes ou bandejas antes de congelar. As peças de massa devem ser transferidas à unidade congeladora tão rápido quanto possível após a moldagem final, para reduzir a atividade gaseificante e a vulnerabilidade das leveduras. A operação de congelamento também deve ser realizada tão rápido quanto possível para inibir a atividade da levedura (Cauvain, 1999).

As peças moldadas de massa devem ser congeladas lentamente para manter as propriedades de produção de gás, porém o processo deve ser suficientemente rápido para manter as propriedades de retenção de gás. Geralmente, a taxa de resfriamento de uma massa de 20 até -10°C no centro, deve ser de 0,3 a 1,2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (Lehmann e Dreese, 1981; Neyreneuf e Delpuech, 1993). Como os tempos de congelamento regulam a produção das massas congeladas, se usa uma velocidade de resfriamento o mais alta possível (Inoue e Bushuk, 1991). As peças de massa devem ser congeladas imediatamente após as operações do *make-up* quando se deseja uma vida útil de 8 a 12 semanas, tempo utilizado comumente em operações industriais.

As velocidades de congelamento dependem de vários fatores, sendo os mais importantes:

- tamanho da peça de massa (peso);
- geometria da peça de massa (diâmetro);
- ingredientes;
- embalagem;

- condições de congelamento (temperatura e movimento do ar).

A velocidade de congelamento não afeta somente a estrutura celular, como também determina a quantidade de células que sobreviverão. Para assegurar uma redução rápida e uniforme da temperatura, as massas colocadas em bandejas perfuradas devem ser colocadas dentro do congelador em camada única, reduzindo a temperatura central até -15°C . Uma vez que as temperaturas inferiores a -15°C tenham sido atingidas, as massas estarão mecanicamente sólidas, mas ainda deverão ser manipuladas com cuidado (Brümmer, 1995).

As mudanças que acontecem com as massas que contém fermento durante o congelamento são, em sua maioria, relacionadas ao tamanho da peça de massa e à temperatura na qual ocorre o congelamento. Peças de massa com raio grande demoram mais para atingir a temperatura central do que aquelas com raios pequenos. Há uma relação direta entre as velocidades de congelamento e o tamanho das peças de massa. Além de afetar a velocidade de congelamento, o raio da peça de massa também influenciará o diferencial de temperatura que se estabelece entre a superfície e o centro; as peças com grandes raios se resfriarão com um diferencial de temperatura maior que aquelas com raios menores. Uma peça de 460 g de massa de forma cilíndrica leva o dobro (80 minutos) para atingir a temperatura de -5°C no centro, do que na superfície da bisnaga (40 minutos). Em peças com raios grandes, a temperatura no centro permanece relativamente alta por longos períodos, o que permite que ocorra uma considerável produção de gás (Cauvain, 1999).

O congelamento de peças pequenas de massa reduzirá consideravelmente não só as atividades fermentativas, como também os processos enzimáticos, microbiológicos e oxidativos. É aconselhável também que seja mantida uma alta capacidade de reativação das leveduras. Para conseguir isso, a temperatura central das peças de massa deverá ser inferior a -10°C . Como nesta condição existe uma porcentagem alta de água livre, recomenda-se trabalhar com temperaturas de -15 a -18°C no centro das massas, principalmente para armazenagem de longa duração (Brümmer, 1995).

A determinação das condições ótimas para o congelamento da massa é o equilíbrio entre otimizar a viabilidade das leveduras e minimizar o dano à estrutura da massa. Como

exemplo, muitas pesquisas científicas tem demonstrado que o congelamento lento a -20°C é melhor para a sobrevivência das leveduras do que o congelamento a -40°C . Por outro lado, sabe-se que os congelamentos lentos aumentam os problemas de enfraquecimento da massa e tempos de fermentação prolongados.

1.2.3.3. Efeito das condições de congelamento na estabilidade da massa congelada.

1.2.3.3.1. Efeito da velocidade e da temperatura de congelamento

O congelamento rápido é geralmente recomendado para alimentos com a finalidade de minimizar o dano devido à cristalização do gelo. Contudo, isto parece não se aplicar às massas congeladas onde o congelamento rápido parece ter um efeito prejudicial na atividade das leveduras (Hsu *et al.*, 1979b; Neyreneuf e Delpuech, 1993). Este efeito foi mostrado claramente no trabalho de Neyreneuf e Delpuech (1993). A atividade das leveduras decresceu significativamente quando a velocidade de resfriamento aumentou de 0,978 para 1,565 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Apesar das causas do efeito prejudicial do congelamento rápido não estar totalmente claras, a explicação postulada por Mazur (1963) parece plausível. Segundo este pesquisador, durante o resfriamento rápido, a formação de cristais de gelo intracelular é invariavelmente letal para as membranas celulares das leveduras. Durante o congelamento lento, a água intracelular super resfriada pode ser transferida aos cristais de gelo externos, devido à diferença de pressão de vapor.

Neyreneuf e Nitsche (1989) informaram que na literatura encontram-se opiniões diferentes de como obter ótimos resultados na operação de congelamento, já que alguns especialistas recomendam o congelamento rápido, enquanto outros o congelamento lento para as peças de massa e que os termos rápido e lento tem sido usados arbitrariamente para efeitos comparativos. Eles sugerem que termos como rápido e lento deveriam ser eliminados e que deveriam ser apresentadas informações precisas com relação à composição da massa, tamanho das peças, temperatura dos congeladores e velocidades de congelamento no centro da massa.

Hsu *et al.* (1979b) informaram que a temperatura final de congelamento também afeta a atividade das leveduras nas massas congeladas após o congelamento. As massas que foram congeladas a -35°C ou temperaturas inferiores deram resultados piores, independentemente das velocidades de congelamento. Em panificação, as massas são normalmente congeladas de -20 a -30°C .

Bender e Lamb (1977) estudaram o efeito da velocidade de congelamento e da temperatura de estocagem na atividade gaseificante das leveduras em massas descongeladas. Eles relataram que o aumento da velocidade de congelamento de 0,05 para 0,5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ causou uma redução na atividade das leveduras durante o armazenamento.

Hsu *et al.* (1979b) informaram que congelar a diferentes temperaturas causou diferentes níveis de danos às leveduras. A velocidade de congelamento aparentemente foi responsável pelo dano, porém outros dois fatores poderiam afetar os resultados: a menor temperatura atingida ou a mudança de temperatura do congelador na câmara de armazenamento. Os mesmos autores também afirmaram que o congelamento lento da massa a -20°C foi melhor que o congelamento a -40°C .

Neyreneuf e Van der Plaat (1991) estudaram a velocidade de congelamento a -34°C em túnel de congelamento por 20 minutos após a mistura de peças de massa de 350 g. Eles encontraram que a temperatura da massa diminuiu 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ durante a etapa de refrigeração (de $+20$ a $+2^{\circ}\text{C}$) até as zonas de sub-resfriamento (de -6 a -30°C). As velocidades de congelamento dentro da zona de congelamento (de $+2$ a -6°C) e a temperatura de armazenamento de -20°C , foram adequadas para descrever o processo como de congelamento intenso (*deep frozen*).

O método de congelamento de massas a -20°C com velocidade de ar de 3 m/s utilizado por El-Hady *et al.* (1996), mostrou-se mais adequado quando a produção de gás pelas leveduras e as características tecnológicas do pão foram medidas em massas congeladas a diferentes temperaturas (-30 , -20 , e -10°C) e diferentes velocidades de ar da câmara de congelamento (1 e 3 m/s).

Neyreneuf e Delpuech (1993) compararam o congelamento mecânico convencional a -40°C com congelamento criogênico e temperaturas do ar da câmara de -40 a -120°C ; eles concluíram que o congelamento criogênico a -60°C atingiu os melhores resultados em termos de volume do pão após três meses de armazenamento sob congelamento. Eles também observaram que velocidades de congelamento criogênico de 0,797 e 0,918 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ não afetaram a qualidade do pão quando foram comparadas à velocidade de 0,348 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ no congelador mecânico. Velocidades superiores de congelamento produziram uma queda gradual do volume do pão, resultando em uma redução de até 49 % do volume do pão comparado com a massa não congelada. Eles consideraram, portanto, que selecionando o congelamento criogênico em condições estritamente controladas, consegue-se um ganho em produtividade (diminuição do tempo de congelamento de 66 minutos e 49 segundos) sem afetar o desempenho da panificação.

1.2.3.1. Equipamentos

Cinco tipos de congeladores podem ser usados na produção de massas congeladas:

1. Estático (*quiescent*)
2. Túnel
3. Contato
4. De impacto (*impingement*)
5. Criogênico

A velocidade de congelamento aumenta, do tipo estático até o criogênico, sendo que o túnel de ar forçado e o congelador por contato são os mais utilizados.

Cauvain (1979) também informou que o túnel de congelamento oferece o melhor compromisso entre a velocidade e as temperaturas de operação. Ele recomendou que nenhuma parte da massa ficasse sujeita a temperaturas menores de -35°C , para evitar danificação excessiva às células de levedura presentes na massa. Os congeladores do tipo

doméstico não são adequados para produzir grandes quantidades de massa congelada devido às velocidades de congelamento muito baixas, menores que $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, o que pode permitir muita produção de gás nas primeiras etapas do resfriamento com uma perda subsequente na qualidade do produto. A velocidade muito baixa, que é conseguida na maioria dos retardadores/fermentadores, inviabiliza seu uso para produzir peças de massa ultracongeladas, exceto para produtos com um raio pequeno, como o pão francês de 50 g. Ele ainda enfatizou que em um túnel de congelamento típico, as variações na velocidade do ar, tem efeitos desprezíveis no desempenho da massa e na qualidade do pão.

Na indústria de congelados, a proteção contra os efeitos do congelamento na viabilidade celular das leveduras é o principal foco de atenção. Para isto, o congelamento lento em congelador convencional é o preferido tecnologicamente em lugar do uso do criogênico, que proporciona um resfriamento muito mais rápido, mas que pode ser prejudicial à sobrevivência das leveduras na massa.

O peso e a forma das massas moldadas afetam as velocidades de congelamento. Uma peça menor de massa congela mais rápido que uma maior quando se aplicam as mesmas condições de congelamento. De acordo com isto, a temperatura, a velocidade de transporte e o fluxo de gás ou ar do congelador devem ser ajustados para cada tipo de produto. As peças de massa são normalmente congeladas até que a temperatura central estiver abaixo da temperatura de congelamento, geralmente de -10 a -15°C (El-Hady *et al.*, 1996).

O ponto de congelamento da água na massa não é 0°C ; o ponto de congelamento das massas, feitas somente com farinha e água somente é de aproximadamente -4°C . As massas para pães que contêm gordura, açúcar, sal e fermento possuem um ponto de congelamento na faixa de -7 a -9°C (Brümmer, 1995).

1.3. EMBALAGEM

A perda de umidade é um dos fatores responsáveis pela perda de qualidade da massa congelada durante armazenamento a baixas temperaturas (Klein, 1971a e 1971b). Para conservar as massas congeladas, devem ser usadas embalagens com características de impermeabilidade à água e ao oxigênio, flexibilidade, resistência a baixas temperaturas e facilidade de solda.

Diversos tipos de embalagem servem de barreiras à umidade, como o polietileno, mistura de ceras, verniz e folhas laminadas.

As embalagens para massas congeladas devem ser suficientemente resistentes para proteger contra choques mecânicos durante o manuseio. Indica-se o uso de polietileno de 45 a 70 mm de espessura ou polietileno recoberto com PVDV em massas de pão congeladas.

As peças de massas congeladas são embaladas em sacos de polietileno e acondicionadas em caixas de papelão. Os sacos de polietileno usados para massas congeladas devem possuir as seguintes características:

- Alta proteção à perda de umidade;
- Alta barreira ao oxigênio;
- Resistência física contra fragilidade e quebra por baixas temperaturas;
- Firmeza para ser trabalhados com maquinaria automática;
- Boa termoselabilidade.

As peças de massa congeladas e empacotadas devem ser estocadas em congelador a -20°C . A temperatura da massa se equilibrará gradualmente dentro da peça.

1.4. ARMAZENAMENTO SOB CONGELAMENTO

Durante a armazenagem a temperaturas de congelamento, acontecem processos enzimáticos e físicos que provocam mudanças na massa, sendo que as proteínas da massa e as células de levedura são particularmente afetadas. A influência no amido é menor, podendo ocorrer dano devido ao rompimento pela expansão da água, que se converte em gelo e penetra nos grânulos de amido durante o congelamento. A matriz do glúten muda principalmente com o aumento do tempo de armazenagem, mudanças que são maiores para grandes flutuações de temperatura de armazenagem e quando próximas ao ponto de congelamento da água. Deve se ter em mente que ainda a -15°C , uma quantidade significativa de água não está congelada, podendo participar de várias reações. Durante este período, reduz-se a incorporação do amido à matriz protéica. Os grânulos de amido, que na mistura são incluídos na matriz protéica, podem separar-se dela devido a severas condições do processo de congelamento e formação de cristais de gelo aumentados pelo período de armazenagem. Outra característica que fica alterada é a extensibilidade da massa, que fica reduzida, como resposta à menor pressão, pela menor produção de CO_2 pelas leveduras, porém as massas retém bem o gás formado, como foi demonstrado em estudos utilizando o reofermentômetro. Mudanças no desempenho das massas congeladas acontecem com o aumento do tempo de armazenagem, sendo o mais óbvio de todos o aumento dos tempos de fermentação final (*proofing*) e uma progressiva perda do volume de pão. Ainda, quando armazenadas a -20°C , as peças de massa congeladas são capazes de perder água e por isso elas devem ser embaladas em sacos de polietileno ou caixas cobertas com polietileno antes de ser transferidas ao congelador de armazenagem (Brümmer, 1990).

As condições de armazenagem devem ser as mais estáveis possíveis, evitando flutuações de temperatura. Durante a armazenagem, a embalagem dos produtos com materiais sintéticos, sacos ou *containers*, são recomendados para prevenir a desidratação da superfície provocada pelo congelamento e pelas altas velocidades do ar. A embalagem é recomendada, ainda, para períodos curtos de armazenagem, principalmente quando os congeladores são abertos com frequência, causando flutuações de temperatura. Devem ser mantidas condições ótimas durante a armazenagem e o transporte, principalmente se as massas terão um armazenagem adicional após sua distribuição (Brümmer, 1990).

Reed (1991) informou que as massas congeladas se deterioram durante a estocagem sob congelamento. Os tempos de *proofing* aumentam, o volume do pão diminui, o grão fica grosseiro e a textura piora. Estas mudanças são causadas definitivamente pela perda do poder gaseificante das leveduras, o que pode ser facilmente comprovado pela determinação quantitativa da taxa de produção de CO₂ das peças de massa descongelada. Muitos autores têm informado, também, uma mudança na reologia das massas, sendo que massas descongeladas e remoldadas têm apresentado melhor volume dos pães do que as não remoldadas antes da fermentação. Segundo Bruinsma e Giesenschlag (1984), a remoldagem das massas após o descongelamento, melhorou grandemente a estrutura do miolo, porém resultados contraditórios também tem sido apresentados.

Durante a estocagem das massas congeladas, a atividade das leveduras diminui gradualmente (Kline e Sugihara, 1968; Tanaka, 1981). A perda da atividade das leveduras pode ser medida diretamente, determinando-se o número de células viáveis de levedura, e indiretamente, pelo poder gaseificante das massas descongeladas ou o tempo de fermentação final (*proofing*) requerido para que a massa atinja uma altura específica.

O mecanismo de perda de atividade das leveduras durante o armazenamento congelado e o descongelamento não está ainda totalmente compreendido. Contudo, acredita-se que a maior causa da perda de atividade é a interrupção da membrana das leveduras pelos cristais de gelo e pela difusão da água intracelular quando a atividade de água (A_w) fora da célula da levedura diminui com o congelamento. Recentemente, tem-se desenvolvido novas cepas de levedura, com uma tolerância ao congelamento consideravelmente maior.

Neyreneuf e Nitsche (1989) estabeleceram que o efeito do armazenamento sob congelamento nas células de levedura é devido à mudança na estabilidade dos poros e à composição dos ácidos graxos na membrana das células da levedura. Os fosfolipídios (F) e os esteróis livres (E) são afetados. Uma proporção alta de F/E parece ser favorável. Os lipídios polares, especialmente os galactosil lipídios, parecem diminuir durante o

armazenamento congelado, o que não afeta somente a extensibilidade da massa mas também reduz a funcionalidade do glúten de trigo (Brümmer, 1995).

1.5. DESCONGELAMENTO E FORNEAMENTO

Os perfis de temperatura da massa durante o descongelamento são similares, mas de maneira inversa àqueles que acontecem durante o congelamento. Assim, como acontece no congelamento, haverá um diferencial de temperatura entre a superfície e o centro da massa, enquanto ela descongela. As diferenças de temperatura podem ser minimizadas pelo descongelamento gradual a temperaturas mais moderadas e sob condições controladas. Os retardadores/fermentadores oferecem um meio adequado para aumentar gradualmente a temperatura das peças de massa e para minimizar os diferenciais de temperatura entre elas. No entanto, os retardadores são projetados somente para massas frias e serão inadequados para descongelar quando estiverem carregados com massa congelada, a não ser que se incorpore um meio de aquecimento que proporcione calor. O descongelamento das massas realiza-se normalmente em condições lentas a temperaturas de refrigeração ou em câmaras de fermentação que trabalham em torno de 30° C. Poucos trabalhos tem utilizado o forno de microondas para realizar esta operação. Para conseguir uma boa qualidade em pães pequenos, obtidos de massas que não sofreram fermentação antes do congelamento, é ideal que as temperaturas centrais após o descongelamento estejam em torno de 25° C ou, pelo menos, 15° C como mínimo. O aumento de temperatura no centro da massa deve ser uniforme, nem muito lento nem muito rápido, pois se a temperatura aumenta rapidamente, as regiões externas da massa começarão a fermentar enquanto que no centro, a temperatura ainda estará baixa (Cauvain, 1999).

Um aumento de temperatura em forma contínua assegura uma qualidade uniforme. A temperatura central deverá aumentar de -5 a +5° C em menos de uma hora. As massas, normalmente, estão mais frias que o ar circundante, por isso a água condensa na sua superfície. Quanto maior a diferença de temperatura entre a massa e o ar, mais úmida ficará a superfície da massa. Massas muito úmidas são pegajosas, de difícil manipulação, e massas muito secas afetam as características da crosta, produzindo pães com volume

menor. Um método de descongelamento que parece apropriado consiste em descongelar primeiro e logo fermentar as massas moldadas. Durante a primeira etapa, as massas passam da câmara de armazenamento, regulada a -18°C para um local frio a -1 ou 0°C , evitando o problema de condensação da água na superfície. Na última etapa, a massa é aquecida de -1 a 20°C até a fermentação final, obtendo-se um crescimento mais homogêneo. Aconselha-se proteger as massas contra a dessecação e o risco de endurecimento da sua superfície (Cauvain, 1999).

Kenny *et al.* (2001) estudaram o efeito do tempo de descongelamento das massas num período de 3,75 até 8,25 horas. Eles concluíram que tempos de descongelamento de 7 a 8 horas obtiveram os melhores resultados na estabilidade das massas, usando o método de aumento de temperatura por etapas. Para descongelar e fermentar as massas utilizou-se um retardador/fermentador (Koma BV, Rosemard, The Netherlands) com programa de acondicionamento da massa. A temperatura no início do programa foi de -10°C , para evitar rachaduras da superfície da massa. A seguir, aumentou-se para 2°C e manteve-se assim até começar a descongelar. Considerou-se o tempo de descongelamento, o período em que a temperatura aumentou de 2 até 25°C a 75 % de umidade relativa, deixando as massas fermentar até uma altura pré-fixada.

No caso da produção direta de pães, a utilização de fornos com movimentação de ar, tem dado bons resultados, porque proporcionam condições adequadas e desejáveis nas características da crosta. Tempos normais de forneamento de 20 minutos com temperaturas menores (10 a 20°C menos que o usual) com injeção de vapor no início do cozimento, produzem produtos de boa qualidade. Isto reduz as características indesejáveis devido à superfície fria da massa. Existem fornos especiais para finalizar a produção de pães a partir de massas com ou sem pré-fermentação, que iniciam primeiramente o descongelamento das massas com uma temperatura basal de 110 a 140°C , com injeção de vapor de 10 a 20 impulsos por minuto, atingindo 0°C no centro da massa no fim de um período de 6 a 8 minutos. A temperatura do forno continua aumentando uniformemente, completando o cozimento a temperaturas de 170 a 190°C , num período total que inclui descongelamento e cozimento de 24 a 28 minutos (Brümmer, 1995).

1.6. EFEITO DO CONGELAMENTO NA PROPRIEDADE DE RETENÇÃO DE GÁS DAS MASSAS

Está bem estabelecido que as massas congeladas, submetidas a armazenamento, sofrem perda gradual da qualidade que se atribui à perda de retenção de gás. Esta mudança tem sido explicada, inicialmente, pela perda de compostos redutores (principalmente glutatona) das células de levedura, o que causaria um enfraquecimento na rede de glúten pela ruptura das ligações cruzadas de dissulfeto (Kline e Sugihara, 1968; Hsu *et al.*, 1979a). Uma hipótese alternativa, proposta por vários pesquisadores (Autio e Sinda, 1992; Varriano-Marston *et al.*, 1980; Wolt e D'Appolonia, 1984a) sugere que a rede de glúten se deteriora, devido ao processo de congelamento. A causa desta mudança direta é explicada pela interrupção de certas ligações no glúten, devido à ação mecânica dos cristais de gelo.

Uma técnica de microscopia eletrônica de varredura a baixa temperatura usada por Berglund *et al.* (1991) revelou que a rede de glúten da massa é danificada durante o armazenamento sob congelamento, reduzindo sua capacidade de retenção de gás. O estudo reológico de Autio e Sinda (1992) mostrou uma diminuição no módulo de perda (G') e um aumento da tangente δ , e diminuição, tanto do módulo de relaxamento (G_{rel}) como da vida média de relaxamento na massa congelada. Estas mudanças indicaram uma perda de ligação cruzada do polímero e um enfraquecimento da rede de glúten. A adição de células de leveduras mortas à massa não afetou as propriedades reológicas, indicando que as mudanças estruturais nas massas congeladas e, posteriormente, descongeladas não estão associadas à liberação de substâncias redutoras das células de levedura. Portanto, uma farinha de boa qualidade, que pode desenvolver uma rede de glúten forte, é muito importante na produção de massas congeladas de boa qualidade.

Enquanto estudavam as mudanças reológicas das massas congeladas após vários ciclos de congelamento/descongelamento, Inoue e Bushuk (1991, 1992) encontraram que a resistência máxima, medida no extensógrafo, diminuiu com o aumento dos ciclos de congelamento/descongelamento e se correlacionou positivamente com o volume do pão e negativamente com os tempos de fermentação. Eles encontraram que a diminuição do

poder gaseificante das leveduras nos ciclos de congelamento/descongelamento não foi significativa nem consistente com as mudanças observadas na resistência máxima da massa. Eles concluíram então, que as mudanças na ultraestrutura do glúten da massa foram devidas provavelmente à cristalização do gelo, o que enfraqueceu as propriedades reológicas da massa (Varriano-Marston, 1980; Inoue e Bushuk, 1992). Estes autores sugeriram que uma proteína de boa qualidade pode proporcionar força suficiente para diminuir os efeitos prejudiciais do congelamento na rede de glúten. A qualidade da farinha, logicamente, muda com a colheita de cada ano. A suplementação de farinhas relativamente fracas com glúten Vital para aumentar sua força em produtos congelados, seria uma medida prática que ajudaria a resolver problemas de qualidade da farinha. O glúten exógeno deveria transformar-se em parte integral do glúten da rede pela interação com o glúten endógeno da farinha durante a mistura da massa (Stenvert *et al.*, 1981).

1.7. MECANISMOS DAS MUDANÇAS NAS PROTEÍNAS INDUZIDAS PELO CONGELAMENTO

O congelamento é um processo físico que envolve a transformação das moléculas de água de um estado amorfo a outro altamente estruturado, de cristais de gelo. A mudança de fase pode levar à desnaturação protéica, causada por alterações no meio químico e físico das proteínas. As danificações nas proteínas induzidas pelo congelamento são mecânicas e químicas. Uma teoria convencionalmente aceita é que os danos envolvem três alterações principais no micro-ambiente da proteína: (1) mudanças na umidade, (2) mudanças nos lipídios, (3) mudanças em certos metabólitos celulares. De acordo com Shenouda (1980), as mudanças na umidade podem ser subdivididas como segue: (1) formação e crescimento dos cristais de gelo, (2) desidratação e (3) aumento na concentração dos solutos.

1.7.1. Dano mecânico

A formação de cristais de gelo, seja da água intra ou extracelular, pode resultar em dano mecânico causado por projeção irregular dos cristais de gelo através das paredes celulares, o que causa seu rompimento. O tamanho e localização dos cristais de gelo

formados durante o congelamento é influenciado, principalmente, pela velocidade de congelamento, pelo tempo de estocagem e flutuações de temperatura. A uma velocidade de congelamento lenta, o fluido exterior das células se resfria mais rapidamente do que o fluido interior e, à medida que o fluido extracelular super-resfriado atinge uma temperatura crítica, a água se separa do soluto e forma cristais de gelo. Conforme a cristalização prossegue, os sais extracelulares ficam mais concentrados, criando um gradiente de pressão osmótica através da membrana celular. Com a finalidade de equilibrar o potencial químico, a água intracelular sai, levando à desidratação e ao aumento da força iônica da célula. A saída da água do interior da célula congelará em cima dos cristais de gelo extracelulares existentes, provocando seu crescimento, distorcendo e danificando a membrana e as proteínas. Contrariamente, a uma velocidade de congelamento rápida, a água no interior das células congela tão rápido que os cristais pequenos de gelo, geralmente com forma de lanças e separados pelas proteínas, se formam dentro da célula. Portanto, ocorre menos desidratação e menos dano mecânico das proteínas (Love, 1968).

A energia livre de uma fase cristalina é minimizada quando sua estrutura é perfeita e seu tamanho é infinito. Então, termodinamicamente, um cristal pequeno de gelo é menos estável que um cristal grande de gelo. Durante o armazenamento sob congelamento, especialmente quando há flutuações de temperatura, os cristais de gelo podem sofrer mudanças metamórficas chamadas de recristalização. Em geral, cristais de gelo pequenos tendem a fundir, recristalizar ou agregar-se em cima de cristais maiores já existentes (núcleos) devido a diferenças na energia da superfície. Este fenômeno se observa freqüentemente em alimentos estocados a temperaturas próximas à zona de congelamento crítico (-0,8 a -5° C). Como a recristalização envolve aumento de tamanho, mudanças na forma e na orientação e movimento dos cristais de gelo, causam dano aos tecidos e aceleram a desnaturação protéica.

1.7.2. Desidratação

A desidratação causada pela formação de gelo pode levar à desnaturação protéica, que pode ser explicada em base termodinâmica. Em tecidos biológicos, onde a água é o

constituente celular mais abundante, as proteínas expostas a um meio aquoso têm um interior hidrófobo e uma superfície polar (a maioria dos resíduos de aminoácidos hidrófobos estão ocluídos no interior e a maioria das cadeias laterais carregadas ou polares tendem a estar para fora). Este arranjo estrutural é conduzido pela entropia, significando que facilita a hidratação das proteínas pela interação com moléculas de água via pontes de hidrogênio, diminuindo a energia livre total do sistema (Privalov e Makhatadze, 1993), como se expressa na equação:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

onde ΔG , ΔH e ΔS são mudanças na energia livre, na entalpia e na entropia, respectivamente. A perda de entropia envolvida na formação de uma estrutura protéica ordenada (dobrada) no seu estado hidratado e compensada por um grande ganho de entropia das moléculas de água que a rodeiam ($\Delta S > 0$), devido à minimização de interações entre grupos apolares das proteínas com a água. Isto resulta numa redução líquida da energia livre global ($\Delta G < 0$) e na estabilização das proteínas. Contudo, em um estado desidratado, as interações proteína/solvente são interrompidas e as moléculas protéicas ficam expostas a um meio essencialmente “orgânico” (menos polar que a água). Isto resultará numa maior exposição das cadeias laterais hidrófobas e segmentos da cadeia, e portanto, em mudanças na conformação protéica. Para manter o estado de energia livre o mais baixo possível ($\Delta G < 0$) até a migração da água para formar cristais de gelo, acontecerá um aumento das interações via as forças hidrófobas e iônicas, resultando em desnaturação adicional das proteínas e formação de agregados protéicos. As interações hidrófobas são geralmente enfraquecidas quando a temperatura decresce. Conseqüentemente, diminuindo a temperatura até valores de subcongelamento, as proteínas ficarão desestabilizadas, pois as estruturas nativas são mantidas pelas forças hidrófobas. Isto tem sido a base para que algumas teorias recentes ganhem força para explicar a desnaturação das proteínas, induzida pelo frio (Privalov *et al.*, 1986; Franks, 1995).

1.7.3. Concentração dos sais

A água nos tecidos biológicos, nas suspensões celulares ou nas soluções aquosas protéicas pode estar dividida nos tipos livre e ligada. Durante o congelamento a -10°C ou inferior, 10 % da água no tecido muscular pode permanecer não congelada e parcialmente “ligada” às proteínas ou a outros componentes celulares não aquosos (Lawrie, 1991). Contudo, a quantidade de água não congelável depende da concentração e do tipo de solutos, incluindo vários compostos iônicos ou sais. Assim, à medida que o congelamento progride, as proteínas são expostas a concentrações de sal cada vez maiores, e este processo pode teoricamente continuar até que seja atingida a temperatura eutética final (na qual todos os solutos também cristalizam). Devido ao fato que as interações eletrostáticas são uma das forças principais que mantêm as estruturas ternárias e quaternárias, um aumento abrupto da força iônica ou da concentração de sais na fase não congelada pode causar competição com as ligações eletrostáticas existentes, o que leva a uma extensiva modificação da estrutura nativa da proteína. A interrupção da conformação protéica nativa é favorável entrópica e energeticamente, resultando geralmente em desnaturação, dissociação de subunidades e, finalmente, agregação de moléculas desnaturadas. A extensão do dano da proteína é uma função do tipo de sais, da velocidade de congelamento, da temperatura e tempo de armazenamento e das características das proteínas envolvidas na interação.

1.7.4. Desnaturação das proteínas em massas congeladas

A qualidade de panificação das massas congeladas deteriora-se gradualmente durante a estocagem a baixas temperaturas e os ciclos de congelamento/descongelamento. Em conjunção a várias razões possíveis (diminuição da atividade das leveduras e, portanto, menos produção de gás, ou liberação de substâncias redutoras das células de leveduras mortas) as mudanças deletérias das proteínas do glúten parecem ser o principal fator (Inoue *et al.*, 1994). De fato, a microscopia de varredura eletrônica revelou destruição da rede de glúten das massas congeladas, provavelmente devida à formação de cristais de gelo (Berglund *et al.*, 1991). Eletroforeses realizadas sob condições não redutoras mostraram

claramente o desaparecimento de subunidades de glutenina e de oligômeros na massa sujeita a repetidos congelamentos e descongelamentos, sugerindo que a estrutura da glutenina foi alterada por estes ciclos (Inoue *et al.*, 1994). A estocagem a -20°C por 70 dias aumentou levemente a porcentagem de proteínas solúveis em etanol (gliadina), no entanto, 3 ciclos de congelamento/descongelamento aumentaram a proporção de proteínas hidrossolúveis (albumina) e proteínas solúveis em ácido (glutenina).

1.7.5. Modificações da microestrutura da massa devidas ao congelamento

Zounis *et al.* (2002b), trabalhando com massas congeladas para pão, estudaram o efeito da temperatura final da massa após mistura na estabilidade da massa e na qualidade do pão. Eles misturaram massas até temperaturas finais de 16°C e 31°C , porém, ambas misturadas até o total desenvolvimento do glúten. A estrutura da massa foi examinada mediante microscopia eletrônica de varredura a baixa temperatura. O objetivo foi comparar a microestrutura da massa totalmente desenvolvida a 16°C , que é a temperatura usada na produção de massas congeladas, com uma massa a 31°C , que é a normalmente usada na produção de pão comum. As massas foram congeladas a -35°C por 50 minutos e estocadas a -20°C por 14 semanas. Foram realizadas observações microscópicas em diferentes tempos, logo após a mistura, com 10 minutos de descanso, após 1 dia do congelamento e após 14 semanas de estocagem a -20°C . Estas observações permitiram concluir que o nível mais alto de ativação das leveduras na massa misturada com uma temperatura de 31°C não causou direta ou indiretamente maior dano à estrutura do glúten que à massa misturada até 16°C . Logo após a mistura, a massa apresentava-se densa, com pequenas células de gás em ambos casos, após 10 minutos de descanso, a massa misturada a 16°C apresentava-se ainda densa com células de gás maiores, e a de 31°C com um aumento marcante das células de gás. Após 1 dia de congelamento e estocagem, ambas estruturas de massa apresentavam-se semelhantes, com uma distribuição homogênea de pequenos cristais de gelo. Após 14 semanas de estocagem sob congelamento, a estrutura permanecia quase inalterada, só com um leve aumento do tamanho dos cristais de gelo e diminuição do número de cristais. Isso indicou que o nível mais alto de ativação das leveduras nas massas misturadas com uma

temperatura final de 31° C não causou dano à estrutura do glúten quando comparada com a massa misturada a 16° C.

Quando foi medido o poder gaseificante e o volume dos pães, após 14 semanas de estocagem congelada, a massa misturada a 16° C apresentou maior poder gaseificante e pães com volume maior que a massa misturada a 31° C. Os resultados desta experiência permitiu aos autores concluir que, não houve grande diferenças na microestrutura das massas misturadas a temperaturas diferentes, e que as diferenças principais foram no poder gaseificante e no volume e escore do pão. Eles concluíram então que, o fator mais importante e que contribui para a perda da qualidade das massas congeladas, foi a perda do poder gaseificante que foi maior na massa misturada até uma temperatura final de 31° C, quando comparada com a massa misturada a 16° C.

Zounis *et al.* (2002a) usaram microscopia LT-SEM para pesquisar as mudanças que acontecem com as massas a temperaturas abaixo de 0° C, nas massas estocadas a -20° C e nas massas submetidas a ciclos de congelamento/descongelamento de -20 a -10° C, com fermento e sem fermento para separar as funções de fusão do gelo e posterior recristalização (retenção de gás) e da atividade das leveduras (produção de gás). Eles usaram microscopia LT-SEM em massas em estado totalmente hidratado. Os espaços arredondados corresponderam a bolhas de CO₂ e os espaços angulosos a cristais de gelo. Na massa recém-misturada, a estrutura apresentava-se muito densa com poucos espaços esféricos e os grânulos de amido firmemente embebidos na matriz protéica do glúten. Na massa congelada a -20° C e após 1 dia de estocagem, observou-se uma estrutura porosa, com espaços de forma esférica devido à fermentação das leveduras durante o tempo de descanso e com espaços de forma angulosa criados pela formação de cristais de gelo durante o congelamento. A estrutura da massa ainda se apresentava contínua com grânulos de amido embebidos na matriz protéica.

Na massa estocada durante 14 semanas a -20° C, observou-se um crescimento do tamanho dos espaços angulosos devido ao crescimento dos cristais de gelo durante a estocagem. Na massa submetida a ciclos de congelamento/descongelamento, a

microestrutura apresentou-se menos contínua e o tamanho dos espaços angulosos menos uniforme, com alguns buracos muito grandes. Na massa estocada a -10°C por 14 semanas, o glúten apresentou-se tensionado e com aparecimento de espaços grandes e localizados, devido provavelmente à migração de água ou à maior atividade de leveduras nesta condição de temperatura.

A maior desagregação da estrutura da massa em condições de armazenamento “não ideais” (-10°C) ou sob ciclos de temperatura é consistente com o crescimento dos cristais de gelo nos produtos alimentícios congelados.

Quando as massas foram observadas com tempos maiores de estocagem congelada, 27 semanas a -20°C , verificou-se maior desagregação com a formação de um grande número de grandes espaços angulares. Esta formação poderia representar as “poças de gelo” observadas por Berghund *et al.*(1991) em amostras com um período de estocagem de 24 semanas.

Uma observação interessante quando compararam à microestrutura das massas congeladas com e sem leveduras foi que houve dificuldade para diferenciar entre células de levedura e amido, porém, a observação mais interessante, neste caso, foi que a massa congelada sem levedura não mostrou mudanças na sua microestrutura após congelamento e estocagem congelada, exceto pela leve diminuição dos espaços angulares e o aumento do tamanho de alguns deles. Esta é uma evidência de que estes espaços vazios representam recristalização de gelo.

Também observaram uma leve atividade de leveduras na massa estocada a -20°C , ela apresentava espaços vazios levemente maiores que a massa congelada sem levedura, acreditando ser o aumento dos espaços devido à leve fermentação pelas leveduras nessa temperatura.

1.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUTIO, K.; SINDA, E. Frozen doughs rheological changes and yeast viability. **Cereal Chemistry**, **69**: 409-413. 1992.
- BAKER, J. C.; PARKER, H. K.; MIZE, M. D. The distribution of water in dough. **Cereal Chemistry**, **23**: 30-38. 1946.
- BENDER, L. D.; LAMB, J. The preservation of yeast viability in frozen dough. **Journal of Food Science & Technology**, **28**: 952-953, 1977.
- BROWN, M. H. Microbial aspects of frozen foods. Cap. 2. In: **Food freezing: Today and tomorrow**. Bald, W. B. Springer Verlag. 1991.
- BERGLUND, P. T.; SHELTON, D. R.; FREEMAN, T. P. Frozen bread dough ultrastructure as affected by duration of frozen storage and freeze-thaw cycles. **Cereal Chemistry**, **68**: 105-107, 1991.
- BRUINSMA, B. L.; GIESENLSCHLAG, J. Frozen dough performance: Compressed yeast, instant dry yeast. **Baker's Digest**, **58** (6): 6-7,11, 1984.
- BRÜMMER, J. M. Chilling and deep freezing of baked foods in the Federal Republic of Germany. In: **Chilled foods: The state of art**. Elsevier Applied Science Pub. 1990.
- BRÜMMER, J. M. Bread and rolls from frozen doughs in Europe. In: **Frozen and refrigerated doughs and batters**. Ed. Kulp, K.; Lorenz, K.; Brümmer, J. AACC Inc. 1995.
- BUSHUK, W.; MEHROTRA, V. K. Studies of water binding by differential thermal analysis. II Dough studies using the melting mode. **Cereal Chemistry**, **54**: 320-325. 1977.
- CAETANO, C. Tecnologia de congelamento: Como, onde, quando e por quê aplicar? Palestra técnica. **Padaria 2000**, **36**: 32-42. 1999.
- CASEY, G. P.; FOY, J. J. Yeast performance in frozen doughs and strategies for improvement. Cap. 2. In: **Frozen & refrigerated doughs and batters**. Editado por Kulp, K.; Lorenz, K., Brümmer, J. A.A.C.C., St. Paul. 1995.
- CAUVAIN, S. P. Frozen bread dough. **FMBRA Report No 84**, CCFRA, Chipping Campden, U. K. 1979.

- CAUVAIN, S. P. Dough retarding and freezing. Cap. 6. In: **Technology of breadmaking**. Editado por Cauvain, S. P. e Young, S. L. Aspen Publication. 1999.
- CLEGG, J. S.; SEITZ, P.; HAZENWOOD, C. F. Cellular response to extreme water loss. **Cryobiology**, **19** : 306-316. 1982.
- DAVIES, R. J.; WEBB, T. Methods, apparatus: New product research, process development and design. **Chemical Industry**, **16**: 1138-1139. 1969.
- DAVIS, E. W. Shelf-life studies on frozen doughs. **Baker's Digest**, **55** (3): 12-13, 16. 1981.
- De STEFANIS, V. A. Functional role of microingredients in frozen doughs. Cap. 5. In: **Frozen & refrigerated doughs and batters**. Editado por Kulp, K.; Lorenz, K., Brümmer, J. A.A.C.C., St. Paul. 1995.
- DIEZ-POZA, O. Transglutaminase in baking applications. **Cereal Foods World**, **47** (3): 93-95. 2002.
- DUBOIS, D. K.; BLOCKCOLSKY, D. Frozen bread dough, effect of additives. **AIB Technical Bulletin**, **8** (4) 1986.
- EL-HADY, E.A.; EL-SAMAHY, S. K.; SEIBEL, W.; MEYER, D. Mikrostruktur von gefrosteten brotteigen. **Getreide Mehl und Brot**, **49**: 40-46, 1995.
- EL-HADY, E. A.; EL-SAMAHY, S. K.; SEIBEL, W.; BRÜMMER, J. M. Changes in gas production and retention in non prefermented frozen wheat doughs. **Cereal Chemistry**, **73** (4): 472-477, 1996.
- EL-HADY, E. A. A.; EL-SAMAHY, S. K.; BRÜMMER, J. M. Effect of oxidants sodium estearoil 2 lactilate and their mistures on rheological and baking properties of non prefermented frozen doughs. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, **32**: 446-454. 1999.
- EPSTEIN, W. FEMS Microbiol. Rev. 39, 73-78, 1986. In: Purification and characterization of new trehalose-producing enzymes isolated from the hyperthermophilic archae, *Sulfolobus solfataricus* KM1. Kato, M.; Miura, Y.; Kettoku, M.; Shindo, K.; Iwamatsu, A.; Kobayashi, K. **Bioscience, Biotechnology & Biochemistry**, **60** (3): 546-550, 1996.
- FRANKS, F.; MATHIAS, S.; GALFRE, P.; BROWN, D. Ice nucleation and freezing in undercooled cells. **Cryobiology**, **20**: 298-309. 1983.

- FRANKS, F. Protein destabilization at low temperatures. **Advances of Protein Chemistry**, **46**: 105-139. 1995.
- GEHRKE, H. H.; PRALLE, K.; DECKWER, W. D. Freeze drying of microorganisms - Influence of cooling rate on survival. **Food Biotechnology**, **6** (1): 35-49, 1992.
- GODKIN, W. J. e CATHCART, W. H. Fermentation activity and survival of yeast in frozen fermented and unfermented doughs. **Food Technology**, **3**: 139-146. 1949.
- HAHN, J. S.; KAWAI, H. Isolation and characterization of freeze-tolerant yeasts from nature available for the frozen method. **Agricultural Biological Chemistry**, **54** (3): 829-831, 1990.
- HINO, A.; MIHARA, K.; NAKASHIMA, K.; TAKANO, H. Trehalose levels and survival ratio of freeze-tolerant versus freeze-sensitive yeasts. **Applied and Environmental Microbiology**, **56**: 1386-1391, 1990.
- HIRASAWA, R.; YOKOIGAWA, K.; ISOBE, Y.; KAWAI, H. Improving the freeze tolerance of baker's yeast by loading with trehalose. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, **65** (3): 522-526. 2001.
- HSU, K. H.; HOSENEY, R. C.; SEIB, P. A. Frozen dough. I. Factors affecting stability of yeasted doughs. **Cereal Chemistry**, **56**: 419-424, 1979.
- HSU, K. H.; HOSENEY, R. C.; SEIB, P. A. Frozen dough. II. Effects of freezing and storing conditions on the stability of yeasted doughs. **Cereal Chemistry**, **56**: 424-426. 1979.
- INOUE, Y.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. I. Effects of frozen storage and freeze-thaw cycles on baking and rheological properties. **Cereal Chemistry**, **68**: 627-631. 1991.
- INOUE, Y.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. II. Flour quality requirements for bread production from frozen dough. **Cereal Chemistry**, **69**: 423-428. 1992.
- INOUE, Y.; BUSHUK, W. Effects of freezing, frozen storage and thawing on dough and baked goods. Cap. 10. In: **Freezing effects on food quality**. Editado por Jeremiah, L. E. Marcel Dekker Inc., 1996.
- INOUE, Y.; SAPIRSTEIN, H. D.; TAKAYANAGI, S.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. III. Some factors involved in dough weakening during frozen storage and thaw-freeze cycles. **Cereal Chemistry**, **71**: 118-121, 1994.

- INOUE, Y.; SAPIRSTEIN, H. D.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. IV. Effect of shortening systems on baking and rheological properties. **Cereal Chemistry**, 72 (2): 221-226, 1995.
- KALETUNC, G.; BRESLAUER, K. J. Construction of a wheat flour state diagram—Application to extrusion processing. **Journal of Thermal Analysis**, 47: 1267-1288. 1996.
- KENNY, S.; WEHRLE, K.; DENNELLY, T.; ARENDT, E. K. Correlations between empirical and fundamental rheology measurements and baking performance of frozen bread dough. **Cereal Chemistry**, 76 (3): 421-425. 1999.
- KENNY, S.; GRAU, H.; ARENDT, E. K. Use of response surface methodology to investigate the effects of processing conditions on frozen quality and stability. **European Food Research Technology**, 213: 323-388. 2001.
- KHAN, K.; BUSHUK, W. Structure of wheat gluten in relation to functionality in breadmaking. In: **Functionality and protein structure**. Pour-el, A., editado por Am Chem. Soc. Washington D. C. 1979.
- KLEIN, M. G. Packaging- Special requirements for frozen bakery products. **Baker's Digest**, 45 (2): 58. 1971a.
- KLEIN, M. G. Problems in baking. **Baker's Digest**, 45 (6): 64. 1971b.
- KLINE, L.; SUGIHARA, F. F. Factors affecting the stability of frozen bread doughs. I. Prepared by straight dough method. **Baker's Digest**, 42 (5): 44-50. 1968.
- LAWRIE, P. A. **Meat Science**. 5th Ed. Pergamon Press. New York. 1991.
- LEHMANN, T. A. e DREESE, P. Stability of frozen bread dough- Effects of freezing temperatures. **A.I.B. Technical Bulletin III** (7), 1981.
- LEUNG, H. K.; STEINBERG, M. P. Water binding capacity of food constituents as determined by NMR, freezing, sorption and dehydration. **Journal of Food Science**, 44: 1212-1216, 1220. 1979.
- LOVE, R. M. Ice formation in frozen muscle. In: **Low temperature biology of foodstuffs**. Editado por Hawthorn, J. e Rolf, E. J. Pergamon Oxford. 1968.
- LU, W.; GRANT, L. A. Effects of prolonged storage at freezing temperatures on starch and baking quality of frozen doughs. **Cereal Chemistry**, 76 (5): 656-662. 1999a.

- LU, W.; GRANT, L. A. Role of flour fractions in breadmaking quality of frozen dough. **Cereal Chemistry**, **76** (5): 663-667. 1999b.
- MARSTON, P. E. Frozen dough for bread making. **Baker's Digest**, **52**: 18-20, 37; 1978.
- MAZUR, P. Kinetics of water loss from cells at subzero temperatures and the likelihood of intracellular freezing. **Journal of General Physics**, **47**: 347-369, 1963.
- MAZUR, P. Mechanism of injury and protection in cells and tissues at low temperatures. Les Colloques de l'Institute National de la Santé e de la Recherche Medicale. **Inserm**, **62**: 37-60, 1976.
- MÉRIC, L.; LAMBERT-GUILOIS, S.; NEYRENEUF, O.; RICHARD-MOLARD, D. Cryoresistance of Baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* in frozen dough: Contribution of cellular trehalose. **Cereal Chemistry**, **72** (6): 609-615, 1995.
- MERRIT, P. P. The effect of preparation on the stability and performance of frozen, unbaked, yeast leavened doughs. **Baker's Digest**, **34** (4): 57. 1960.
- MURAKAMI, Y.; HAHN, Y. S.; YOKOIGAWA, K.; ENDO, K.; KAWAI, H. Induction of freeze-sensitive mutants from a freeze-tolerant yeast *Torulaspora delbrueckii*. **Bioscience, Biotechnology & Biochemistry**, **58** (1): 206-207, 1994.
- MURAKAMI, Y.; YOKOIGAWA, K.; KAWAI, F.; KAWAI, H. Lipid composition of commercial baker's yeast having different freeze-tolerance in frozen dough. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, **60**: 1874-1876. 1996.
- NEMETH, L. J.; PAULLEY, F. G.; PRESTON, K. R. Effects of ingredients and processing conditions on the frozen dough bread quality of a Canada Western Red Spring Wheat flour during prolonged storage. **Food Research International**, **29** (7): 609-616, 1996.
- NEYRENEUF, O.; NITSCHKE, G. Tiefgefrieren von Hefeteigen und teiglingen Anforderungen an Rohstoffe und Verfahren. **Getreide, Mehl und Brot**, **43**: 298-303. 1989.
- NEYRENEUF, O.; VAN DER PLAAT, J. B. Preparation of frozen French bread dough with improved stability. **Cereal Chemistry**, **68** (1): 60-66, 1991.
- NEYRENEUF, O.; DELPUECH, B. Freezing experiments on yeasted dough slabs. Effects of cryogenic temperatures on the baking performance. **Cereal Chemistry**, **70** (1): 109-111, 1993.

- PARK, J. I.; GRANT, C. M.; ATTFIELD, P. V.; DAWEST, J. W. The freeze-thaw stress response of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* is growth phase specific and is controlled nutritional state via the RAS-cyclic AMP signal transduction pathway? **Applied Environmental Microbiology**, **63**: 3818-3824. 1997.
- PRIVALOV, P. L.; GRIK, Y. U.; VENYAMINOV, Y. S.; KUTYSHENKO, V. P. Cold denaturation of myoglobine. **Journal of Molecular Biology**, **190**: 487-497. 1986.
- PRIVALOV, P. L. e MAKHATADZE, G. I. Contribution of hydration to protein folding thermodynamics. II The entrophy and gibbs energy of hydration. **Journal of Molecular Biology**, **232**: 660-697. 1993.
- RAY, B. Impact of bacterial injury and repair. In: Food microbiology: its past, present and future. **Journal of Food Protein**, **49**: 651-655. 1986.
- REED, G. Use of yeast in baking. Cap. 7. In: **Yeast Technology**. AVI Book. 1991.
- REED, R. H.; BOROWITZKA, L. J.; MACKAY, M. A.; CHUDEK, J. A.; FOSTER, R.; WARR, S. C. R.; MOORE, D. J.; STEWART, W. D. P. FEMS Microbiology Rev. **39**: 51-56. 1986. In: Purification and characterization of new trehalose-producing enzymes isolated from the hyperthermophilic archae, *Sulfolobus solfataricus* KM1. Kato, M.; Miura, Y.; Kettoku, M.; Shindo, K.; Iwamatsu, A.; Kobayashi, K. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, **60** (3): 546-550, 1996.
- ROMAN GUTIERREZ, A. D.; GUILBERT, S.; CUQ, B. Frozen and unfrozen water contents of wheat flours and their components. **Cereal Chemistry**, **79** (4): 471-475. 2002.
- SANDERSON, G. W. Yeast products for the baking. **Cereal Foods World**, **30** (11): 770-774, 1985.
- SALAS-MELLADO, M. M. Efeito de algumas variáveis do processo de panificação de massa congelada na estabilidade da massa estocada e na qualidade do pão. M. Sc. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1992.
- SHENOUDA, S. Y. K. Theories of protein denaturation during frozen storage of fish flesh. **Advances in Food Research**, **26**: 275-311. 1980.
- SIDELEAU, P. Freezing and thawing of unbaked products. **Processing American Society Bakery Engineering**, **89**. 1987.

- STENVERT, N. L.; MOSS, R.; MURRAY, L. The role of dry vital wheat gluten in breadmaking. Part II. A microscopic method for locating dry vital gluten in doughs and determining the interactions with flour gluten and mixer type. **Baker's Digest**, **55** (3): 27, 1981.
- TAKAGI, H.; IWAMOTO, F.; NAKAMORI, S. Isolation of freeze tolerance laboratory strains of *Saccharomyces cerevisiae* from proline-analogue-resistant mutants. **Applied Microbiology and Biotechnology**, **47**: 405-411, 1997.
- TANAKA, Y. Freezing injury of baker's yeast in frozen dough. **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi**, **28**: 100, 1981.
- THEVELEIN, J. M. Regulation of trehalose mobilization in fungi. **Microbiology Review**, **48**: 42-59, 1984.
- TORNER, M. J.; PULIDO, E.; MARTINEZ-ANAYA, M. A. Efecto de la congelación sobre la actividad enzimática y calidad panadera de la levadura prensada comercial. **Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos**, **32** (6): 653-666, 1992.
- VAN DAM, H. W.; HILLE, D. R. Yeast and enzymes in breadmaking. **Cereal Foods World**, **37** (3): 245-251, 1992.
- VAN LAERE, A. Trehalose, reserve and/or stress metabolite? **FEMS Microbiology Review**, v. 63, p. 201-210, 1989.
- VARRIANO-MARSTON, E. HSU, K. H.; MHADI, J. Rheological and structural changes in frozen dough. **Baker's Digest**, **54**: 32-34, 41, 1980.
- WANG, Z. J.; PONTE, J. G. Jr. Storage stability of gluten-fortified frozen dough. **Cereal Foods World**, **40** (11): 827-831, 1995.
- WOLT, M. J.; D'APPOLONIA, B. L. Factors involved in the stability of frozen dough. I. The influence of yeast reducing compounds of frozen-dough stability. **Cereal Chemistry**, **61**: 209-212, 1984a.
- WOLT, M. J.; D'APPOLONIA, B. L. Factors involved in the stability of frozen dough. II. The effect of yeast type, flour type, and dough additives on frozen-dough stability. **Cereal Chemistry**, **61**: 213-221, 1984b.
- ZOUNIS, S.; QUAIL, K. J.; WOOTTON, M.; DICKSON, M. R. Studying frozen dough structure using low temperature scanning electron microscopy. **Journal of Cereal Science**, **35**: 135-147, 2002a.

ZOUNIS, S.; QUAIL, K. J.; WOOTTON, M.; DICKSON, M. R. Effect of final dough temperature on the microstructure of frozen bread dough. **Journal of Cereal Science**, **36**: 135-146. 2002b.

CAPÍTULO II. EFEITO DA FORMULAÇÃO NA QUALIDADE DE MASSAS CONGELADAS PARA PÃO

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal estudar a influência da formulação da massa, na estabilidade ao congelamento e na qualidade do pão. Com esta finalidade, massas de pão contendo glúten Vital e trealose foram submetidas a congelamento mecânico a -30°C e armazenamento sob congelamento a -15°C por 45 dias. Dois tipos de fermento instantâneos foram testados: para massa doce (A) e para massa salgada (B). Os efeitos da formulação, do tipo de levedura e do armazenamento sob congelamento foram avaliados na massa, através das características de extensibilidade e número de leveduras viáveis, e no pão através do volume específico, da dureza do miolo e do escore das características tecnológicas. Os resultados submetidos à análise estatística mostraram claramente a influência do efeito da formulação sobre o volume específico e a dureza do miolo do pão. O tipo de fermento só afetou significativamente o volume específico do pão, apresentando o fermento A, um efeito melhor que o fermento B. Houve um efeito benéfico sobre a taxa de sobrevivência celular para ambos os fermentos com a adição de 10 % de trealose na formulação. O armazenamento sob congelamento das massas a -15°C influenciou negativamente o volume específico, a dureza e o escore das características tecnológicas do pão.

ABSTRACT

The main objective of these work was to study the effect of the dough formula on the stability of bread doughs which undergo freezing and on bread quality. With these purpose in mind, bread doughs containing Vital gluten and trehalose were frozen in blast tunnel (mechanical) to -30°C and stored to -15°C for 45 days. Two yeast type were tested: for sweet doughs (A) and for salt doughs (B). The effect of formulation, yeast type and Vital gluten addition were evaluated in doughs, through the dough extensibility and yeast viability determinations, and in bread through the specific volume, crumb hardness and technological score values. The statistical experimental data analysis showed a clear influence of the dough formulation on the bread specific volume and crumb hardness values. Only the specific volume was affected by the yeast type; showing yeast type A a better performance as compared with yeast type B. The addition of 10% of trehalose in dough formula showed a advantageous effect on the yeast survival rate for both yeast type. The freezing storage of the doughs to -15°C affected negatively the bread specific volume, crumb hardness and the technological characteristics.

2.1. INTRODUÇÃO

Vários são os fatores relacionados com a qualidade do pão produzido a partir de massas congeladas e armazenadas por longos períodos. O efeito do congelamento nas propriedades das leveduras tem sido motivo de estudo por muitos pesquisadores. As pesquisas têm mostrado que a viabilidade das leveduras é fortemente influenciada pela fermentação antes do congelamento (Hino *et al.*, 1987; Báguena *et al.*, 1991; Salas-Mellado, 1992), pelas velocidades de congelamento e descongelamento (Gélinas *et al.*, 1993; Gehrke *et al.*, 1992; Autio e Sinda, 1992; Murakami *et al.*, 1994) e pela duração do armazenamento sob congelamento (Berglund e Shelton, 1993; Wang e Ponte, 1995).

O tipo e as propriedades das leveduras também tem um papel importante na viabilidade das leveduras e na qualidade do produto (Gélinas *et al.*, 1993; Murakami *et al.*, 1994; Van Dam e Hille, 1992; El-Hady *et al.*, 1996; Inoue *et al.*, 1994).

Nas produções comerciais de massa congelada, usa-se maiores níveis de levedura, procedimentos *no time* de panificação, baixas temperaturas de preparação e congelamento em túnel, com a finalidade de minimizar os efeitos acima mencionados.

O outro fator importante na qualidade dos produtos elaborados com massas congeladas é a influência do tempo de armazenamento e as condições de estrutura do glúten (Lu e Grant, 1999). A estrutura da matriz de proteínas do glúten parece ficar interrompida durante o armazenamento prolongado e repetidos ciclos de congelamento / descongelamento (Berglund *et al.*, 1991; Wang e Ponte, 1995; Autio e Sinda, 1992), resultando em enfraquecimento das propriedades de força da massa, perda de retenção de gás e deterioração da qualidade do produto (Inoue e Bushuk, 1991, 1992; Autio e Sinda, 1992; Inoue *et al.*, 1994; Czuchajowska e Paszcyńska, 1996).

A extensão destes efeitos adversos pode ser reduzida pelo uso de farinhas muito fortes (Inoue e Bushuk, 1992), pela adição de glúten (Wang e Ponte, 1994 e 1995) ou pela adição de agentes reforçadores, tais como o estearoil lactilato de sódio e de cálcio (SSL e

CSL) e os ésteres de ácido tartárico diacetilo de monoglicerídeo (DATEM) (Wolt e D'Appolonia, 1984; Inoue *et al.*, 1995; El-Hady *et al.*, 1995; Nemeth *et al.*, 1996).

Outros estudos têm mostrado que o tipo e nível de oxidante (Inoue e Bushuk, 1991; Salas-Mellado, 1992; El Hady *et al.*, 1999), enzimas (Himmelstein, 1984; Diez Poza, 2002), procedimento de mistura e moldagem (Dubois e Blockcolsky, 1986; Gélinas *et al.*, 1995; Nemeth *et al.*, 1996) e uma variedade de outros ingredientes (Davis, 1981; Hosomi *et al.*, 1992; Addo, 1997) podem influenciar a qualidade das massas congeladas.

A capacidade da levedura para manter um alto poder fermentativo após períodos de armazenamento a baixas temperaturas é afetada por parâmetros tecnológicos e celulares. A trealose é considerada um fator fisiológico importante de resistência da levedura ao frio (Almeida e Pais, 1996). Este dissacarídeo tem sido relacionado à resistência da levedura a vários tipos de tensão (Sanderson, 1985; Oda *et al.*, 1986; Gadd *et al.*, 1987; Hino *et al.*, 1990; Van Der Plaat, 1974; Van Djick *et al.*, 1995; Hottinger *et al.*, 1987; Mackenzie *et al.*, 1988), demonstrando que um alto conteúdo de trealose intracelular é vantajoso para uma boa estabilidade ao congelamento / descongelamento após armazenamento prolongado sob congelamento. De especial interesse nessa área, foram as pesquisas de Méric *et al.* (1995) que, trabalhando com leveduras para panificação, estudaram a evolução da trealose durante as etapas de preparação das massas congeladas, chegando à conclusão final que um conteúdo de 4-5 % (base matéria seca de levedura) no momento do congelamento foi suficiente para proteger as células de levedura na seqüência das operações de pré fermentação, congelamento, armazenamento congelado e descongelamento. Hirasawa *et al.* (2001), trabalhando com leveduras de panificação “encharcadas” em concentrações altas de trealose, conseguiram maior tolerância das células de levedura ao congelamento. Estas pesquisas nos levaram a pensar na inclusão deste açúcar na formulação, visando estudar seu efeito protetor sobre as células de levedura.

O objetivo deste trabalho foi testar o efeito da adição de trealose e de glúten Vital, assim como o tipo de fermento, na formulação de massas para pão e sua estabilidade às

operações de congelamento, descongelamento e armazenamento a temperatura de congelamento.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Matéria Prima , Ingredientes e Formulação da Massa

Foram utilizados: farinha de trigo especial, gordura vegetal hidrogenada, açúcar, sal, fermento biológico seco e instantâneo, marca Fleischmann Royal Ltda., para massa doce (A) e para massa salgada(B), vitamina C, monooleato de sorbitana (polissorbato 80), glúten Vital (Sigma) e trealose (Sigma).

A formulação básica (base farinha) de pão francês foi a seguinte: farinha (100%), água (absorção farinográfica menos 2%), fermento instantâneo (1,3 %), sal (2 %), açúcar (2 %), gordura (2 %), polissorbato 80 (0,3 %), vitamina C (120 ppm) , glúten vital (2 e 4 %), trealose (5 e 10 %, base matéria seca da levedura).

Foram escolhidas 7 formulações para cada tipo de fermento (Tabela 2.1) que se diferenciaram no conteúdo de glúten vital e de trealose, existindo uma formulação padrão sem presença de aditivos (F₁).

2.2.2. Métodos

2.2.2.1. Preparo da massa, congelamento, descongelamento e elaboração do pão

Os ingredientes de cada formulação (1 kg) foram misturados em masseira de laboratório, durante 8 minutos. A massa obtida foi cortada, boleada e moldada na forma de bisnagas de 80 g e diâmetro de 30 mm, que foram congeladas em túnel mecânico com temperatura do ar de -30° C e velocidade do ar de 1,5 m/s, até a temperatura no centro da bisnaga de -15° C, controlada por termopares. As massas congeladas foram retiradas do túnel, embaladas em sacos de polietileno e armazenadas em freezer doméstico a -15° C durante 45 dias.

Tabela 2.1. Formulação das massas para pão francês a serem congeladas

Ingredientes (%)	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇
Farinha	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Água	58,9	58,9	58,9	58,9	58,9	58,9	58,9
Fermento	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Sal	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Açúcar	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Gordura	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Polissorbato 80	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Vitamina C ^{ppm}	120	120	120	120	120	120	120
Glúten Vital	---	---	2,0	2,0	2,0	4,0	4,0
Trealose	---	5,0	---	5,0	10,0	5,0	10,0

Após o preparo das massas, foram retiradas amostras denominadas tempo zero, correspondente a massa não congelada. Amostras, após 1, 10 e 45 dias posterior ao congelamento e armazenamento, foram retiradas do freezer, descongeladas em cabine a 30° C durante 1 hora, fermentadas a 30 °C durante 1 hora e 35 minutos e forneadas a 200 °C por 20 minutos.

Os pães obtidos, foram resfriados a temperatura ambiente por, no mínimo, 1 hora e avaliados pelo volume, pela dureza do miolo e pelo escore das características tecnológicas.

O fluxograma de elaboração das massas e do pão se apresenta na Figura 2.1.

2.2.2.2. Determinação das características reológicas da massa

As amostras da massa nos tempos zero, 1, 10 e 45 dias, após descongelamento, foram analisadas em texturômetro TATX-2, com haste para determinação da extensibilidade segundo metodologia de Smewing (1995). A área da curva média de 10 determinações de microextensibilidade da massa foi registrada como medida da força da massa, expressada em gf/mm.

2.2.2.3. Determinação de viabilidade de leveduras

Nas amostras de massa nos tempos zero, 1, 10 e 45 dias, após descongelamento, foi determinado o número de leveduras viáveis pelo método de contagem direta em placa utilizando ágar batata dextrose como meio de cultura. Foram determinadas as contagens de microrganismos, conforme Salas-Mellado (1992), após 4 dias de incubação a 30°C e calculada a taxa de sobrevivência pela relação do número de leveduras vivas após 45 dias e o número de leveduras presentes no primeiro dia, expressa como porcentagem (%).

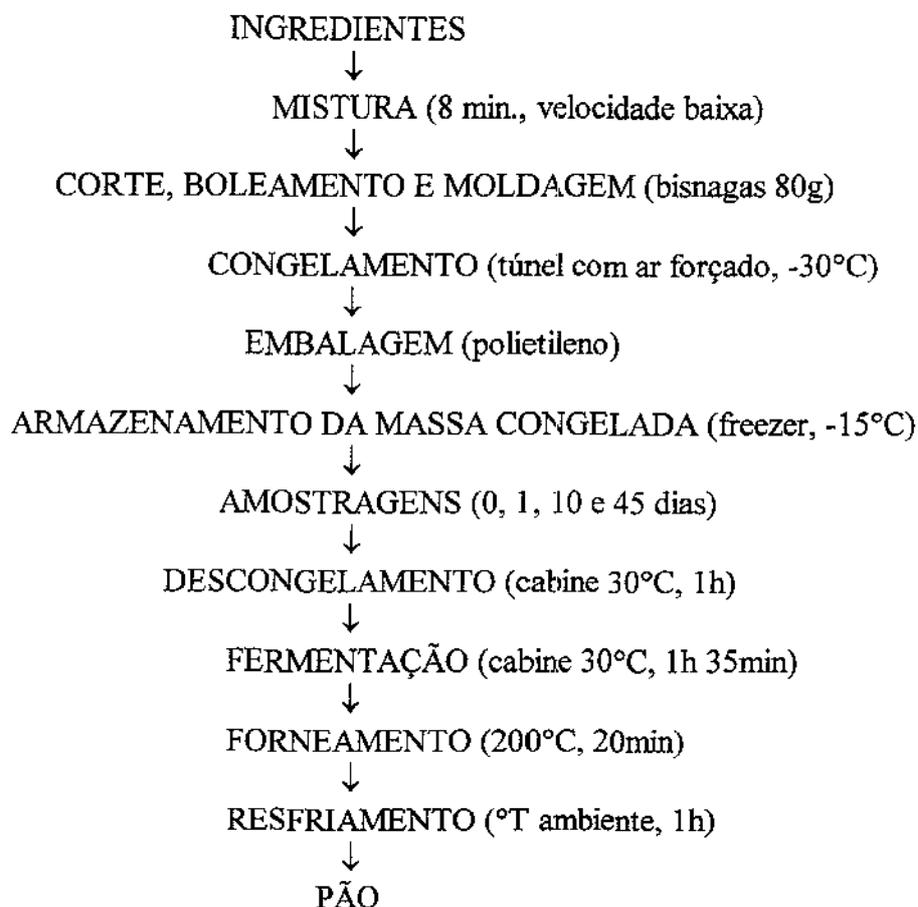


Figura 2.1. Fluxograma de elaboração da massa e do pão.

2.2.2.4. Determinação do volume e da dureza do pão

Nos pães obtidos pelas massas nos tempos de armazenamento sob congelamento iguais a zero, 1, 10 e 45 dias, foi determinado o volume específico pela relação do volume

obtido por deslocamento de sementes de painço e o peso do pão. A dureza do miolo foi determinada pela compressão de duas fatias de pão de 15 mm de espessura, após 30 minutos de resfriamento, no texturômetro TATX2, segundo metodologia do instrumento, com haste cilíndrico de 30 mm, e os resultados expressos em g-f.

2.2.2.5. Determinação do escore das características tecnológicas do pão

O escore dos pães foi determinado pelas características externas: cor da crosta (10), quebra (5), simetria (5) e as características internas [características da crosta (5), cor do miolo (10), estrutura celular do miolo (10), e textura do miolo (10)], perfazendo um total de 55 pontos como valor máximo, conforme metodologia de El-Dash (1978) para pão de forma, descrita no Anexo 1.

2.2.2.6. Análise estatística.

Neste estudo, foram considerados 3 efeitos:

- a) Efeito da formulação: as sete formulações estudadas para cada fermento foram as apresentadas na Tabela 2.1.
- b) Efeito do fermento: foram utilizados dois tipos de fermento seco e instantâneo, denominados A, para massa doce, e B, para massa salgada.
- c) Efeito do tempo de estocagem: foram analisadas amostras de massa e de pão em quatro pontos: dia zero (massa não congelada); dia 1 (após congelamento e 1 dia de armazenamento a -15°C), 10, e 45 dias de armazenamento a -15°C.

As respostas ou variáveis dependentes foram: volume específico, dureza do miolo e notas das características tecnológicas do pão. Na massa, foi determinada a extensibilidade e área da curva média de 10 determinações.

Os resultados do volume específico, da dureza e do escore dos pães, assim como a extensibilidade da massa foram analisados estatisticamente mediante análise de variância (Anova) usando-se o programa para microcomputadores SAS v. 5.0. As diferenças

estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre os diferentes efeitos, foram determinadas pelo teste LSD (List Significance Difference), conforme Vieira e Hoffmann (1996).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2.2 mostra uma curva típica de congelamento, onde se observa o comportamento da relação temperatura/tempo, obtido com os termopares inseridos na massa.

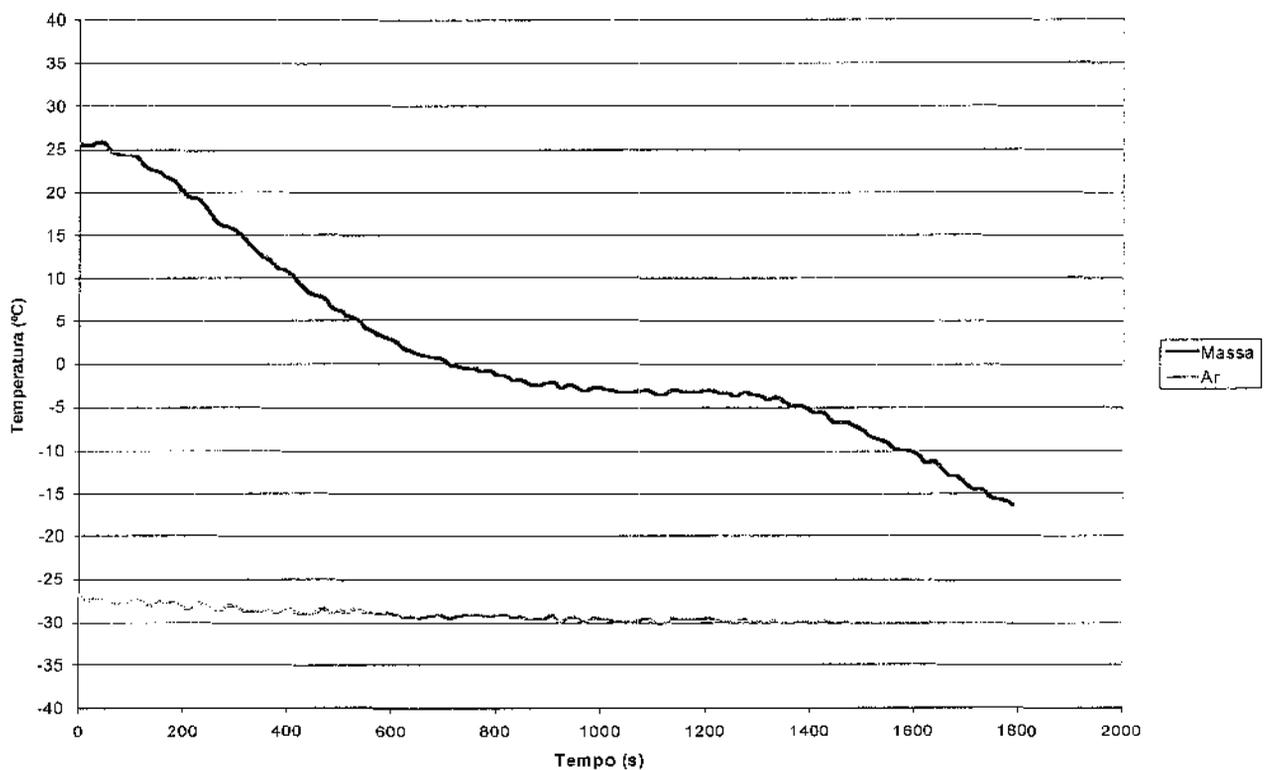


Figura 2.2. Curva de congelamento da massa de bisnaga de 80 g e diâmetro de 30 mm, em congelador mecânico a -30°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.

2.3.1. Da análise estatística

A análise de variância dos valores obtidos, quando os efeitos formulação, fermento e tempo de armazenamento foram considerados, mostrou que os três efeitos são importantes. Os efeitos formulação, fermento e tempo de armazenamento foram significativos para o

volume específico, dureza do miolo, e escore das características tecnológicas do pão. Não se detectaram diferenças significativas da extensibilidade da massa devida aos efeitos de formulação, fermento e armazenamento congelado.

2.3.1.1. Efeito da formulação

Quando se comparou os valores médios do volume específico do pão considerando a formulação como o principal efeito, a formulação F7 diferenciou-se das outras formulações que formaram grupos que não se diferenciaram entre si, como pode ser observado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Valores médios* de volume específico, e dureza do miolo, para as diferentes formulações de massa para pão.

Formulação	Volume específico (cm ³ /g)	Dureza do miolo (g-f)
F1	3,36 a	667 a
F2	3,35 a	616 a
F3	3,43 a	548 b
F4	3,54 b	500 b, c
F5	3,44 a	571 b
F6	3,71 b	433 b, c
F7	3,93 c	501 b, c

* = Valores médios para cada formulação considerando ambos fermentos A e B. As médias com a mesma letra não apresentaram diferenças significativas ($p \leq 0,05$, LSD)

O maior valor de volume específico foi obtido pelos pães preparados com a formulação F7, seguidos dos valores obtidos para as formulações F6 e F4, ficando as formulações F5, F3, F1 e F2 com os menores valores. Estes resultados mostram uma boa correlação do volume específico do pão com o conteúdo de glúten adicionado. Os maiores valores de volume específico foram obtidos para formulações com maiores teores de glúten. As formulações sem glúten adicionado (F1 e F2) obtiveram os menores valores de volume específico. Isto demonstra o efeito benéfico do glúten Vital. Um resultado interessante foi

que as formulações F6 e F4 não se diferenciaram entre si apesar delas terem sido adicionadas com diferentes quantidades de glúten (4 e 2 %, respectivamente), o que poderia estar relacionado ao efeito positivo da trealose adicionada, que nos dois casos foi de 5 %. A trealose possui um efeito protetor das células de leveduras ao estresse ao frio (Thevelein, 1984; Van Laere, 1989; Hirasawa *et al.*, 2001), o que pode ter deixado as leveduras da massa adicionadas com trealose mais resistentes ao efeito do congelamento, conseguindo produzir pães com volumes específicos maiores que aqueles sem trealose na formulação.

Quando se compararam os valores médios de dureza dos pães de todas as formulações incluindo os valores com os dois tipos de fermento, houve diferenças significativas dos valores de dureza do miolo do pão para as diferentes formulações da massa. As formulações com altos teores de glúten foram as que apresentaram melhor desempenho com relação à dureza do miolo, apresentando valores menores, como pode ser observado na Tabela 2.2. As formulações F4 e F3, com baixos teores de glúten adicionado apresentaram valores intermédios de dureza. As formulações F1 e F2, sem glúten adicionado, foram as que apresentaram os valores mais altos de dureza do miolo.

Observando os valores de volume específico e dureza conjuntamente (Figura 2.3), constatou-se a inter-relação direta das formulações adicionadas com glúten e trealose (F6 e F7) como os maiores valores de volume específico e menores valores de dureza. O efeito benéfico do glúten adicionado à massa já foi observado por outros pesquisadores (Inoue e Bushuk, 1991; Wang e Ponte, 1994; Czuchajowska e Paszczyńska, 1996). O comportamento da formulação F5, no entanto, apesar do alto conteúdo de trealose, não conseguiu um efeito benéfico tão claro, ficando numa posição intermédia entre as formulações ricas (F6 e F7) e as formulações pobres (F1 e F2).

2.3.1.2. Efeito do fermento

O volume específico do pão foi a única resposta influenciada pelo tipo de fermento utilizado. Os pães elaborados com o fermento para massa doce (A) apresentaram um volume específico médio (3,70 cm³/g) superior ao dos pães elaborados com o fermento para massa

salgada ($3,37 \text{ cm}^3/\text{g}$). Isto pode ser devido ao fato que, sendo o fermento A uma levedura adequada para massa doce, com características de osmotolerância, estes microrganismos podem ter resistido melhor às operações de congelamento, descongelamento e armazenamento sob congelamento. O bom desempenho das leveduras secas ativas já foi discutido por El-Hady *et al.* (1996), que demonstraram que as leveduras secas, foram mais estáveis ao armazenamento a baixas temperaturas por 12 semanas, quando comparado com as leveduras prensadas.

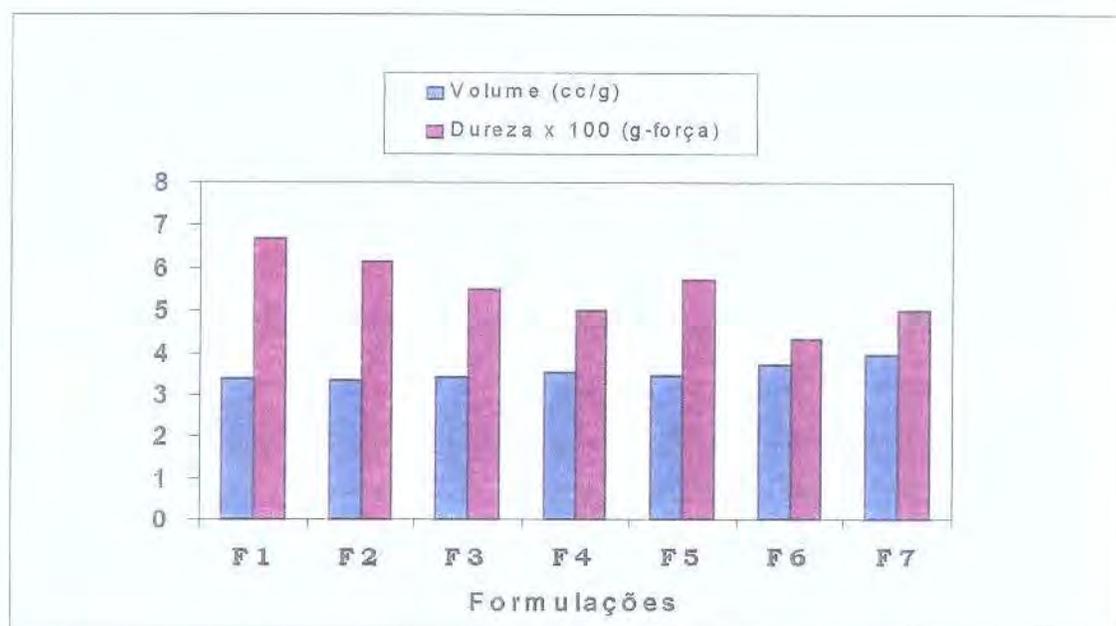


Figura 2.3: Efeito da formulação da massa no volume específico e na dureza do pão

A dureza do miolo e o escore do pão, assim como a extensibilidade da massa, não foram influenciadas pelo tipo de fermento utilizado, já que os resultados deste efeito sobre as respostas não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

2.3.1.3. Efeito do tempo de armazenamento

O volume específico, a dureza do miolo e o escore das características tecnológicas do pão, foram influenciados pelo tempo de armazenamento congelado das massas. A extensibilidade da massa não foi influenciada por este efeito. Observou-se uma diminuição significativa do volume específico dos pães elaborados com as massas não congeladas,

comparada com os pães das massas armazenadas após 1, 10 e 45 dias, o que pode ser constatado pela Tabela 2.3.

Verificou-se uma diminuição dos valores médios do volume específico dos pães ao longo do armazenamento congelado, o que significou perda de qualidade do pão. Notou-se que houve uma diminuição progressiva do volume específico com o aumento do tempo de armazenamento. Por outro lado, observou-se um aumento da dureza do miolo dos pães nas diferentes formulações estudadas, com o aumento do tempo de armazenamento. Este fato, já foi observado por Berglund e Shelton (1993), que trabalharam com massas congeladas a -23°C e armazenadas durante 20 semanas. Eles constataram que períodos longos de armazenamento resultaram em aumento dos valores de dureza dos pães, associado também com a diminuição de volume, o que também foi verificado por Lu e Grant (1999) que, estudando os efeitos do armazenamento prolongado sob congelamento, determinaram aumentos significativos nos tempos de *proofing* com o aumento do armazenamento.

Tabela 2.3 - Valores médios ¹ de volume específico, de dureza e de escore do pão com relação ao tempo de armazenamento congelado.

Tempo de armazenamento (dias)	Volume específico (cc/g)	Dureza do miolo (g-força)	Escore do pão
zero ²	4,17 a	413 a	45,85 a
1	3,70 b	490 a	45,32 a
10	3,47 c	609 b	44,67 b
45	2,82 d	680 b	43,91 b

1 = Valores médios dos pães de todas as formulações com ambos fermentos; 2 = Massa não congelada. As médias com a mesma letra não apresentaram diferenças significativas ($p \leq 0,05$, LSD)

O tempo de armazenamento também influenciou o escore conferido pelas características tecnológicas dos pães. Observou-se uma queda do escore dos pães com o decorrer do armazenamento sob congelamento. Observou-se a mesma tendência apresentada pelos valores de dureza. Isto demonstra que o congelamento e o armazenamento de 1 dia não tiveram uma grande influência nestas duas características. Não houve diferenças

significativas entre a massa não congelada e após congelamento e armazenamento congelado de 1 dia. A maior mudança aconteceu entre 1 e 10 dias de armazenamento, ou seja, o armazenamento mais prolongado (45 dias) não afetou grandemente as características de dureza e escore dos pães, quando comparados com as massas armazenadas durante 10 dias.

Na Figura 2.4, que apresenta os resultados de volume específico e dureza do pão com relação aos dias de armazenamento, mostra-se claramente a queda dos valores de volume específico e o aumento da dureza do miolo do pão, constatando a perda de qualidade do pão resultante da perda de estabilidade das massas durante o armazenamento a baixas temperaturas, e que pode ser devido, em parte, ao efeito do crescimento dos cristais de gelo nas massas durante o armazenamento a temperatura de congelamento (Reid, 1983; Zounis *et al.*, 2002).

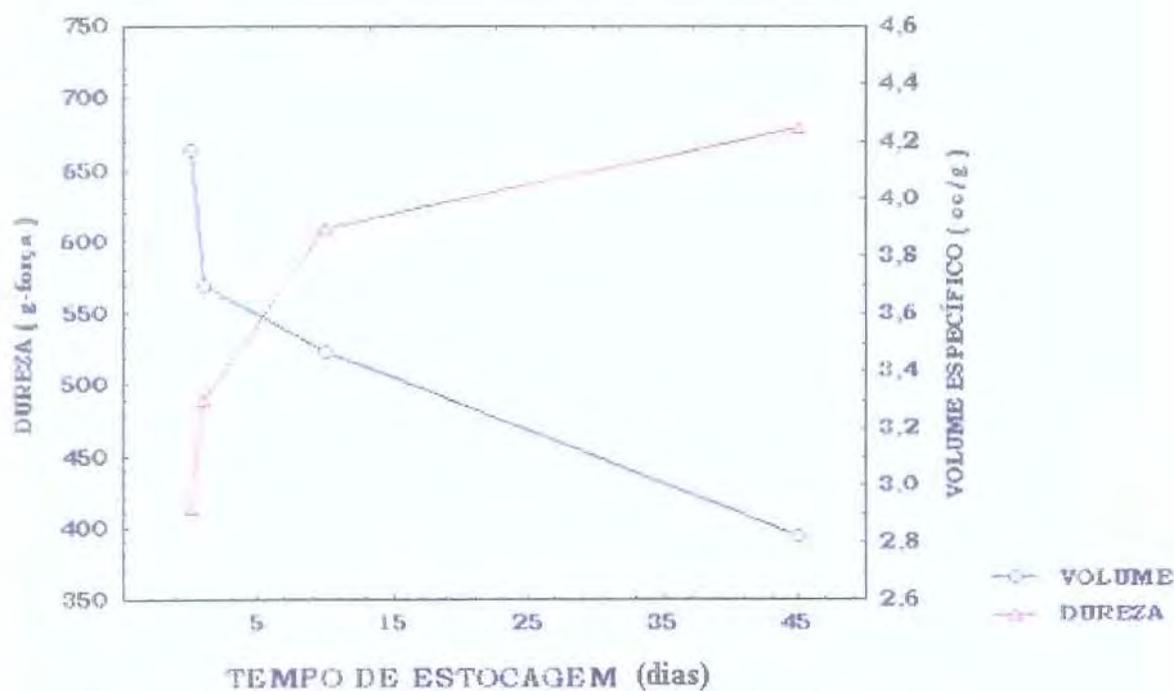


Figura 2.4. Efeito do tempo de armazenamento no volume específico e na dureza do miolo do pão.

2.3.2. Viabilidade de leveduras

As taxas de sobrevivência celular das massas elaboradas com os fermentos A e B, após 45 dias de armazenamento, são apresentadas na Tabela 2.4. Observou-se que as massas elaboradas com o fermento A apresentaram taxas de sobrevivência celular maiores que as elaboradas com o fermento B, mostrando, por tanto, que a levedura para massa doce (A) apresentou uma maior resistência que a levedura para massa salgada (B) ao congelamento e ao armazenamento sob congelamento, como já foi comentado no item 2.2.

Tabela 2.4. Valores de contagem de leveduras* e taxa de sobrevivência para as diferentes formulações.

Formulações	Contagem dia zero (x 10 ⁴)	Contagem dia 45 (x 10 ⁴)	Taxa sobrevivência (%)
F1A ^a	923	744	84
F1B ^a	842	546	65
F3A ^a	888	740	83
F3B ^a	853	533	62
F2A ^b	958	756	79
F2B ^b	841	574	68
F4A ^b	950	763	80
F4B ^b	866	615	71
F6A ^b	963	616	64
F6B ^b	808	426	53
F5A ^c	1033	957	93
F5B ^c	907	903	99
F7A ^c	798	746	93
F7B ^c	808	740	92

A: fermento para massa doce; B: fermento para massa salgada. a: sem trealose; b: baixo teor de trealose; c: alto teor de trealose. *: U.F.C./g-massa.

A melhor resposta do fermento A pode ser devida ao fato que, sendo uma levedura para massa doce, apresentou uma osmotolerância maior que o fermento B, o que deve ter melhorado a resistência às operações de congelamento, descongelamento e armazenamento congelado, como relatado por Van Dam e Hille (1992).

Levando em conta cada tipo de fermento, observou-se uma relação direta da sobrevivência celular com o aumento do conteúdo da trealose na formulação, para as massas preparadas com o fermento B. Esta relação não foi observada para o fermento A (Figura 2.5). A queda das contagens de microrganismos após congelamento e armazenamento, já foi constatada em outros trabalhos (Berglund e Shelton, 1993; Wang e Ponte, 1995).

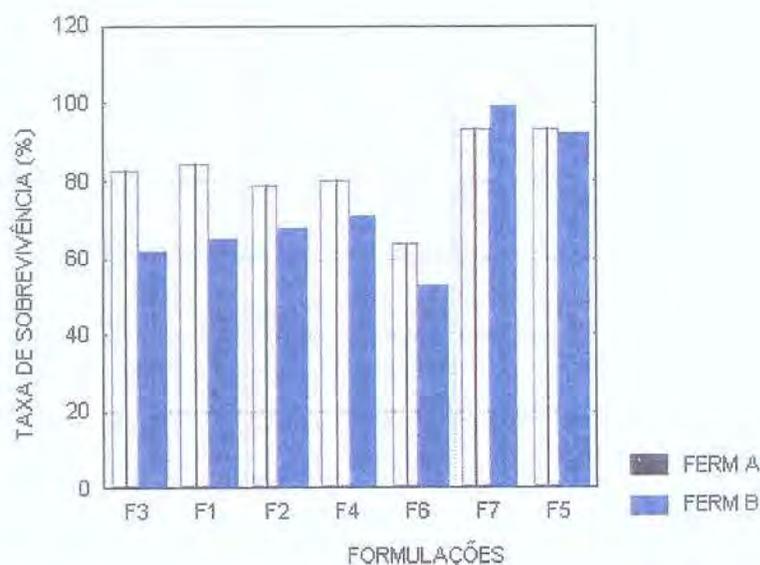


Figura 2.5. Efeito da formulação na taxa de sobrevivência das leveduras para os fermentos A e B.

As formulações sem adição de trealose (F1 e F3) apresentaram as menores taxas de sobrevivência celular, sendo que as formulações com 10 % de trealose (F5 e F7) apresentaram as maiores taxas. Das formulações com teores baixos de trealose, só a formulação F6 apresentou uma taxa bem menor de sobrevivência celular, não encontrando-se uma explicação para este comportamento; seria necessário realizar testes que medissem a

produção de gás pelas leveduras para esclarecer por quê um alto conteúdo de glúten influenciou negativamente o crescimento celular nesta formulação.

As taxas de sobrevivência de leveduras das massas preparadas com os dois tipos de fermento (A e B) foram superiores a 90% na presença de 10% de trealose na formulação, comprovando o efeito protetor deste dissacarídeo ao estresse ao frio experimentado pelas células de levedura. Este fato já foi estudado por D'Amore *et al.* (1991), Oda *et al.* (1986) e Van Dijck *et al.* (1995) e comprovado por Hirasawa *et al.* (2001), que obtiveram uma melhoria da tolerância das leveduras de panificação ao congelamento.

2.4. CONCLUSÕES

A formulação da massa influenciou significativamente no volume específico e na dureza do miolo do pão. Os pães elaborados com a formulação F7, com alto teor de glúten e de trealose, foram os que apresentaram o maior volume específico, diferenciando-se significativamente dos pães das outras formulações, que apresentaram valores menores. As formulações com altos teores de glúten foram as que apresentaram melhor desempenho das massas, com relação à dureza do miolo do pão, diferenciando-se significativamente das formulações com teores baixos ou sem nenhum glúten adicional, demonstrando o efeito benéfico deste aditivo na massa e no pão.

O tipo de fermento utilizado na formulação da massa influenciou significativamente só no volume específico do pão. Os pães feitos com a levedura seca instantânea para massa doce apresentaram um volume específico médio maior que os pães feitos com a levedura seca instantânea para massa salgada.

O tempo de armazenamento afetou o volume específico, a dureza e o escore das características tecnológicas dos pães elaborados com massas congeladas. Observou-se uma diminuição progressiva do volume específico do pão no decorrer do armazenamento congelado, diferenciando-se todos os tempos de armazenamento com a massa não

congelada. A dureza do miolo do pão aumentou e as notas das características tecnológicas diminuíram com o tempo de armazenamento.

Os efeitos da formulação, do fermento e do armazenamento sob temperaturas de congelamento, não foram significativas na extensibilidade das massas.

As massas elaboradas com fermento, para massa doce, apresentaram taxas de sobrevivência celular das leveduras maiores que as elaboradas com fermento para massa salgada.

As taxas de sobrevivência celular das leveduras das massas, preparadas com os dois tipos de fermento, foram superiores à 90% na presença de 10% de trealose, demonstrando o efeito benéfico deste dissacarídeo na estabilidade das leveduras.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ADDO, K. Effects of honey type and level on the baking properties of frozen wheat flour doughs. **Cereal Food World**, 42(1): p.36-40, 1997.

ALMEIDA, M. J.; PAIS, C. Leavening ability and freeze tolerance of yeast isolated from traditional corn and rye bread doughs. **Applied and Environmental Microbiology**, 62: p.4401-4404, 1996.

AUTIO, K.; SINDA, E. Frozen doughs rheological changes and yeast viability. **Cereal Chemistry**, 69: p.409-413, 1992.

BÁGUENA, R.; SORIANO, M. D.; MARTINEZ-ANAYA, M. A.; BENEDITO DE BARBER, C. Viability and performance of pure yeast strains in frozen doughs. **Journal of Food Science**, 56: p.1690-1698. 1991.

- BERGLUND, P. T.; SHELTON, D. R.; FREEMAN, T.P. Frozen bread dough ultrastructure as affected by duration of frozen storage and freeze-thaw cycles. **Cereal Chemistry**, **68**: p.105-107, 1991.
- BERGLUND, P. T.; SHELTON, D. R. Effect of frozen storage duration on firming properties of bread baked from frozen doughs. **Cereal Foods World**, **38**: p.89-93, 1993.
- CZUCHAJOWSKA, Z.; PASZCZYŃSKA, B. Is wet gluten food for baking? **Cereal Chemistry**, **73**(4): p.483-489, 1996.
- D'AMORE, T.; CRUMPLEIN, R.; STENVART, G. G. The involvement of trehalose in yeast stress tolerance. **Journal of Industrial Microbiology**, **7**: p.191-196, 1991.
- DAVIS, E. W. Shelf-life studies on frozen doughs. **Baker's Digest**, **55**(3): p.12-13, 16, 1981.
- DIEZ POZA, O. Transglutaminase in baking applications. **Cereal Foods World**, **47** (3): 93-95, 2002.
- DUBOIS, D. K.; BLOCKCOLSKY, D. Frozen bread dough, effect of dough mixing and thawing methods. **American Institute of Baking**, **8**: p.1-7. 1986.
- EL-DASH, A. Standardized mixing and fermentation procedure for experiment baking test. **Cereal Chemistry**, **55**: p.336.1978.
- EL-HADY, E. A.; EL-SAMAHY, S. K.; SEIBEL, W.; MEYER, D. Mikrostruktur von gefrosteten brotteigen. **Getreide Mehl und Brot**, **49**: p. 40-46, 1995.
- EL-HADY, E. A.; EL-SAMAHY, S. K.; SEIBEL, W.; BRÜMMER, J. M. Changes in gas production and retention in non prefermented frozen wheat doughs. **Cereal Chemistry**, **73**(4): p. 472-477, 1996.
- EL-HADY, E. A.; EL-SAMAHY, S. K.; BRÜMMER, J. M. Effect of oxidants, sodium-estearoil-2 lactilate and their mixtures on rheological and baking properties of

nonfermented frozen doughs. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, **32**: 446-454, 1999.

GADD, G. M.; CHALMERS, K.; REED, R. H. The role of trehalose in dehydration resistance of *Saccharomyces cerevisiae*. **FEMS Microbiology Review**, **48**: p.249-254, 1987.

GEHRKE, H. H.; PRALLE, K.; DECKWER, W. D. Freeze drying of microorganisms - Influence of cooling rate on survival. **Food Biotechnology**, **6**(1): p. 35-49, 1992.

GÉLINAS, P.; LAGIMONIERE, M.; DUBORD, C. Baker's yeast sampling and frozen dough stability. **Cereal Chemistry**, **70**: p.219-225, 1993.

GÉLINAS, P.; DEAUDELIN, I.; GRENIER, M. Frozen dough: Effects of dough shape, water content and sheeting-molding conditions. **Cereal Food World**, **40**(3): p.124-126, 1995.

HIMMELSTEIN, A. Enzyme treatment of flour. Will it help frozen and retarded dough? **Baker Digest**, **58**(5): p.8-12. 1984.

HINO, A.; TAKANO, H.; TANAKA, Y. New freeze-tolerant yeast for frozen dough preparations. **Cereal Chemistry**, **64**: p.269-275, 1987.

HINO, A.; MIHARA, K.; NAKASHIMA, K.; TAKANO, H. Trehalose levels and survival ratio of freeze-tolerant versus freeze-sensitive yeasts. **Applied and Environmental Microbiology**, **56**: p.1386-1391, 1990.

HIRASAWA, R.; YOKOIGAWA, K.; ISOBE, Y.; KAWAI, H. Improving the freeze tolerance of baker's yeast by loading with trehalose. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, **65** (3): 522-526, 2001.

HOSOMI, K.; NISHIO, K.; MATSUMOTO, H. Studies on frozen dough baking. I. Effects of egg yolk and sugar ester. **Cereal Chemistry**, **69**: p.82-92, 1992.

- HOTTINGER, T.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A. Rapid changes of heat and desiccation tolerance correlated with changes of trehalose content in *Saccharomyces cerevisiae* cells subjected to temperature shifts. **FEBS Letters**, **220**: p.113-115, 1987.
- INOUE, Y.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. I. Effects of frozen storage and freeze-thaw cycles on baking and rheological properties. **Cereal Chemistry**, **68**: p.627-631, 1991.
- INOUE, Y.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. II. Flour quality requirements for bread production from frozen dough. **Cereal Chemistry**, **69**: p.423-428, 1992.
- INOUE, Y.; SAPIRSTEIN, H. D.; TAKAYANAGI, S.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. III. Some factors involved in dough weakening during frozen storage and thaw-freeze cycles. **Cereal Chemistry**, **71**: p.118-121, 1994.
- INOUE, Y.; SAPIRSTEIN, H. D.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. IV. Effect of shortening systems on baking and rheological properties. **Cereal Chemistry**, **72(2)**: p. 221-226, 1995.
- LU, W.; GRANT, L. A. Effect of prolonged storage at freezing temperatures on starch and baking quality of frozen doughs. **Cereal Chemistry**, **76 (5)**: p. 656-662, 1999.
- MACKENZIE, K. F.; SINGH, K. K.; BROWN, A. D. Water stress plating hypersensitivity of yeast: Protective role of trehalose in *Saccharomyces cerevisiae*. **Journal of Genetic Microbiology**, **134**: p.1661-1666, 1988.
- MÉRIC, L.; LAMBERT-GUILOIS, S.; NEYRENEUF, O.; RICHARD-MOLARD, D. Cryoresistance of Baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* in frozen dough: Contribution of cellular trehalose. **Cereal Chemistry**, **72(6)**: p. 609-615, 1995.
- MURAKAMI, Y.; HAHN, Y. S.; YOKOIGAWA, K.; ENDO, K.; KAWAI, H. Induction of freeze-sensitive mutants from a freeze-tolerant yeast *Torulaspora delbrueckii*. **Bioscience, Biotechnology & Biochemistry**, **58(1)**: p. 206-207, 1994.

- NEMETH, L. J.; PAULLEY, F. G.; PRESTON, K. R. Effects of ingredients and processing conditions on the frozen dough bread quality of a Canada Western Red Spring Wheat flour during prolonged storage. **Food Research International**, 29(7): p. 609-616, 1996.
- ODA, Y.; UNO, K.; OHTA, S. Selection of yeasts for breadmaking by the frozen-dough method. **Applied Environmental Microbiology**, 52: p.941-943, 1986.
- REID, D. S. Fundamental physicochemical aspects of freezing. **Food Technology**. April, 1983.
- SALAS-MELLADO, M. M. **Efeito de algumas variáveis do processo de panificação de massa congelada na estabilidade da massa estocada e na qualidade do pão.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 1992.
- SANDERSON, G. W. Yeast products for the baking. **Cereal Foods World**, 30(11): p. 770-774, 1985.
- SMEWING, J. **The measurement of dough and gluten extensibility using the SMS/Kiefer rig and the TAXT2 Texture Analyser.** Surrey, SMS Ltd., 1995.
- THEVELEIN, J.M. Regulation of trehalose mobilization in fungi. **Microbiology Review**, 48: p. 42-59, 1984.
- VAN DAM, H. W.; HILLE, D. R. Yeast and enzymes in breadmaking. **Cereal Foods World**, 37(3): p. 245-251, 1992.
- VAN DER PLAAT, J. B. Cyclic 3', 5'-adenosine monophosphate stimulates trehalose degradation. **Biochemistry Biophysics Research Committee**, 56: p.580-587, 1974.
- VAN DIJCK, P.; COLAVIZZA, D.; SMET, P.; THEVELEIN, J. M. Differential importance of trehalose in stress resistance in fermenting and non fermenting *Saccharomyces cerevisiae* cells. **Applied and Environmental Microbiology**, 61(1): p. 109-115, 1995.

- VAN LAERE, A. Trehalose. Reserve and / or stress metabolite? **FEMS Microbiology**, **63**: p.201-210, 1989.
- VIEIRA, S.; HOFFMANN, R. **Estatística Experimental**. São Paulo, Atlas. 1996.
- WANG, Z. J.; PONTE, J. G. Jr. Improving frozen dough qualities with the addition of Vital wheat gluten. **Cereal Foods World**, **39**(7): p.500-503, 1994.
- WANG, Z. J.; PONTE, J. G. Jr. Storage stability of gluten-fortified frozen dough. **Cereal Foods World**, **40**(11): p.827-831, 1995.
- WOLT, M. J.; D'APPOLONIA, B. L. Factors involved in the stability of frozen dough. II. The effect of yeast type, flour type, and dough additives on frozen-dough stability. **Cereal Chemistry**, **61**: p.213-221, 1984.
- ZOUNIS, S.; QUAIL, K. J.; WOOTON, M.; DICKSON, M. R. Studying frozen dough structure using low temperature scanning electron microscopy. **Journal of Cereal Science**, **35**: p. 135-147, 2002.

CAPÍTULO III. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO PESO DA BISMAGA NA QUALIDADE PANIFICÁVEL DA MASSA CONGELADA EM CÂMARA CRIOGÊNICA

RESUMO

Este trabalho consistiu na aplicação do sistema criogênico, que utiliza nitrogênio líquido, para congelar massas de pão e verificar a influência do congelamento na qualidade da massa congelada e do pão. Para isto, realizaram-se uma série de oito experimentos, variando a temperatura de congelamento (-30° e -50° C) e o tamanho da bismaga (80 e 175 g), em duas condições de trabalho do congelador criogênico (com e sem ventilação). Foram analisadas as características reológicas da massa, as características tecnológicas do pão e a viabilidade e capacidade de produção de CO_2 pelas leveduras na massa não congelada e após 1 dia, 15 dias e 50 dias de estocagem sob congelamento a -18° C. A análise estatística dos resultados permitiu verificar que houve uma influência maior da temperatura do que do peso da bismaga na qualidade da massa e do pão. Para a condição de congelamento “com ventilação”, verificou-se uma influência positiva na massa e no pão com as temperaturas próximas de -30° C e para a bismaga de 80 g. Para a condição “sem ventilação”, a temperatura de congelamento de -30° C e a bismaga de 175 g se apresentaram benéficas para o desempenho de panificação das massas estudadas, não sendo esta uma condição viável para congelamentos industriais pelo alto consumo de agente refrigerante. Realizou-se também um grupo de experimentos para estudar a influência do tempo de armazenamento sobre a qualidade do pão e da massa, tomando como referência a massa não congelada. Todas as características da qualidade da massa e do pão foram prejudicadas ao longo do armazenamento de 50 dias.

ABSTRACT

This work consisted in the application of cryogenic system to freeze bread doughs to verify the influence of freezing conditions on the frozen dough and bread quality. For these purpose, a group of experiments in cryogenic freezer were realized, varying the freezing temperature (-30 and -50° C), dough piece weight (80 and 175 g) and two work conditions for the cryogenic equipment (with and without “ventilation”). Rheological dough characteristics, technological bread score, yeast viability and CO₂ volume produced by yeast in non-freeze dough and after 1, 15 and 50 days of frozen dough storage at -18° C were measured. Statistical analysis of results showed a greater influence of freezing temperature than dough piece weight over the dough and bread quality. For the condition “with ventilation”, a freezing temperature of -30° C and 80 g weight dough piece showed the best baking performance in these group of experiments. For the condition “without ventilation”, a freezing temperature of -30° C and weight dough piece of 175 g showed the lowest baking quality damage, whereas, this is not a adequate work condition for industrial purposes due to the high consume of refrigerant agent. A group of experiments were carried out for the study of the influence of storage time over the quality of the bread and dough considering the non-frozen dough as standard reference. All the quality characteristics of dough and bread in the course of the frozen storage of 50 days were damaged.

3.1. INTRODUÇÃO

Os dois sistemas básicos de congelamento que estão disponíveis comercialmente são o processo criogênico, que envolve o uso de nitrogênio líquido, e a refrigeração mecânica por correntes de ar forçado (Brümmer, 1995). Na indústria de massas congeladas para fabricação de pão, proteger as células de levedura contra os efeitos do congelamento, é o principal foco de atenção. Para tanto, o congelamento lento num congelador convencional é preferido tecnologicamente no lugar do uso de criogênicos, que proporcionam um resfriamento muito mais rápido, prejudicial à sobrevivência das leveduras na massa.

A determinação das condições ótimas para o congelamento da massa é um equilíbrio entre otimizar a viabilidade das células e minimizar o dano à estrutura da massa. Tem se demonstrado que o congelamento lento a -20°C é melhor para a viabilidade da levedura que o congelamento a -40°C (Hsu *et al.*, 1979; Lehman e Dreese, 1981). Contudo, sabe-se que congelamentos lentos aumentam os problemas de enfraquecimento da massa e tempos de fermentação (Varriano-Marston *et al.*, 1980).

Estudos de Mazur (1967, 1970), Mazur e Schmidt (1968), Nei (1964) e Nei *et al.* (1967), sobre a preservação de microrganismos pelo congelamento, demonstraram que as velocidades de congelamento e de descongelamento afetam a viabilidade das leveduras. Acredita-se que o congelamento lento permite às células ajustar seu meio ambiente pela transferência da água intracelular ao gelo externo. O congelamento rápido, por outro lado, causa congelamento intracelular devido à mudança de temperatura mais rápida que à permeação de água pelas membranas celulares. Os pequenos cristais de gelo formados durante o congelamento intracelular podem recristalizar formando grandes cristais de gelo durante o descongelamento, sendo letais às células de levedura.

Kulp (1995), em estudos da estabilidade do glúten em massas congeladas, sugeriu que as reações físicas e químicas que acontecem durante o congelamento e a estocagem sob

congelamento, são o resultado da formação de gelo e das interações massa-levedura. A formação de gelo é geralmente responsável pela interrupção física das ligações secundárias das proteínas na massa e nas células de levedura. A perda das ligações secundárias resulta na alteração da ordem conformacional das moléculas de proteína, afetando adversamente as propriedades funcionais da massa.

Os problemas de retenção de gás que resultam da formação de cristais de gelo e que se referem à danificação sofrida pela rede tridimensional de glúten, já foram estudadas por Berglund *et al.* (1991) e Varriano-Marston *et al.* (1980).

Bender e Lamb (1977) estudaram o efeito da velocidade de congelamento e a temperatura de estocagem na atividade gaseificante das leveduras em massas descongeladas. Eles informaram que o aumento da velocidade de congelamento de 0,05 para 0,5 °C/min causou uma redução na atividade das leveduras durante a estocagem.

Quando a produção de gás pelas leveduras e as características tecnológicas do pão foram medidas em massas congeladas a diferentes temperaturas (-30, -20 e -10 °C) e diferentes velocidades de ar da câmara de congelamento (1 e 3 m/s), o procedimento realizado a -20 °C com velocidade de ar de 3 m/s utilizado por El-Hady *et al.* (1996) foi o que apresentou melhor desempenho na panificação.

Neyreneuf e Delpuech (1993) compararam o congelamento mecânico convencional a -40 °C com congelamento criogênico, utilizando temperaturas de ar da câmara de -40 a -120 °C no congelamento de retângulos de massa; concluíram que o congelamento criogênico a -60 °C obteve os melhores resultados em termos de volume do pão, após três meses de estocagem a baixas temperaturas. Eles também observaram que velocidades de congelamento criogênico de 0,797 e 0,918 °C/min não afetaram a qualidade do pão quando foram comparadas à velocidade de 0,348 °C/min no congelador mecânico. Velocidades superiores de congelamento produziram uma queda gradual do volume do pão, resultando em uma redução de até 49 % do volume do pão comparado com a massa não congelada. Eles consideraram, portanto, que selecionando o congelamento criogênico em condições

estritamente controladas, consegue-se um ganho em produtividade, diminuição do tempo de congelamento de 66 minutos e 49 segundos, sem afetar o desempenho da panificação.

Devido à falta de trabalhos de pesquisa que tenham utilizado o sistema criogênico para congelar produtos de panificação, pensou-se estudar a influência deste sistema nos produtos de panificação, com a finalidade de dar um subsídio às indústrias interessadas em aplicar métodos rápidos de congelamento.

O objetivo deste capítulo foi estudar o efeito das temperaturas criogênicas e do tamanho da bismaga de massa em condições com e sem ventilação, na qualidade da massa, na sobrevivência e capacidade de produção de CO₂ pelas leveduras e nas características tecnológicas do pão.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Material

3.2.1.1. Matéria-prima

Foi utilizada farinha de trigo especial de força média a forte, com 13,2 % de umidade e características farinográficas (absorção de água de 60,1%; tempo de chegada de 1,5 minutos; tempo de desenvolvimento da massa igual a 7,5 minutos; estabilidade de 10 minutos; tempo de saída igual a 11,5 minutos; índice de tolerância igual a 40 UF); características extensigráficas (90 minutos de fermentação, resistência à extensão igual a 550 UE; resistência máxima de 750 UE; extensibilidade de 135 mm; número proporcional igual a 4,07) e características alveográficas [trabalho de deformação (W) igual a 294×10^{-4} Joules, índice de insuflação (G) de 193 cm³ e P/L de 1,37].

3.2.1.2. Ingredientes e reagentes

Foram utilizados os seguintes ingredientes e reagentes:

- Fermento: fermento biológico (*Saccharomyces cerevisiae*) seco instantâneo marca Fleischmann Royal Ltda. para massa doce e outro para massa salgada;
- Ácido ascórbico marca Merck;
- Monooleato de sorbitana (polissorbato 80) fornecido pela indústria Oxiteno S/A;
- Glúten de trigo marca Vitem fornecido pela indústria Rhodia S/A;
- D+Trealose di-hidratada de *Saccharomyces cerevisiae* marca Sigma;
- Ágar batata dextrose marca Merck;
- Gordura vegetal hidrogenada marca Saúde da indústria Gessy Lever Ltda.;
- Sal e açúcar adquiridos no comércio local.

3.2.1.3. Equipamentos

Neste trabalho foram utilizados os equipamentos listados a seguir:

- Amassadeira automática espiral com duas velocidades marca Hypo modelo H1E10;
- Cortadora marca Hypo modelo DV2560;
- Modeladora marca Hypo;
- Câmara criogênica (mini freezer) com as seguintes dimensões: altura 1.313 mm, profundidade 1.780 mm, largura 1.148 mm, provido de 14 bandejas perfuradas e acoplada a um tanque de nitrogênio, cedido pela indústria White Martins Gases Industriais. O equipamento é constituído por: um painel de controle com instrumentação, para monitoração e controle do congelamento do produto; por sistema de controle de vazão de nitrogênio, composto por válvulas solenóides de segurança e limitadora de fluxo e com um ventilador para circular os gases frios provenientes da vaporização do nitrogênio líquido (Figura 3.1);

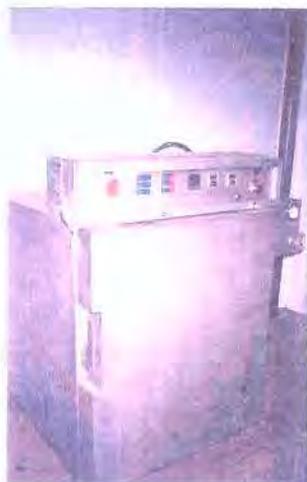


Figura 3.1. Mini freezer criogênico

- Termopares de cobre constantan;
- Sistema de aquisição de dados: O sistema utilizado foi o descrito por Resende (2000) que consistiu em um sistema que possui uma chave eletrônica seletora de canais composta de placas contendo canais com configuração de contato bipolar para termopares e um canal destinado à junta fria;
- Congelador comum vertical de laboratório, com temperatura média igual a -18 ± 1 °C;
- Cabine do extensígrafo com temperatura controlada de 30° C;
- Estufa retilínea Fanem a 45°C;
- Câmara incubadora Fanem modelo 347CD;
- Capela de fluxo laminar marca Veco;
- Homogeneizador de laboratório Stomaker 400;
- Incubadora Fanem modelo 347M;
- Lupa com luz marca Hellige;
- Forno de micro-ondas com prato giratório da marca Brastemp;
- Autoclave vertical marca Favve;
- Analisador de textura TAXT2 (Texture Technologie Corp. Scarsdale NY/ Surrey Stable Microsystems, SMS, Godalming, Surrey, UK);

- Reofermentômetro marca Chopin modelo F3 da indústria Chopin S/A, Group Tripette e Renane, Villeneuve, La Garenne, France);
- Forno elétrico de bancada marca Lyar da indústria J. Rial e Cia Ltda.;
- Cortadora elétrica da marca Siam Util.

3.2.2. Métodos

3.2.2.1. Formulação e preparo da massa

A formulação básica de pão tipo francês, escolhida após o estudo da formulação é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Formulação básica de pão tipo francês.

Ingredientes	Quantidade
Farinha	100 %
Água	Absorção farinográfica -2 %
Fermento instantâneo	1,3 %
Sal	2 %
Açúcar	2 %
Gordura	2 %
Polissorbato 80	0,3 %
Vitamina C	120 ppm
Glúten Vital	4 %
Trealose	10 % (b. s. massa levedura)

Os ingredientes secos da formulação básica foram colocados no recipiente da amassadeira e misturados por 2 minutos em velocidade lenta, a seguir foi adicionada água misturada com gelo, continuando a mistura por 2 minutos na velocidade lenta, adicionou-se então a gordura e procedeu-se a mistura com velocidade rápida por 4 minutos até o completo desenvolvimento do glúten, obtendo assim uma massa com temperatura não superior a 22° C,

que foi cortada no tamanho adequado de bisnaga. Após o corte, os pedaços de massa foram moldados e as bisnagas acondicionadas em bandejas apropriadas ao equipamento onde foi efetuada a operação de congelamento.

3.2.2.2. Dimensões das bisnagas de massa

As bisnagas obtidas após o corte da massa, cujo peso foi previamente definido por planejamento experimental apresentaram as dimensões mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Dimensões* das bisnagas de massa de pão antes do congelamento.

Peso (g)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
80	30	97,5
127,5	36	104
175	38	110

* Média de 10 medições

Juntamente com a obtenção das bisnagas de massa, foram retiradas em cada ensaio, amostras sem congelar, denominadas de tempo zero, utilizadas como referência no estudo do tempo de armazenamento.

3.2.2.3. Congelamento em câmara criogênica: calibração de termopares e operação de congelamento

Para assegurar a precisão na leitura de tensão pelos termopares, foram utilizados banhos criostáticos contendo solução de 50% (v/v) de etanol e água, com as temperaturas dos banhos ajustadas de forma a proporcionar uma calibração dentro da faixa de temperatura de atuação dos termopares inseridos na massa e dos colocados para medição da temperatura do ar. As curvas de calibração foram traçadas mantendo os termopares nos banhos a temperatura constante, anotando as temperaturas obtidas pelos termopares e referidas como temperatura real e as leituras dos banhos acompanhadas por termômetros padrões (ASTM, USA). Os ensaios cobriram a faixa de temperatura especificada para o processo compreendido entre +20

e -50°C . As curvas de calibração foram obtidas por regressão linear da relação temperatura lida versus temperatura real.

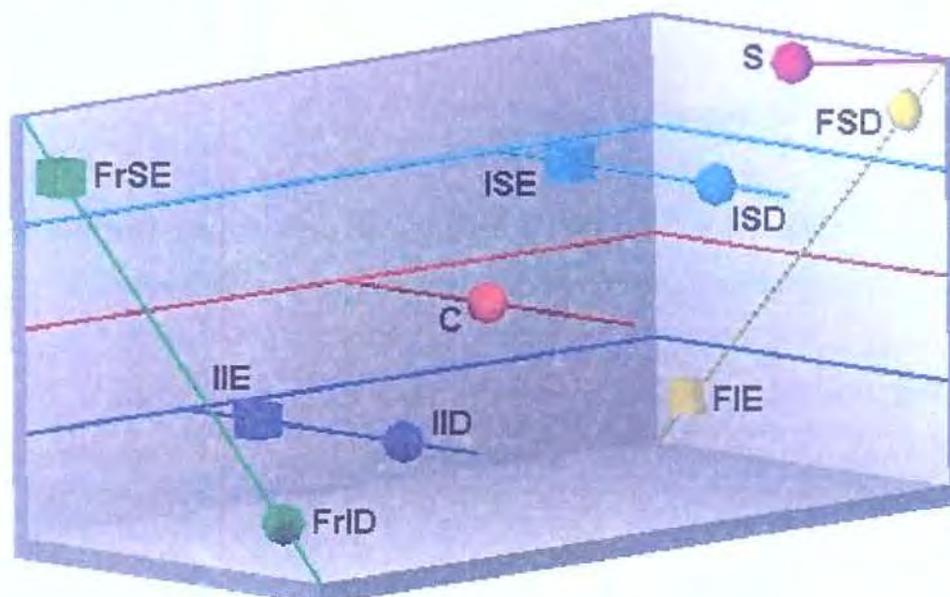


Figura 3.2. Câmara criogênica

As bandejas com as bisnagas distribuídas uniformemente foram levadas até a câmara criogênica estabilizada na temperatura da experiência. Foram inseridos os termopares que fariam o registro da temperatura para obter as curvas de congelamento e fixar o ponto final da operação. Colocou-se termopares no sentido radial: perto da superfície, na zona intermediária e no centro da bisnaga, para o cálculo posterior das velocidades e tempos de congelamento. A posição dos termopares colocados nos diferentes pontos dentro do congelador é mostrada na Figura 3.2, e a localização e a respectiva legenda, apresentada na Tabela 3.3.

3.2.2.4. Armazenamento

As bisnagas de massa congelada foram acondicionadas em sacos de polietileno, fechados e estocados em congelador comum de laboratório a uma temperatura de -18°C durante 50 dias.

3.2.2.5. Descongelamento e fermentação

Para realizar as determinações de qualidade na massa, as bisnagas foram descongeladas em cabine a 30° C até a temperatura central de 20° C. A fermentação das massas para elaboração do pão foi realizada no mesmo equipamento durante 1 hora e 35 minutos.

Tabela 3.3. Localização e legenda dos termopares distribuídos na câmara criogênica.

Termopar	Localização	Sigla
T2	Intermediário inferior direita	IID
T4	Intermediário inferior esquerda	IIE
T6	Fundo superior direita	FSD
T7	Intermediário superior direita	ISD
T10	Intermediário superior esquerda	ISE
T12	Centro	C
T13	Frente inferior direita	FrID
T14	Frente superior esquerda	FrSE
T15	Fundo inferior esquerda	FIE
T17	Perto do sensor	S

3.2.2.6. Avaliação da qualidade da massa

3.2.2.6.1. Determinação das leveduras viáveis

Uma porção de 25 g de massa descongelada e 225 mL de água peptonada foram homogeneizadas durante 120 segundos em homogeneizador. A suspensão da massa foi submetida a diluições seriadas e uma alíquota de 1 mL foi semeada em agar batata dextrose, sendo o pH ajustado com ácido tartárico até o valor de 3,5. As placas foram incubadas a 30° C durante no mínimo, 72 horas, realizando-se a contagem naquelas que apresentaram entre 30 e 300 colônias. O resultado obtido foi expresso como unidades formadoras de colônias por grama de massa (UFC/g) conforme Salas-Mellado (1992).

3.2.2.6.2. Determinação da microextensibilidade

Uma porção de 25 g de massa descongelada foi colocada em bloco de teflon que foi preparado colocando fitas de teflon não adesivas (2 x 60 mm) cobertas com óleo mineral nas canaletas do bloco. A parte superior do bloco foi ajustada mediante pressão, permitindo a distribuição da massa nas canaletas para fornecer fitas de massa da mesma geometria. Deixou-se a massa equilibrando por 15 minutos a 30° C e 90% de UR, a seguir, fitas individuais de massa foram retiradas do suporte de teflon e posicionadas no analisador de textura TAXT2, realizando-se a medição nas seguintes condições de trabalho, segundo Smewing (1995):

- Sonda: Gancho para microextensibilidade;
- Velocidade de pré teste de 2,0 mm/s;
- Velocidade de teste de 3,3 mm/s;
- Velocidade de pós teste de 10 mm/s;
- Distância de 75 mm;
- Trigger Force de 5 g;
- Velocidade de aquisição de dados de 50 pps.

De cada amostra de massa foram realizadas 10 medições de extensibilidade. O parâmetro registrado foi a área da curva média expressa em g-f/mm, que representa a força de deformação da massa. Uma curva de força/distância de medida de extensibilidade típica se mostra na Figura 3.3.

3.2.2.6.3. Determinação da altura da massa e do volume de CO₂ produzido pelas leveduras

A medida da altura da massa e do volume de CO₂ produzido pelas leveduras foi realizada no reofermentômetro Chopin F3, que permite avaliar a capacidade de fermentação da massa e a qualidade da rede protéica que suporta a massa durante a panificação.

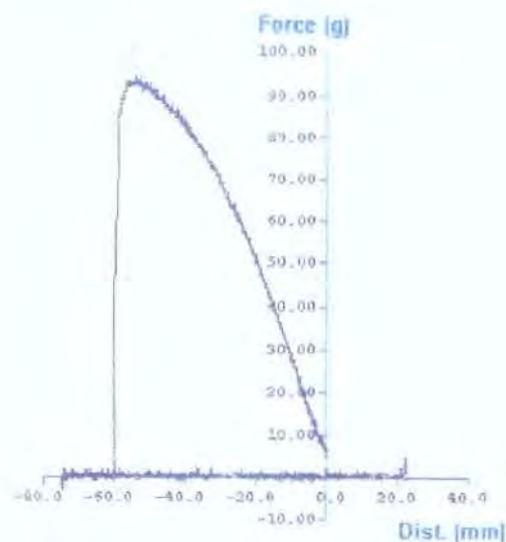


Figura 3.3. Curva de extensibilidade da massa determinada em texturômetro TAXT2 da SMS.

O método de análise consistiu em colocar uma porção de 315 g de massa descongelada no recipiente do aparelho, em seguida foi colocado um peso de 2.000 g em cima da massa, de tal maneira que o pistão que suporta o peso, conectado a um sensor de deslocamento, foi registrando a altura da massa e o aumento da pressão na massa que estava fermentando. Como resultado, obtiveram-se, ao fim do ciclo de 3 horas, duas curvas: a de desenvolvimento da massa cujo parâmetro utilizado foi a altura máxima (Hm) expressa em mm, considerada a tolerância durante a fermentação ou resistência da estrutura protéica, e a de liberação gasosa, que indica a liberação de CO₂ pelas leveduras, registrando o volume total de gás produzido durante a fermentação, expresso em mL.

Um gráfico com as curvas de desenvolvimento da massa e liberação de CO₂ é mostrado na Figura 3.4.

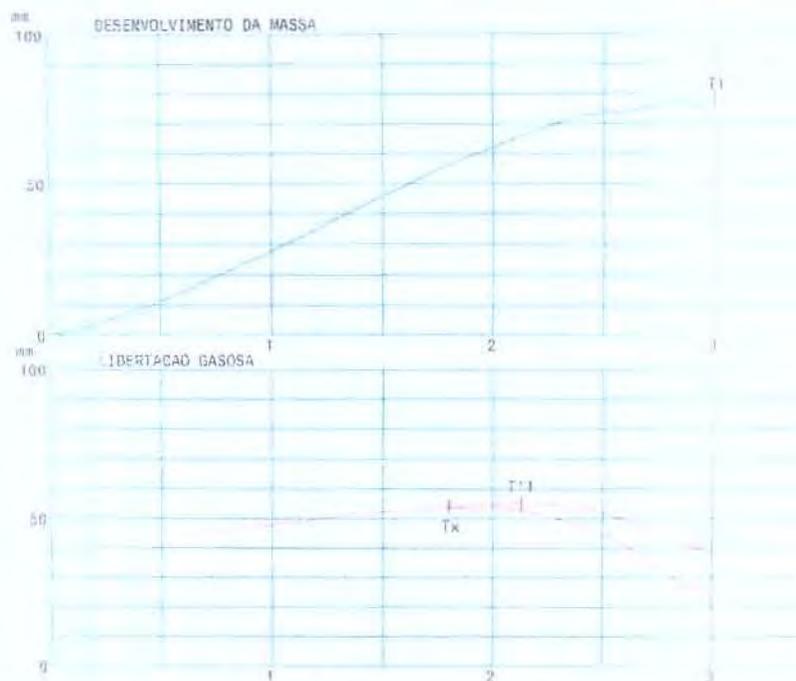


Figura 3.4. Curvas de desenvolvimento da massa e liberação gasosa determinadas no reofermentômetro Chopin F3.

3.2.2.7. Elaboração e avaliação da qualidade do pão

3.2.2.7.1. Elaboração do pão

As bisnagas de massa descongeladas foram colocadas em fôrmas de alumínio, untadas e deixadas fermentar durante 95 min em cabine de fermentação a 30° C, a seguir forneadas a 220° C durante 20 min em forno elétrico. Os pães foram retirados do forno e resfriados por 1 hora à temperatura ambiente.

3.2.2.7.2. Determinação do volume específico do pão

Determinou-se o volume aparente do pão por deslocamento de sementes de painço e o peso mediante balança analítica. O volume específico foi determinado pela relação volume / peso e expresso em cm^3/g .

3.2.2.7.3. Determinação do escore do pão

Os pães foram avaliados pelas características externas e internas segundo planilha de El Dash (1978), em Anexo 1, para pão de forma, por não existir metodologia oficial para avaliação do pão tipo francês. As notas conferidas a cada característica foram registradas e a contagem total foi designada como escore do pão.

3.2.2.7.4. Determinação da dureza do miolo

A partir dos pães resfriados e cortados, foram selecionadas duas fatias centrais de 20 mm de espessura, que foram submetidas ao teste de dureza no Analisador de Textura TAXT2. O teste consistiu na compressão de duas fatias de pão, nas seguintes condições de trabalho:

- Diâmetro da sonda de 25 mm;
- Velocidade Pré Teste de 2 mm/s;
- Velocidade Teste de 1 mm/s;
- Velocidade Pós Teste de 10 mm/s;
- Distância de 9,4 mm;
- Trigger Force de 5 g;
- Velocidade de aquisição de dados igual a 50 pps.

O parâmetro avaliado foi a dureza do miolo, que corresponde ao pico da curva de força versus tempo (g-f/s). Uma curva típica de firmeza de pão, obtida no analisador de textura é apresentada na Figura 3.5.

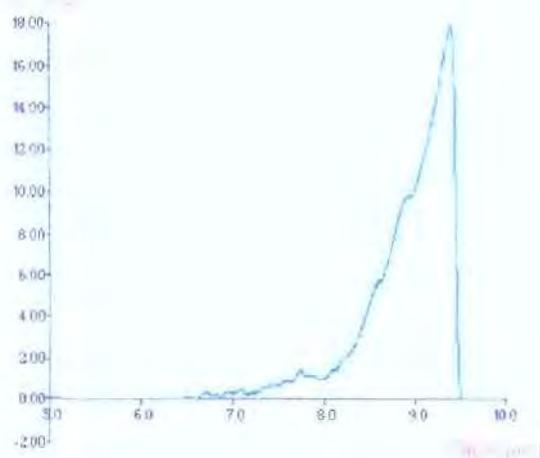


Figura 3.5. Curva de dureza do miolo do pão determinada no texturômetro

3.2.2.8. Planejamento experimental e avaliação estatística dos resultados

Uma vez escolhidas as variáveis independentes e as variáveis resposta, foi realizado um desenho experimental, optando-se por um planejamento fatorial de 2 níveis (2^2), conforme metodologia de Box *et al.* (1968) e Barros Neto *et al.* (1996). Foram realizados 12 ensaios no congelador criogênico, conforme matriz de planejamento apresentada na Tabela 3.4.

As variáveis independentes foram temperatura e peso da bisnaga. Pelas possibilidades operacionais da câmara criogênica, trabalhou-se em 2 condições: com ventilação e sem ventilação.

Tabela 3.4. Matriz de planejamento geral.

Ensaio	Níveis			Valor Real	
	Ventilação	Temperatura	Peso bisnaga	Temperatura (° C)	Peso bisnaga (g)
C1	Com	+1	+1	-30	175
C2	Sem	+1	+1	-30	175
C3	Com	-1	+1	-50	175
C4	Sem	-1	+1	-50	175
C5	Com	+1	-1	-30	80
C6	Sem	+1	-1	-30	80
C7	Com	-1	-1	-50	80
C8	Sem	-1	-1	-50	80
C9	Com	0	0	-40	127,5
C10	Com	0	0	-40	127,5
C11	Sem	0	0	-40	127,5
C12	Sem	0	0	-40	127,5

As variáveis dependentes ou resposta estudadas foram:

(i) Na massa:

- Força da massa (F, g-f/mm) corresponde à área da curva média medida como força x distância obtida nas análises de microextensibilidade;

- Altura da massa (H, mm) corresponde à altura máxima da curva de desenvolvimento da massa obtida no reofermentômetro;

- Contagem de leveduras (L, UFC/g) corresponde ao número de leveduras viáveis presentes por grama de massa;

- Volume de CO₂ (CO₂, mL) corresponde ao volume de dióxido de carbono produzido pelas leveduras medido no reofermentômetro.

(ii) No pão:

- Escore tecnológico (E) é o somatório das notas conferidas pelas características tecnológicas do pão;

- Volume específico (Vesp, cm³/g) é a relação entre o volume aparente e o peso do pão;
- Dureza do pão (D, g-f) corresponde ao pico da curva força x tempo obtida nas análises de textura do pão.

A análise estatística dos resultados, obtidos nos experimentos lineares C1 a C8 da matriz de planejamento da Tabela 3.4, permitiu realizar a **análise dos efeitos**, para verificar a influência das variáveis **temperatura do ar** e **peso da bisnaga de massa** nas variáveis resposta nos tempos de armazenamento de 1, 15 e 50 dias.

3.2.3. Estudo do tempo de armazenamento

Para descrever o efeito do tempo de armazenamento sobre as características da massa e do pão, foram escolhidos 5 ensaios realizados na câmara criogênica e cujas condições são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Condições dos congelamentos realizados na câmara criogênica para o estudo do tempo de armazenamento.

Ensaio	Temperatura (° C)	Peso bisnaga (g)	Ventilação
CA1	-57	175	Com
CA2	-50	175	Com
CA3	-40	175	Com
CA4	-30	175	Com
CA5	-23	175	Com

CA = Congelamento criogênico para o estudo do tempo de armazenamento.

O procedimento de elaboração da massa, congelamento e metodologia analítica para avaliação da qualidade da massa e do pão, foi o apresentado no item 3.2.2. Os parâmetros avaliados foram força da massa (F), altura da massa (H), número de leveduras viáveis (L),

volume de CO₂ produzido pelas leveduras (VolCO₂), escore do pão (E), volume específico do pão (Vesp) e dureza do pão (D), de amostras retiradas nos tempos 1, 15 e 50 dias de armazenamento sob congelamento.

Para a verificação da influência do armazenamento foram calculados índices de perda ou ganho de cada característica avaliada tomando a massa não congelada como referência, e expressos como porcentagem, permitindo a elaboração de gráficos que relacionem a porcentagem de perda ou ganho para cada parâmetro avaliado nos 3 tempos de armazenamento sob congelamento.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Obtenção das curvas de congelamento

As curvas de congelamento criogênico correspondentes aos ensaios lineares mostrados na matriz de planejamento da Tabela 3.4 estão apresentadas no Anexo 2. Como exemplo, são apresentadas as curvas obtidas em um congelamento **com ventilação** (Figura 3.6) e **sem ventilação** (Figura 3.7) para comparar ambas condições e as temperaturas da câmara.

As curvas apresentam o comportamento típico de curvas de congelamento de produtos alimentícios, com uma primeira fase de pré-resfriamento, seguido do patamar que corresponde à mudança de fase e a terceira fase, de têmpera ou resfriamento final.

O fato mais notável quando se compara as condições com e sem ventilação é a concordância das temperaturas lidas com os termopares dentro da câmara criogênica, quando se utiliza o ventilador (condição com ventilação) e a falta dessa característica, quando o ventilador foi desligado (condição sem ventilação).

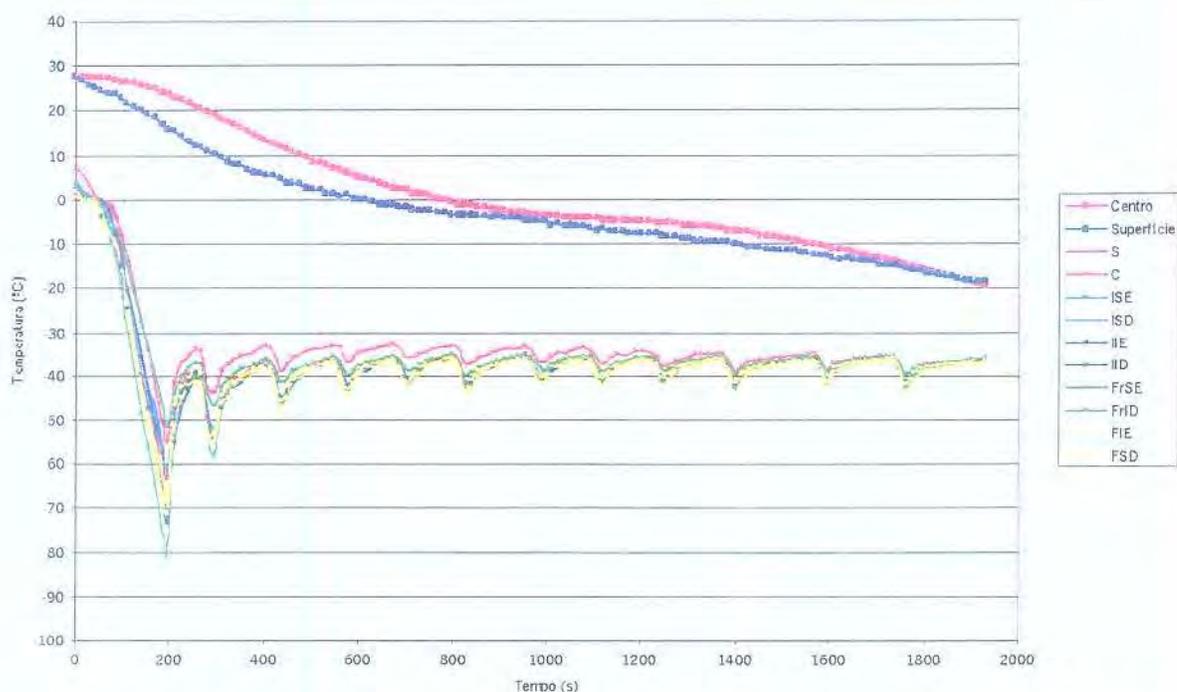


Figura 3.6. Histórico das temperaturas do produto e do meio no congelamento criogênico com ventilação

Observando as curvas geradas pelos termopares colocados em diferentes posições no armário criogênico (S, C, ISE, ISD, IIE, IID, FrSE, FrID, FIE e FSD) na condição “com ventilação” (Figura 3.6), nota-se que, quando as massas foram colocadas dentro do armário houve uma queda substancial da temperatura, pela entrada de uma quantidade grande de nitrogênio, nos primeiros duzentos segundos, dependendo da posição do termopar e após uma tendência à estabilização, na faixa de -35 a -45° C de maneira “cíclica”, correspondendo à entrada de nitrogênio quando a temperatura aumentou pela transferência de calor da massa ao meio circundante. Embora houve uma oscilação de temperatura entre os diferentes pontos dentro do armário, que foi diminuindo ao longo do congelamento, a faixa foi de, no máximo, 10° C.

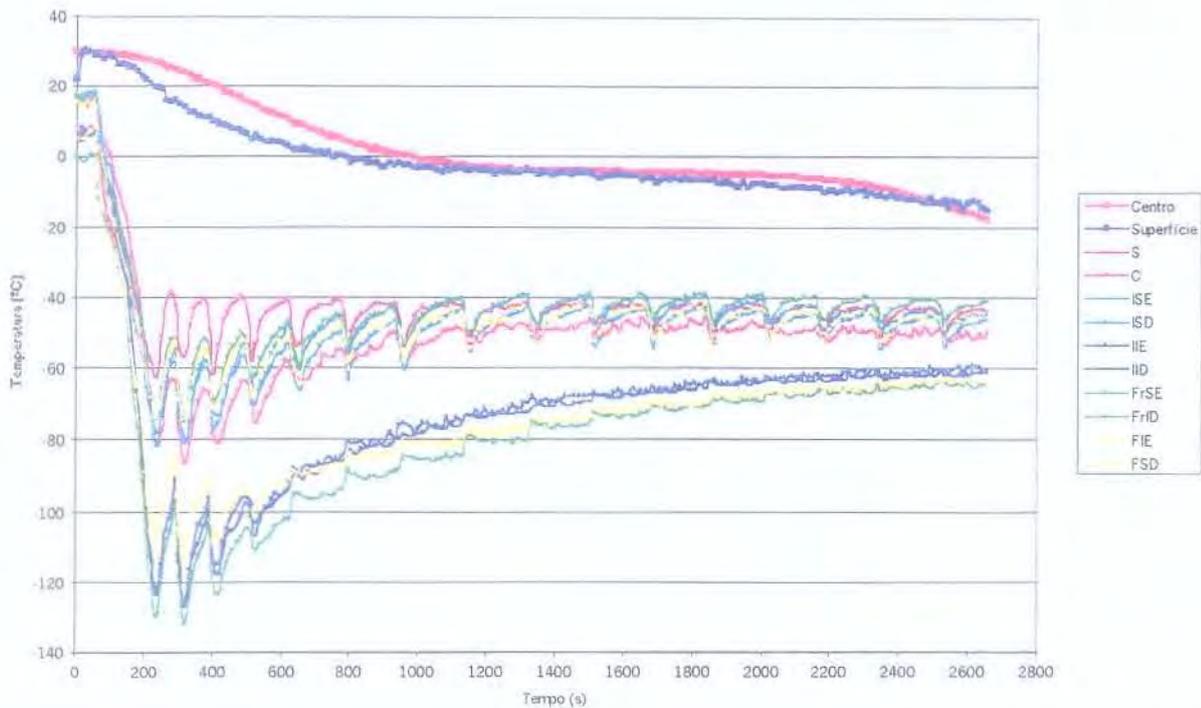


Figura 3.7. Histórico das temperaturas do produto e do meio no congelamento criogênico sem ventilação

Os termopares IID, IIE, FrID e FIE, localizados na parte inferior do armário, registraram as temperaturas inferiores, mostrando que foi a zona mais fria, atingindo temperaturas muito baixas nos primeiros seis minutos do processo, que foram aumentando até o fim do congelamento. Os termopares colocados no centro e na zona intermediária superior (FSD, ISD, ISE, C e FrSE) registraram temperaturas superiores nos primeiros minutos, aumentando até -40°C no fim do congelamento. O termopar S, que ficou perto do sensor do termostato, foi o que registrou a maior temperatura na faixa de -45 a -40°C .

A falta de homogeneidade de temperatura apresentada na condição **sem ventilação** (Figura 3.7) leva a prejuízo nas características da massa e do pão, pois as peças de massa foram dispostas ao acaso assim como a amostragem, o que deve ter influído certamente nas respostas avaliadas, o que no caso de uma produção industrial irá se refletir na qualidade do pão. Apesar de saber que o equipamento não trabalha normalmente na condição sem ventilação, optou-se por estudá-la, para verificar seu efeito na qualidade da massa e do pão.

3.3.2. Estudo do efeito das variáveis temperatura e peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão

Os valores obtidos para as variáveis resposta das massas e dos pães e a análise dos efeitos obtida após tratamento estatístico destes valores são apresentados nas Tabelas 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11, para a condição **com ventilação** e nas Tabelas 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17, para a condição **sem ventilação**.

3.3.2.1. Para a condição com ventilação

3.3.2.1.1. Após 1 dia de congelamento

Na Tabela 3.6 são apresentados os resultados obtidos com as massas congeladas em câmara criogênica com ventilação, após 1 dia de congelamento e os respectivos pães elaborados.

Tabela 3.6. Valores das respostas dos congelamentos com ventilação das massas e do pão após 1 dia de armazenamento sob congelamento.

Temp (°C)	Peso (g)	F (g-f/mm)	H (mm)	L (UFC/g)	CO₂ (mL)	E	Vesp (cm³/g)	D (g-f)
-50	80	1.052	67,2	151	1.032,5	73	3,14	230,1
-30	80	1.189	78,3	138	1.215,0	71	3,80	271,3
-50	175	1.251	61,6	70	773,0	55	1,85	1.089,2
-30	175	1.144	76,8	205	1.219,0	71	3,87	273,0

F: força da massa, H: altura da massa, L: número de leveduras viáveis x 10⁵, CO₂: volume de CO₂, E: escore do pão, Vesp: volume específico do pão, D: dureza do miolo do pão.

Os valores apresentados na Tabela 3.6 foram submetidos a tratamento estatístico que analisou os efeitos das variáveis independentes sobre as dependentes. Ao analisar os resultados constatou-se como a temperatura do ar e o peso das bisnagas influíram nas

respostas, o nível de confiança, se houve influencia positiva ou negativa e a magnitude, como mostrado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Análise dos efeitos nas variáveis resposta da massa e do pão dos congelamentos com ventilação após 1 dia de armazenamento sob congelamento

Variável Independente	Efeito	Variável Dependente	Magnitude	Nível Confiança (%)
Temperatura	Positivo	Altura da massa	13 mm	90
Temperatura	Positivo	Volume específico	1,34 cm ³ /g	70

Analisando a Tabela 3.7, pode-se dizer que a temperatura do ar do congelador criogênico afetou positivamente às variáveis altura da massa e volume específico do pão das massas após congelamento e estocagem de 1 dia, enquanto que o peso da bisnaga não teve efeito significativo sobre nenhuma das características estudadas. O aumento da temperatura de -50 para -30° C produziu um aumento de 13 mm na altura da massa e de 1,34 cm³/g no volume do pão (Figura 3.8).

Estes resultados mostraram que após congelamento e estocagem de 1 dia, as características da massa e do pão foram levemente alteradas e que só a temperatura do ar da câmara criogênica influenciou de maneira positiva a altura da massa e o volume do pão, permitindo afirmar que na faixa de temperatura estudada é melhor congelar a massa a -30° C do que a -50° C.

3.3.2.1.2. Após 15 dias de armazenamento sob congelamento

Os valores apresentados na Tabela 3.8 foram submetidos a tratamento estatístico para analisar os **efeitos** da temperatura do ar do armário criogênico e do peso da bisnaga da massa nas variáveis resposta da massa e do pão, após 15 dias de congelamento, obtendo os resultados apresentados na Tabela 3.9.

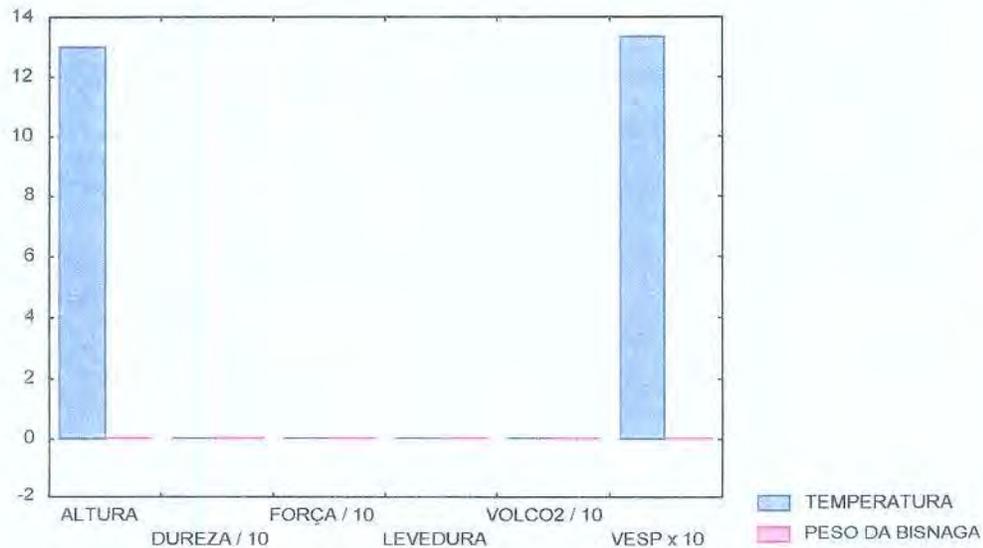


Figura 3.8. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada por 1 dia e dos pães resultantes (VOLCO₂ = volume de CO₂; VOLESP = volume específico do pão)

Tabela 3.8. Valores das respostas dos congelamentos “com ventilação” das massas e do pão após 15 dias de armazenamento sob congelamento.

Temp (°C)	Peso (g)	F (g-f/mm)	H (mm)	L (UFC/g)	CO ₂ (mL)	E	Vesp (cm ³ /g)	D (g-f)
-50	80	1.142,0	55,1	96	698	71,0	2,77	365,7
-30	80	1.102,0	71,0	92	1.156	71,3	3,22	439,0
-50	175	985,3	43,2	56	567	65,5	2,20	1.415,6
-30	175	802,3	77,0	118	1.045	71,0	2,90	407,8

F: força da massa, H: altura da massa, L: número de leveduras viáveis x 10⁵, CO₂: volume de CO₂, E: escore do pão, Vesp: volume específico do pão, D: dureza do miolo do pão.

Tabela 3.9. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 15 dias.

Variável Independente	Efeito	Variável Dependente	Magnitude	Nível Confiança (%)
Temperatura	Positivo	Altura da massa	24,85 mm	76
Temperatura	Positivo	Volume específico	0,575 cm ³ /g	87
Temperatura	Positivo	Volume de CO ₂	468 mm	90
Peso Bisnaga	Negativo	Força da massa	222,8 g-f/mm	80
Peso Bisnaga	Negativo	Volume específico	0,445 cm ³ /g	87
Peso Bisnaga	Negativo	Volume de CO ₂	121 mL	90

Ao observar a Tabela 3.9, constatou-se que com 15 dias de estocagem houve uma influência maior da variável temperatura, afetando de maneira positiva a altura, o volume específico e o volume de CO₂ produzido. Observou-se também a influência negativa do tamanho da bisnaga, sobre a força da massa, o volume específico e o volume de CO₂, como se mostra graficamente no histograma da Figura 3.9.

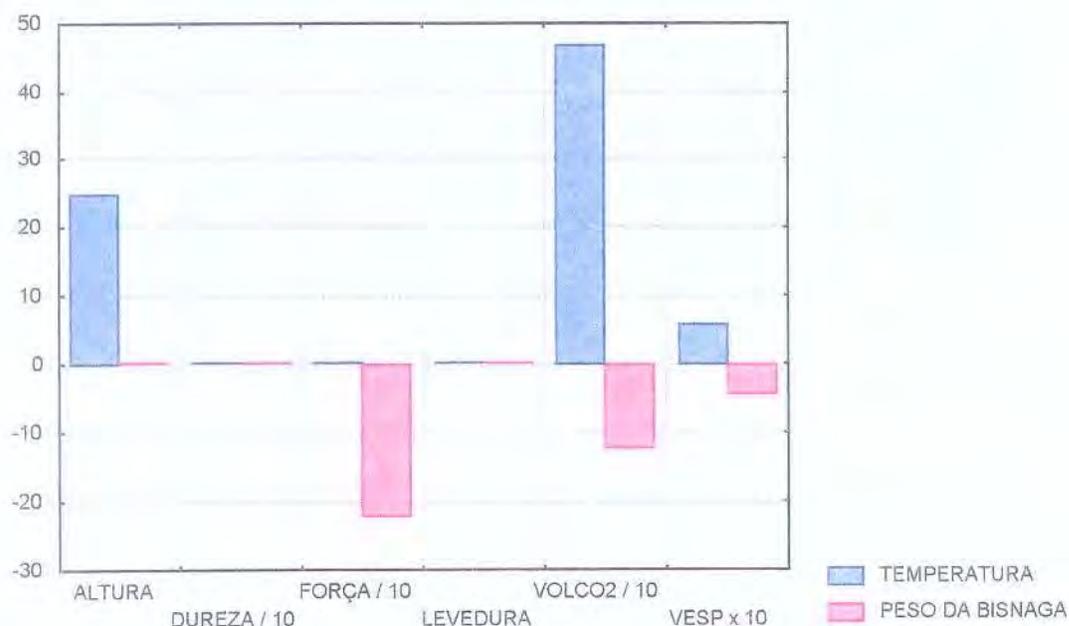


Figura 3.9. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada 15 dias e dos pães resultantes (VOLCO₂ = volume de CO₂; VOLESP = volume específico do pão).

Os resultados da Tabela 3.9 e mostrados graficamente no histograma da Figura 3.9 indicaram que as massas congeladas e estocadas por 15 dias apresentaram uma maior alteração de suas características, quando comparadas com as massas estocadas por 1 dia. A temperatura influenciou positivamente na altura da massa, no volume específico do pão e no volume de CO₂ produzido pelas leveduras, significando que a temperatura, ao passar de -50 para -30° C produziu um efeito benéfico na massa, no pão e nas leveduras.

O peso da bisnaga, contrariamente, teve um efeito negativo na força da massa, no volume específico do pão e no volume de CO₂ produzido pelas leveduras, demonstrando que o aumento do peso da bisnaga afetou negativamente a força da massa, o volume do pão e a capacidade de produção de CO₂ pelas leveduras, sugerindo que nas condições de trabalho, a bisnaga de 80 g apresentou um melhor desempenho que a de 175 g.

Estes resultados concordam com estudos de Berglund *et al.* (1991), que verificaram que a rede de glúten foi danificada durante a armazenagem sob congelamento, reduzindo sua capacidade de retenção de gás. Também, Autio e Sinda (1992) informaram que o enfraquecimento da rede de glúten e a alteração dos parâmetros reológicos indicaram perda da ligação cruzada dos polímeros. Varriano-Marston *et al.* (1980) postularam que o enfraquecimento da rede de glúten de massas congeladas foi produzido pela cristalização do gelo.

3.3.2.1.3. Após 50 dias de armazenamento congelado

Na Tabela 3.10 apresentam-se os resultados obtidos com as massas estocadas durante 50 dias e que foram submetidas a tratamento estatístico para analisar os **efeitos** das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes e que são apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.10. Valores das respostas dos congelamentos com ventilação das massas e do pão após 50 dias de armazenamento sob congelamento.

Temp (°C)	Peso (g)	F (g-f/mm)	H (mm)	L (UFC/g)	CO ₂ (mL)	E	Vesp (cm ³ /g)	D (g-f)
-50	80	1.173	22,9	43	308	61,7	1,75	860,7
-30	80	1.075	63,6	73	831	70,5	3,03	760,0
-50	175	970	27,4	39	421	66,0	1,94	1.404,2
-30	175	784	78,7	104	1.026	63,0	2,53	563,0

F: força da massa, H: altura da massa, L: número de leveduras viáveis x 10⁵, CO₂: volume de CO₂, E: escore do pão, Vesp: volume específico do pão, D: dureza do miolo do pão.

Tabela 3.11. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 50 dias

Variável Independente	Efeito	Variável Dependente	Magnitude	Nível Confiança (%)
Temperatura	Negativo	Força da massa	142 g-f/mm	80
Temperatura	Positivo	Altura da massa	46 mm	90
Temperatura	Positivo	Volume específico	0,935 cm ³ /g	77
Temperatura	Positivo	Contagem Leveduras	47,5 UFC/g	77
Temperatura	Positivo	Volume CO ₂	564 mL	80
Peso Bisnaga	Negativo	Força da massa	247 g-f/mm	80
Peso Bisnaga	Positivo	Volume CO ₂	154 mL	80

Observando a Tabela 3.11, constata-se uma influência positiva da temperatura sobre as características de: altura da massa, volume específico do pão, volume de CO₂ e no número de leveduras viáveis, e um efeito negativo na força da massa. Isto significa que, a temperatura do ar do armário criogênico, ao passar de -50 para -30° C, prejudicou a força da massa, porém beneficiou a altura da mesma, o volume do pão, a viabilidade das leveduras e sua capacidade de produção de CO₂. O efeito do congelamento sobre as células de levedura foi verificado por vários pesquisadores que determinaram a danificação celular pela formação de cristais de gelo ou pela concentração de solutos (Gehrke *et al.*, 1992), como pela desintegração das membranas celulares, devida à formação de cristais de gelo (Murakami *et al.*, 1994).

O peso da bisnaga, por outro lado, afetou negativamente a força da massa e positivamente o volume de CO₂, significando que o aumento do peso da bisnaga de 80 para 175 g teve um efeito negativo na força da massa e positivo no volume de CO₂. Todos estes efeitos são mostrados graficamente na Figura 3.10.

Neste trabalho, verificou-se o melhor desempenho da bisnaga de massa menor (80 g) comparada com a bisnaga de massa maior (175 g). Estes resultados concordam com o trabalho realizado por Brümmer (1995), que estipulou que as velocidades de congelamento dependem do tamanho e da geometria da massa, da temperatura e da movimentação do ar. Ele informou que o raio da peça de massa, além de afetar a velocidade de congelamento, afetará o diferencial de temperatura que se estabelece entre a superfície e o centro. Dependendo das condições de congelamento, este diferencial pode ser negativo para as células de levedura, já que a parte externa da massa fica exposta a temperaturas menores durante tempos maiores e inclusive, submetida a possível dessecação.

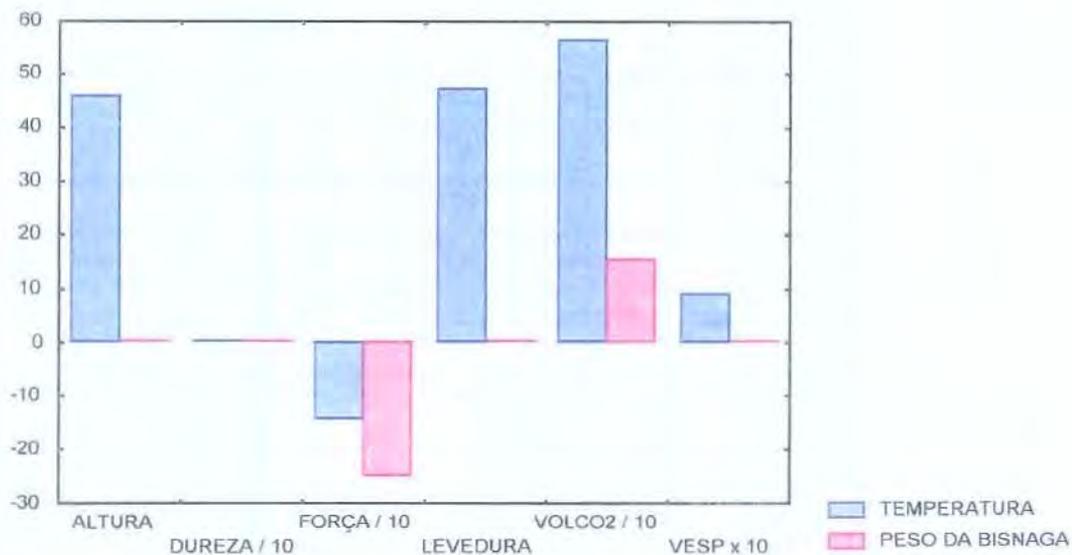


Figura 3.10. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada por 50 dias e dos pães resultantes (VOLCO₂ = volume de CO₂; VOLESP = volume específico do pão)

Observando em conjunto a Tabela 3.11 e a Figura 3.10, constatou-se que com um tempo de 50 dias de armazenagem, houve uma influência maior das variáveis estudadas sobre as características da massa e do pão. Pode-se dizer que, para as variáveis altura da massa, volume do pão, leveduras viáveis e volume de CO₂, a temperatura de congelamento de -30° C foi menos prejudicial que a de -50° C, apresentando a força da massa um efeito contrário. Considerando a variável peso da bisnaga, pode-se dizer que após 50 dias de estocagem, a bisnaga de 80 g apresentou um desempenho positivo em relação à força da massa e um desempenho negativo, com relação à produção de CO₂.

Em todos os tempos de armazenamento, observou-se um efeito maior da temperatura do ar do que do peso da bisnaga sobre as características da massa e do pão. Este efeito já foi estudado por Hirasawa *et al.* (2001), que afirmaram que as células de levedura são suscetíveis à danificação pelo frio durante o armazenamento da massa congelada, perdendo a capacidade de produção de gás. Também Neyreneuf e Delpuech (1993), trabalhando com temperaturas criogênicas, verificaram aumentos dos tempos de fermentação das massas após o armazenamento sob congelamento, sugerindo que a formação de cristais de gelo afetou tanto a viabilidade como a produção de gás pelas leveduras.

A análise estatística dos resultados permitiu verificar as seguintes relações considerando a condição com ventilação e com relação à variável temperatura, verificou-se que quando a temperatura de congelamento das massas passou de -50 para -30° C, esta influenciou positivamente a altura da massa, o volume específico do pão e o volume de CO₂ produzido pelas leveduras em todos os tempos de estocagem estudados e a viabilidade das leveduras das massas estocadas por 50 dias. A temperatura de congelamento mais alta, neste caso, -30° C, apresentou-se mais benéfica para as características da massa e do pão, quando comparada com a temperatura de -50° C.

Considerando a condição com ventilação com relação à variável peso da bisnaga de massa, verificou-se que quando se trabalhou com bisnagas na faixa de 80 para 175 g, houve uma influência negativa na força da massa, no volume específico do pão e no volume de CO₂

produzido pelas leveduras. A bisnaga menor de massa (80 g) apresentou melhor desempenho na panificação que a bisnaga de 175 g.

3.3.2.2. Efeito das variáveis temperatura e peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão para a câmara criogênica sem ventilação

3.3.2.2.1. Após 1 dia de congelamento

Na Tabela 3.12, são apresentados os resultados obtidos com as massas após 1 dia de congelamento dos experimentos realizados no congelador criogênico sem ventilação.

Tabela 3.12. Valores das respostas dos congelamentos “sem ventilação” das massas e do pão após 1 dia de armazenamento sob congelamento

Temp (°C)	Peso (g)	F (g-f/mm)	H (mm)	L (UFC/g)	CO₂ (mL)	E	Vesp (cm³/g)	D (g-f)
-50	80	1.289,0	18,8	57	336	57	1,44	3.010,5
-30	80	926,0	73,2	144	1.359	68	3,11	455,6
-50	175	1.275,0	49,8	129	714	68	2,71	929,0
-30	175	1.166,5	73,6	222	1.296	69	3,72	438,8

F: força da massa, H: altura da massa, L: número de leveduras viáveis x 10⁵, CO₂: volume de CO₂, E: escore do pão, Vesp: volume específico do pão, D: dureza do miolo do pão.

Estes resultados foram analisados estatisticamente para estudar os efeitos das variáveis independentes temperatura e peso da bisnaga sobre as variáveis resposta na massa e no pão e que são apresentados na Tabela 3.13.

Analisando a Tabela 3.13, constata-se um efeito positivo da temperatura nas variáveis altura da massa, volume específico do pão, contagem de leveduras viáveis e volume de CO₂. Isto significa que quando a temperatura passou de -50 para -30° C houve um efeito benéfico na massa, no pão, na contagem e na produção de CO₂ pelas leveduras. Na massa, pelo aumento da altura da massa, no pão, pelo aumento do volume, e nas células de leveduras, pelo aumento do número de células viáveis e pelo aumento do volume de CO₂.

Tabela 3.13. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 1 dia

Variável Independente	Efeito	Variável Dependente	Magnitude	Nível Confiança (%)
Temperatura	Positivo	Altura da massa	39,1 mm	76
Temperatura	Positivo	Volume específico	1,34 cm ³ /g	78
Temperatura	Positivo	Leveduras	90 UFC/g	95
Temperatura	Positivo	Volume de CO ₂	802 mL	82
Peso bisnaga	Positivo	Volume específico	0,94 cm ³ /g	78
Peso bisnaga	Positivo	Leveduras	75 UFC/g	92

Por outro lado, o peso da bisnaga teve um efeito positivo no volume específico do pão e na contagem de leveduras, significando que o aumento de peso da bisnaga de 80 para 175 g beneficiou o volume específico do pão e a contagem de leveduras.

Estes efeitos mostram-se graficamente na Figura 3.11.

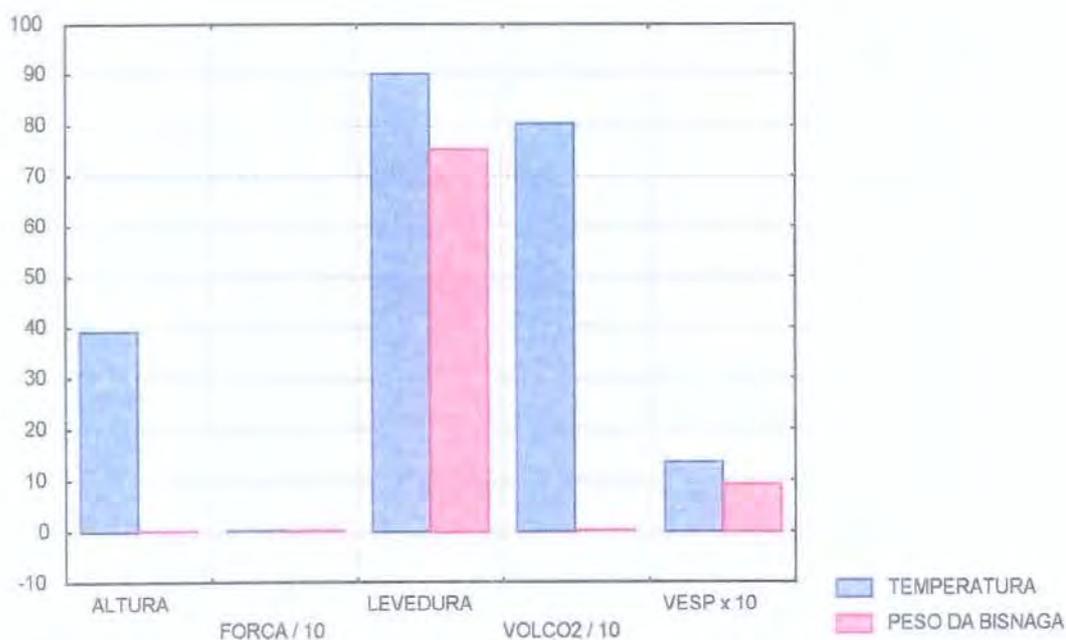


Figura 3.11. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada por 1 dia e dos pães resultantes (VOLCO₂ = volume de CO₂; VOLESP = volume específico pão)

3.3.2.2.2. Após 15 dias de armazenamento sob congelamento

Na Tabela 3.14 estão reunidos os resultados obtidos com os congelamentos realizados em congelador criogênico sem ventilação e armazenados durante 15 dias.

Tabela 3.14. Valores das respostas dos congelamentos “sem ventilação” das massas e do pão após 15 dias de armazenamento sob congelamento.

Temp (°C)	Peso (g)	F (g-f/mm)	H (mm)	L (UFC/g)	CO ₂ (mL)	E	Vesp (cm ³ /g)	D (g-f)
-50	80	1.108,5	18,1	42	293	52	1,29	3.016,7
-30	80	1.078,0	67,6	129	1.125	72	4,18	394,0
-50	175	1.046,9	46,5	53	692	67	2,55	1.073,6
-30	175	952,0	74,7	128	1.274	68	3,50	520,5

F: força da massa, H: altura da massa, L: número de leveduras viáveis x 10⁵, CO₂: volume de CO₂, E: escore do pão, Vesp: volume específico do pão, D: dureza do miolo do pão.

Estes resultados foram submetidos a análise estatística para estudar os efeitos das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes que são mostrados na Tabela 3.15.

Tabela 3.15. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 15 dias.

Variável Independente	Efeito	Variável Dependente	Magnitude	Nível Confiança (%)
Temperatura	Negativo	Força da massa	62,7 g-f/mm	69
Temperatura	Positivo	Altura da massa	38,85	82
Temperatura	Positivo	Volume específico	1,92 cm ³ /g	70
Temperatura	Positivo	Leveduras	81 UFC/g	95
Temperatura	Positivo	Volume de CO ₂	707 mL	88
Peso bisnaga	Negativo	Força da massa	93,8 g-f/mm	69
Peso bisnaga	Positivo	Volume de CO ₂	274 mL	72

Observando a Tabela 3.15, pode-se notar que com 15 dias de armazenamento sob congelamento houve um efeito maior da temperatura sobre a massa constatando-se um efeito negativo na força da massa e positivo na altura da massa, resultado que parece contraditório pois mostra um “enfraquecimento” da massa ao considerar a força da massa e um “fortalecimento” ao considerar a altura, porém é necessário destacar que a resposta positiva na altura da massa deve ser levada mais em conta por apresentar um nível de confiança maior (82%) que o da força da massa (69%). Também é conveniente esclarecer que a característica reológica medida como **força da massa** é diferente daquela medida como **altura da massa**. No primeiro caso, a característica medida é a extensibilidade, que corresponde a uma força de tensão aplicada à massa numa direção (estiramento) e no segundo caso, a característica medida envolve resistência da massa à expansão do CO₂ produzido pelas leveduras.

A temperatura também apresentou um efeito positivo sobre o pão, aumentando o volume específico, e um efeito positivo sobre as leveduras presentes na massa, aumentando o número de células viáveis e o volume de CO₂ produzido.

O peso da bisnaga, por outro lado, influenciou negativamente a força da massa e positivamente o volume de CO₂, significando que, quando o peso da bisnaga passou de 80 para 175 g houve uma diminuição da “força da massa” e um aumento do volume de CO₂ pelas leveduras. Neste caso, também é necessário ressaltar que o resultado do peso da bisnaga sobre a força da massa apresentou um nível de confiança baixo (69%), mas ainda considerado aceitável para este tipo de experimento, conforme mostrados graficamente na Figura 3.12.

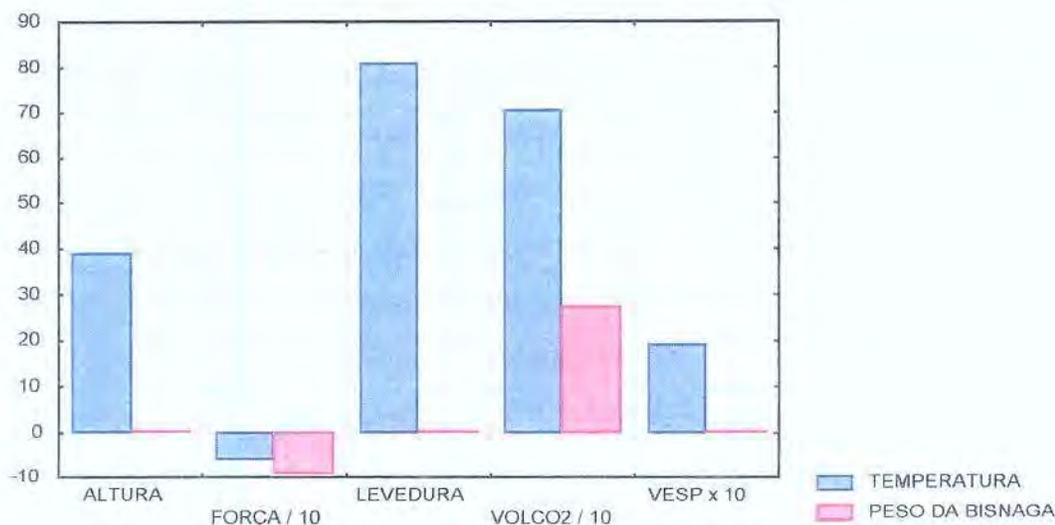


Figura 3.12. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada por 15 dias e dos pães resultantes (VOLCO₂ = volume de CO₂; VOLESP= volume específico pão)

3.3.2.2.3. Após 50 dias de armazenamento sob congelamento

Na Tabela 3.16, são apresentados os resultados obtidos com os congelamentos realizados em congelador criogênico sem ventilação e armazenados por 50 dias.

Tabela 3.16. Valores das respostas dos congelamentos “sem ventilação” das massas e do pão após 50 dias de armazenamento sob congelamento.

Temp (°C)	Peso (g)	F (g-f/mm)	H (mm)	L (UFC/g)	CO ₂ (mL)	E	Vesp (cm ³ /g)	D (g-f)
-50	80	1.374,0	13,7	31,5	274	48,5	1,43	3.652,0
-30	80	1.013,5	62,0	97,0	910	73,5	3,88	331,3
-50	175	1.172,0	44,0	52,0	578	67,0	2,40	1.600,0
-30	175	929,5	75,8	81,0	1.105	68,5	2,12	766,8

F: força da massa, H: altura da massa, L: número de leveduras viáveis x 10⁵, CO₂: volume de CO₂, E: escore do pão, Vesp: volume específico do pão, D: dureza do miolo do pão.

Estes valores foram submetidos a tratamento estatístico para avaliar o efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas características da massa e do pão, sendo apresentados na Tabela 3.17.

Tabela 3.17. Efeito da temperatura e do peso da bisnaga nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 50 dias

Variável Independente	Efeito	Variável Dependente	Magnitude	Nível Confiança (%)
Temperatura	Negativo	Força da massa	301,5 g-f/mm	87
Temperatura	Positivo	Altura da massa	40,05 mm	87
Temperatura	Positivo	Leveduras	47,25 UFC/g	76
Temperatura	Positivo	Volume de CO ₂	581,5 mL	94
Peso bisnaga	Negativo	Força da massa	143 g-f/mm	75
Peso bisnaga	Positivo	Altura da massa	22,05 mm	77
Peso bisnaga	Positivo	Dureza	837 g-f	71
Peso bisnaga	Positivo	Volume de CO ₂	249,5 mL	76

Observando a Tabela 3.17, verifica-se um efeito negativo da temperatura na força da massa e positivo na altura, na contagem de leveduras e no volume de CO₂, mostrando que o aumento da temperatura de -50 para -30° C teve um efeito prejudicial na força da massa, diminuindo a área da curva de extensibilidade da massa e, ao mesmo tempo, um efeito benéfico aumentando a altura da massa, assim como na viabilidade e na capacidade de produção de CO₂ das leveduras.

Verificou-se também uma maior influência do peso da bisnaga nas características da massa e do pão, quando comparada com os tempos de 1 e 15 dias de armazenamento.

Constatou-se que, quando se aumentou o tamanho da bisnaga de 80 para 175 g, houve um efeito negativo na força da massa e positivo na altura da massa. Observou-se também um

efeito negativo no pão aumentando a dureza e positivo na capacidade de fermentação das leveduras presentes na massa, aumentando o volume de CO₂ produzido.

Os efeitos da temperatura e do peso da bisnaga podem ser observados graficamente na Figura 3.13.

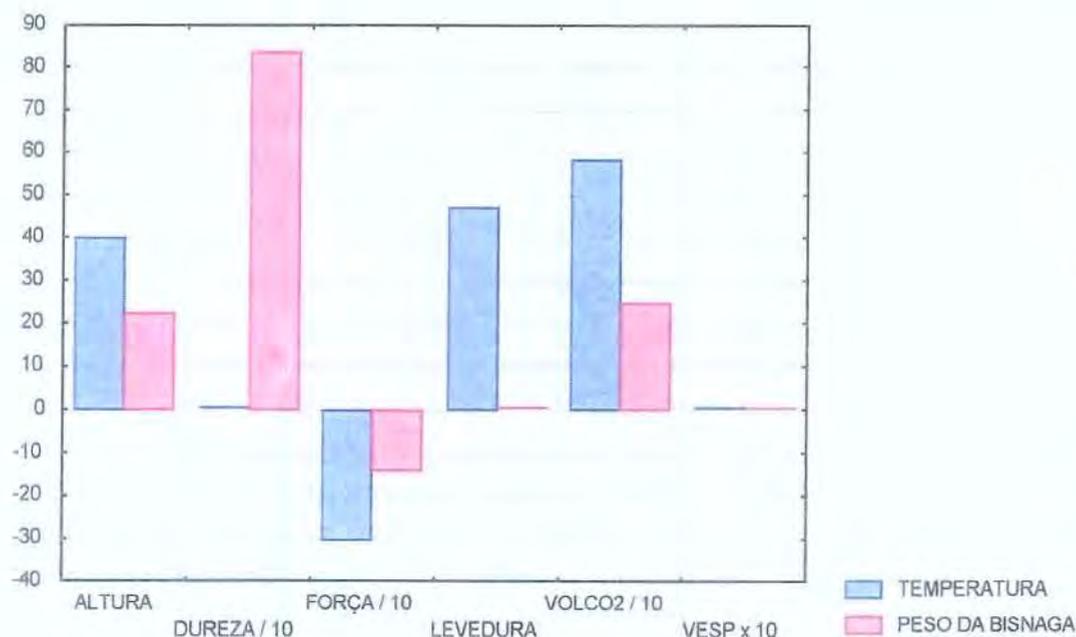


Figura 3.13. Efeitos da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa armazenada 50 dias e dos pães resultantes (VOLCO₂ = volume de CO₂; VOLESP = volume específico do pão)

Considerando a condição sem ventilação, com relação à variável temperatura, verificou-se que quando a temperatura de congelamento passou de -50 para -30° C, teve uma influência positiva na altura da massa, na viabilidade das leveduras e no volume de CO₂, nos 3 tempos de armazenamento, e no volume do pão nos tempos de 1 e 50 dias, e uma influência negativa na força da massa no tempo de 50 dias. A temperatura de congelamento de -30° C apresentou-se mais benéfica às características da massa e do pão, quando comparada com a temperatura de -50° C.

Também nesta condição de ventilação, a temperatura de -30°C mostrou-se melhor que a temperatura de -50°C para estabilidade da massa e do pão. É importante ressaltar que na condição com ventilação, as trocas térmicas acontecem mais rápido do que na condição sem ventilação, sendo assim, as bisnagas ficam submetidas a um meio pouco homogêneo pela falta de movimentação do agente refrigerante, o que resultou no prejuízo de todos os parâmetros estudados da massa e do pão nesta condição.

Considerando a condição sem ventilação, com relação à variável peso de bisnaga de massa, verificou-se que, quando se trabalhou com bisnagas de massa na faixa de 80 para 175 g, houve um efeito positivo no volume específico, na viabilidade das leveduras, no volume de CO_2 e na altura da massa, e um efeito negativo na força da massa e na maciez do pão. Estes efeitos só foram constatados em alguns tempos de estocagem. A bisnaga de 175 g apresentou na maioria dos casos melhor desempenho que a de 80 g, sugerindo que na condição sem ventilação, as propriedades da massa e do pão ficaram “protegidas” nas peças de massa maior, onde as trocas foram mais lentas e as mudanças mais leves, fato importante quando se trabalha com sistemas alimentícios complexos como é a massa de pão e ainda com células vivas na sua formulação.

Verificou-se uma influência maior da temperatura e do peso da bisnaga sobre as características da massa e do pão na condição sem ventilação comparada com a condição com ventilação. Isto sugere que as massas sem ventilação ficaram submetidas a uma situação mais drástica de temperatura de congelamento por tempos maiores, devido principalmente à falta de homogeneidade na distribuição do nitrogênio, quando comparada com a condição com ventilação.

Fica mais claro o efeito da temperatura do ar sobre as variáveis resposta estudadas na massa e no pão do que o efeito do tamanho da bisnaga de massa. Como discutido anteriormente e considerando a viabilidade das leveduras, será melhor uma temperatura intermediária de congelamento que permita às células de levedura entrar em equilíbrio com o meio circundante. O efeito do tamanho da bisnaga é mais difícil de compreender, já que se por um lado, as trocas mais rápidas numa bisnaga menor prejudicariam menos a estrutura do

glúten pela formação de cristais menores de gelo, porém a viabilidade das leveduras e sua capacidade de produção de gás poderia ser prejudicada.

Relacionando os resultados estatísticos com as observações feitas nas curvas de congelamento e pela dificuldade de encontrar na literatura, trabalhos referentes a congelamentos criogênicos, a discussão basear-se-á na comparação dos resultados com o trabalho de Neyreneuf e Delpuech (1993). Estes autores trabalharam com um sistema criogênico, utilizando temperaturas do ar da câmara de -40° a -120° C no congelamento de massas para pão. Eles concluíram que o congelamento com temperaturas do ar de -60° C obteve os melhores resultados em termos de volume do pão após 3 meses de estocagem sob congelamento. Uma das grandes diferenças entre este trabalho e o deles é o tamanho e a geometria das peças de massa congeladas. Eles trabalharam com retângulos de massa de 165 g com 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 15 mm de espessura e, neste trabalho, foram utilizados cilindros de massa pesando 80 g (diâmetro de 30 mm e 97,5 mm de comprimento) e 175 g (diâmetro de 38 mm e 110 mm de comprimento). Este fato deve ter produzido diferenças em todo o processo de transferência de calor, assim como nas velocidades de congelamento, já que as dimensões e geometria da peça de massa é um dos fatores de maior influência nas velocidades de congelamento (Brown, 1991; Cauvain, 1999).

Neste trabalho verificou-se que a temperatura mais adequada foi a de -30° C em ambas condições de ventilação e que a bissnaga de 80 g seria melhor na condição com ventilação e a de 175 g na condição sem ventilação, o que, em termos de experimentos seriam os congelamentos C5 e C2, respectivamente. Como houve concordância na temperatura de -30° C, porém não no tamanho da bissnaga, achou-se interessante incluir para comparação o congelamento C1, na condição com ventilação a -30° C e bissnaga de 175 g. Comparando estes 3 experimentos (C1, C2 e C5), com suas respectivas curvas de congelamento obtidas dos termopares inseridos no centro das massas, determinaram-se as velocidades de congelamento* calculadas como feito por Neyreneuf e Delpuech (1993), como mostra a Equação (3.1), a seguir; chegando-se aos valores apresentados na Tabela 3.18.

$$\text{Velocidade de congelamento} = \frac{\text{Temperatura final} - \text{Temperatura inicial}}{\text{Tempo total de congelamento}} \quad [3.1]$$

A temperatura inicial foi fixada em 15° C e a temperatura final em -12° C para comparar as velocidades de congelamento na mesma faixa de temperatura.

Tabela 3.18. Velocidades de congelamento dos experimentos que apresentaram os melhores resultados.

Congelamento	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Tempo total (min)	Velocidade (°C/min)
C1	-15	-12	32,15	0,84
C2	-15	-12	40,13	0,67
C5	-15	-12	21,20	1,27

O melhor resultado obtido por Neyreneuf e Delpuech (1993) foi o congelamento com a temperatura do ar de -60° C e com uma velocidade de congelamento de 0,978 °C/min, comparado com o congelamento em túnel a -40° C e com uma velocidade de 0,348 °C/min, usado como referência.

Comparando os resultados deste trabalho com os de Neyreneuf e Delpuech (1993), chega-se à conclusão que, apesar deles terem trabalhado com peças de massa de geometria diferente, as velocidades de congelamento no centro das peças calculadas pela relação da diferença entre a temperatura final e a temperatura inicial com relação ao tempo total de congelamento, determinadas como melhores para eles, se aproximaram da velocidade de congelamento obtida por este trabalho no congelamento C1, que se apresentou como o mais promissor deste grupo de experimentos, como pode ser verificado na Tabela 3.19.

Tabela 3.19. Características da massa e do pão dos congelamentos mais promissórios após a avaliação estatística dos resultados

Dias	Cong.	F (g-f/mm)	H (mm)	E	Vesp (cm ³ /g)	D (g-f)	L (UFC/g)	CO ₂ (mL)
1	C2	1.166,5	73,6	69	3,72	438,8	222	1.296
	C1	1.144	76,8	71	3,87	273	205	1.219
	C5	1.189	78,3	71	3,80	271	138	1.215
15	C2	942	74,7	68	3,50	520	128	1.274
	C1	802	77	71	2,90	407	118	1.045
	C5	1.102	71	71,3	3,22	439	92	1.156
50	C2	929,5	75,8	68,5	2,12	766,8	81	1.105
	C1	784	78,7	63	2,53	563	104	1.026
	C5	1.075	63,6	70,5	3,03	760	73	831

F: força da massa, H: altura da massa, L: número de leveduras viáveis x 10⁵, CO₂: volume de CO₂, E: escore do pão, Vesp: volume específico do pão, D: dureza do miolo do pão.

O congelamento C5 com a maior velocidade de congelamento (1,27 °C/min) apresentou-se mais apropriado para a estrutura do glúten quando se considerou o parâmetro força da massa, porém desfavorável com relação à viabilidade das leveduras e ao volume de CO₂ produzido durante a fermentação. Contrariamente, o congelamento C2, na condição sem ventilação e com uma velocidade de congelamento menor (0,67 °C/min) foi mais favorável à viabilidade das leveduras e ao volume de CO₂ produzido e mais prejudicial às características do glúten. Já o congelamento C1 com uma velocidade intermediária (0,84 °C/min) entre as outras apresentou-se mais estável tanto para as características da estrutura do glúten, quanto da viabilidade das leveduras ao longo do tempo de armazenamento. Estes resultados confirmam o já estabelecido pela literatura relacionada ao congelamento (Mazur, 1963; Bender e Lamb, 1977; Hsu *et al.*, 1979, Cauvain, 1999): para a estrutura do glúten, velocidades maiores de congelamento são mais benéficas pela formação de cristais de gelo de tamanho menor, porém prejudiciais para a célula de levedura por se tratar de células vivas, a formação de gelo intracelular provocará danificação de estruturas celulares e membranas plasmáticas.

3.3.3 Estudo da influência do tempo de armazenamento nas características da massa e do pão de amostras congeladas em congelador criogênico com ventilação

Os resultados obtidos nos congelamentos destinados ao estudo do armazenamento estão reunidos na Tabela 3.20. Com estes valores, calcularam-se as porcentagens de perda ou de ganho, considerando a massa não congelada como 100 %, e se apresentam na Tabela 3.21.

Tabela 3.20. Valores das respostas da massa e do pão obtido da massa sem congelar e após congelamento em câmara criogênica com ventilação, armazenadas durante 1, 15 e 50 dias.

Dias	Ensaio	Temp.	Peso	F	H	L	CO ₂	E	Vesp	D
0*	CA1	-57	175	855	80,9	162	1254	73,5	3,95	452,0
	CA2	-50	175	974	79,0	156	1367	74,5	4,94	221,0
	CA3	-40	175	1026	76,2	160	1285	73,7	5,30	504,0
	CA4	-30	175	920	73,8	238	1490	73,5	5,20	159,0
	CA5	-23	175	921	74,0	238	1490	75,0	5,85	427,0
1	CA1	-57	175	755	61,0	97	811	54,0	2,04	1414,0
	CA2	-50	175	1251	61,6	70	773	55,0	1,85	1089,0
	CA3	-40	175	926	71,1	113	1065	70,7	3,72	557,5
	CA4	-30	175	1144	76,8	205	1219	71,0	3,87	273,1
	CA5	-23	175	1121	74,6	167	1376	70,5	3,49	542,0
15	CA1	-57	175	1068	50,1	82	691	62,5	1,96	1582,0
	CA2	-50	175	985	43,2	56	567	65,5	2,20	1416,0
	CA3	-40	175	1027	66,3	108	926	67,2	3,00	650,0
	CA4	-30	175	802	77,6	118	1045	71,0	2,90	407,8
	CA5	-23	175	1090	75,8	154	1258	69,5	3,65	580,0
50	CA1	-57	175	858	44,5	78	625	60,5	1,76	1980,0
	CA2	-50	175	970	27,4	39	421	66,0	1,94	1404,0
	CA3	-40	175	1150	60,1	97	763	66,2	2,65	755,0
	CA4	-30	175	784	78,7	104	1026	63,0	2,53	563,0
	CA5	-23	175	980	76,9	103	1119	62,3	2,52	779,0

F: força da massa, H: altura da massa, L: número de leveduras viáveis x 10⁵, CO₂: volume de CO₂, E: escore do pão, Vesp: volume específico do pão, D: dureza do miolo do pão. * Massa não congelada.

Tabela 3.21. Valores de perda (%) ou ganho (%) dos parâmetros de qualidade da massa e do pão de massas congeladas em câmaras criogênicas com ventilação

Força da massa							Altura da massa						
Ensaio	P 1	G 1	P 15	G 15	P 50	G 50	Ensaio	P 1	G 1	P 15	G 15	P 50	G 50
CA1	11,7			25,0		0,3	CA1	24,6		38,1		45,0	
CA2		28,4		1,1	0,4		CA2	46,6		45,3		65,3	
CA3	9,7			0,0		12,1	CA3	6,7		13,0		21,1	
CA4		24,0	12,8		14,8		CA4		4,0		5,1		6,6
CA5		21,7		18,0		6,0	CA5		0,8		2,4		3,9
Escore do pão							Volume específico do pão						
Ensaio	P 1	G 1	P 15	G 15	P 50	G 50	Ensaio	P 1	G 1	P 15	G 15	P 50	G 50
CA1	26,5		15,0		17,7		CA1	48,3		50,4		55,4	
CA2	26,2		12,1		11,4		CA2	62,5		55,6		60,7	
CA3	4,0		20,1		10,2		CA3	29,8		43,4		50,0	
CA4	3,4		24,3		14,3		CA4	5,2		44,2		51,3	
CA5	9,4		31,6		16,9		CA5	40,3		37,6		56,9	
Contagem de leveduras							Volume de CO ₂						
Ensaio	P 1	G 1	P 15	G 15	P 50	G 50	Ensaio	P 1	G 1	P 15	G 15	P 50	G 50
CA1	40,1		49,4		51,9		CA1	35,3		44,9		50,2	
CA2	55,1		64,1		75,0		CA2	43,4		58,5		69,2	
CA3	29,4		32,5		39,4		CA3	17,1		27,9		40,6	
CA4	13,9		57,9		56,3		CA4	18,2		29,9		31,1	
CA5	29,8		35,3		63,2		CA5	7,7		15,6		19,5	
Dureza do pão							P = % de perda G = % de ganho 1 = 1 dia de armazenamento 15 = 15 dias de armazenamento 50 = 50 dias de armazenamento						
Ensaio	P 1	G 1	P 15	G 15	P 50	G 50							
CA1		212,8		250,0		338,0							
CA2		395,0		540,0		535,2							
CA3		10,6		29,0		51,0							
CA4		71,8		154,0		254,0							
CA5		26,9		35,8		82,4							

3.3.3.1. Efeito do tempo de armazenamento nas características reológicas da massa

Com os valores apresentados na Tabela 3.20, elaboraram-se figuras para avaliar graficamente o efeito do tempo de armazenamento na qualidade da massa e do pão, que são mostrados nas Figuras 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20.

Na Figura 3.14 pode ser observado o efeito do armazenamento juntamente com a temperatura de armazenamento sobre a força da massa expressa como porcentagem de ganho ou perda.

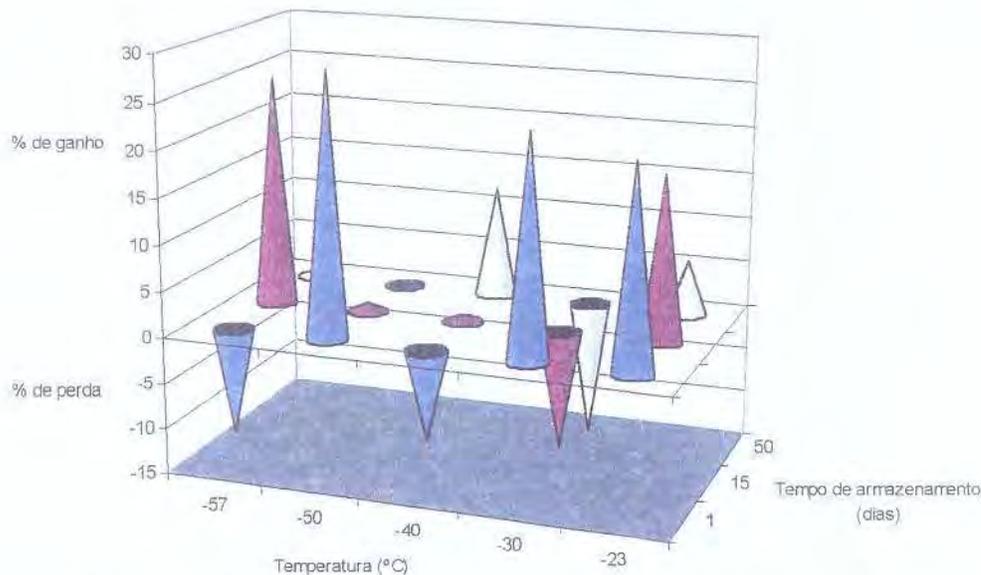


Figura 3.14 - Índice de ganho / perda na força da massa congelada em congelador criogênico com ventilação

Observando a Figura 3.14, constata-se que dependendo do tempo de armazenamento e da temperatura de congelamento, a força da massa, obtida das medições de extensibilidade, apresentou aumentos ou diminuições, o que demonstra a falta de uniformidade na resposta desta característica ao armazenamento. Considerando a temperatura de congelamento observa-se que houve em torno de 20 % de ganho nas temperaturas inferiores e superiores de congelamento. Considerando o tempo de armazenamento não houve respostas consistentes, variando entre perdas e ganhos. Considerando a temperatura e o tempo de armazenamento, o congelamento CA5 realizado a -23°C , apresentou-se mais coerente, mostrando esta condição

uma queda gradual ao longo do armazenamento, interpretando-se estes resultados como uma alteração mais branda desta característica da massa na temperatura mais alta de congelamento. Contrariamente, as temperaturas inferiores deixaram a massa mais “forte” em alguns casos, e mais “fraca” em outros, verificando ser esta característica, difícil de avaliar, sugerindo que a medida de extensibilidade da massa não representa claramente o que acontece com a massa em termos das características reológicas, o que concorda com o trabalho de Bhattacharya *et al.* (2003), que trabalhando com massas congeladas observaram aumentos dos valores de extensibilidade e resistência máxima no período de armazenamento de 12 semanas.

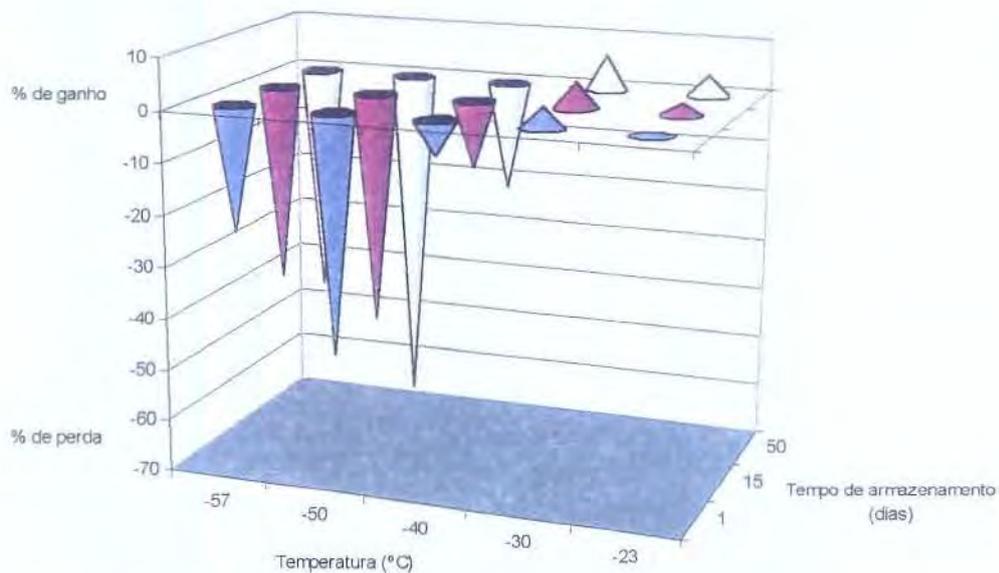


Figura 3.15 - Índice de ganho / perda na altura da massa congelada em congelador criogênico com ventilação

Na Figura 3.15 é representado o efeito do tempo de armazenamento na altura da massa em diferentes condições de temperatura de congelamento.

Ao observar a Figura 3.15, considerando o tempo de armazenamento, verifica-se um aumento da perda da altura da massa ao longo do armazenamento, para as temperaturas -57, -50 e -40°C e aumento do ganho ao longo do armazenamento, para as temperaturas -30 e -23°C.

Observando as Figuras 3.14 e 3.15 conjuntamente, pode-se dizer que as características reológicas da massa foram afetadas negativamente pelas temperaturas menores utilizadas na operação de congelamento, de maneira mais branda pela temperatura intermediária de -40°C e positivamente pelas temperaturas maiores de congelamento (-30 e -23°C).

3.3.3.2. Efeito do tempo de armazenamento nas características tecnológicas do pão

O efeito do armazenamento sob congelamento sobre a dureza, escore e volume específico do pão é apresentado nas Figuras 3.16, 3.17 e 3.18.

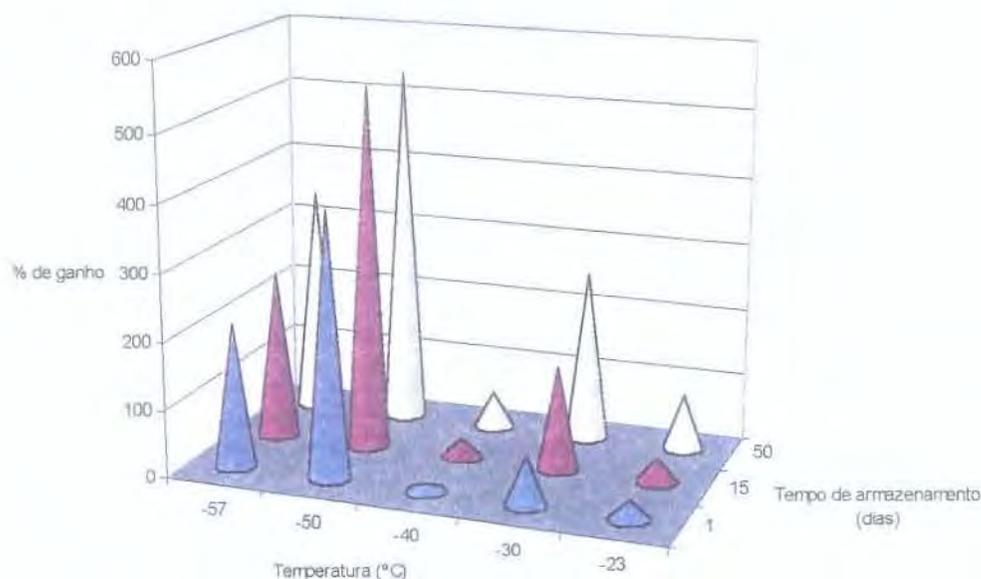


Figura 3.16 - Índice de ganho na dureza do pão obtido de massa congelada em congelador criogênico com ventilação

Observando a Figura 3.16, constata-se uma influência negativa do tempo de armazenamento na dureza do pão, mais drástica nas temperaturas inferiores do congelamento. Observa-se que os pães obtidos de massas congeladas nas temperaturas de -57 e -50°C , apresentaram um miolo mais firme em todos os tempos de armazenamento, quando comparados com as temperaturas de -40 , -30 e -23°C . É interessante salientar que a temperatura de -40°C apresentou-se menos prejudicial sobre esta característica que as temperaturas de -30 e -23°C .

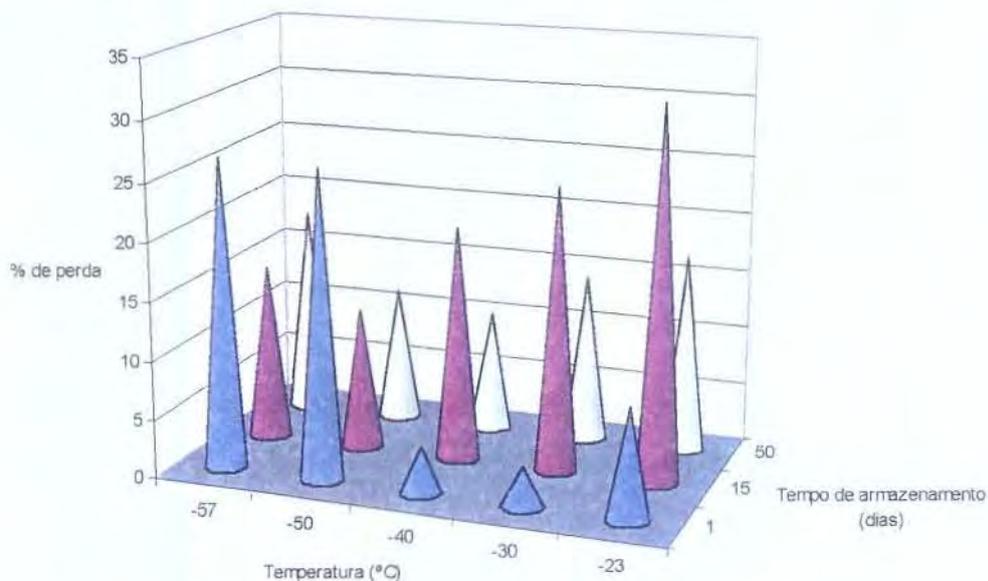


Figura 3.17 - Índice de perda no escore do pão obtido de massa congelada em congelador criogênico com ventilação

Com relação ao escore tecnológico do pão, observa-se através da Figura 3.17, que houve perda desta característica em todos os tempos de armazenamento estudados, verificando-se perdas maiores nas temperaturas de congelamento extremas, inferiores e superiores; apresentando a temperatura de -40°C os valores de perda menor desta característica.

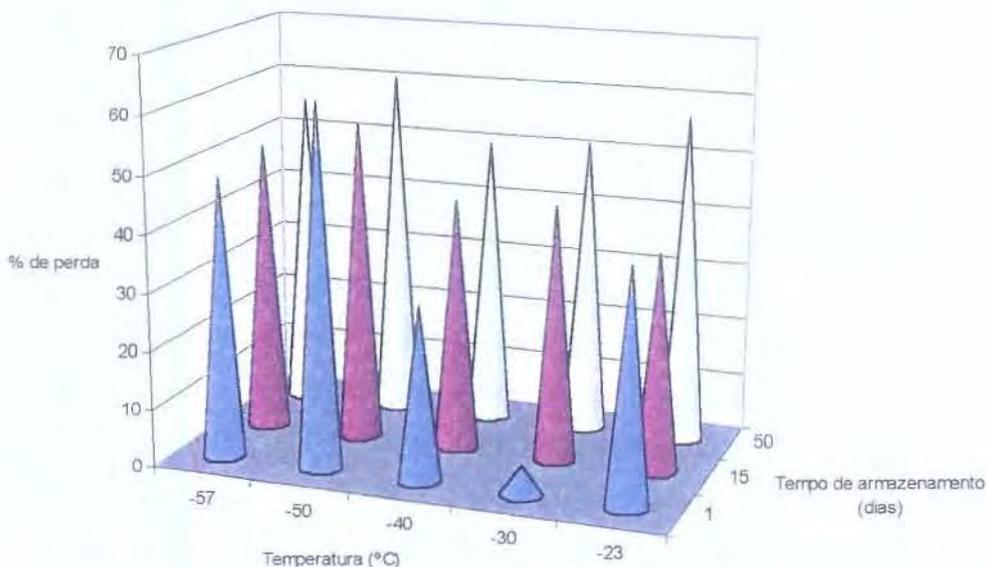


Figura 3.18 - Índice de perda no volume específico do pão obtido de massa congelada em congelador criogênico com ventilação

Na Figura 3.18 é apresentada a influência do tempo de armazenamento no volume específico do pão, que é uma das características tecnológicas de maior importância. Verifica-se que houve uma perda progressiva desta característica ao longo do armazenamento sob congelamento, menor para as temperaturas de -40 , -30 e -23°C , quando comparadas às temperaturas de -57 e -50°C . As maiores perdas, em torno de 50 %, com relação ao valor inicial, foram apresentadas pelas massas que ficaram estocadas durante 50 dias. Estes resultados concordam com os apresentados por Inoue e Bushuk (1992), Nemeth *et al.* (1996) e El-Hady *et al.* (1996), que comprovaram a diminuição do volume do pão com o armazenamento congelado, apresentando como explicação mais aceita, a influência da formação de cristais de gelo sobre a estrutura do glúten da massa, com a conseqüente perda da capacidade de retenção de gás da mesma.

3.3.3.3. Efeito do tempo de armazenamento sobre a viabilidade das leveduras e a produção de CO_2

Na Figura 3.19 são apresentados os índices de perda das contagens de levedura em diferentes tempos de armazenamento para diferentes condições de temperatura de congelamento.

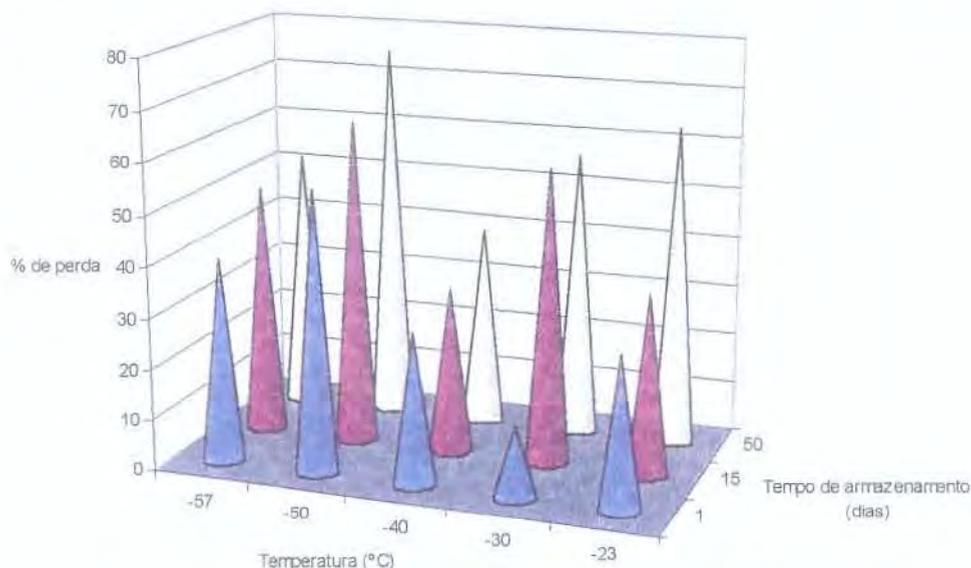


Figura 3.19 - Índice de perda na contagem de leveduras da massa congelada em congelador criogênico com ventilação

Ao observar a Figura 3.19 constata-se diminuição das contagens de levedura, expressas como índices de perda, em todos os tempos de armazenamento estudados. Verifica-se uma perda progressiva das contagens de levedura ao longo do armazenamento, maiores nas faixas inferiores e superiores de temperatura, ficando a temperatura de -40°C com as menores perdas de contagem de células viáveis, o que confirma estudos realizados por Clegg *et al.* (1982), Franks *et al.* (1983), Murakami *et al.* (1994) e Hirasawa *et al.* (2001), que demonstraram que congelamentos muito rápidos (realizados a temperaturas muito baixas) e muito lentos (realizados a temperaturas superiores) foram prejudiciais à viabilidade das leveduras.

Na Figura 3.20 são apresentados os índices de perda da produção de CO_2 pelas leveduras durante o armazenamento das massas.

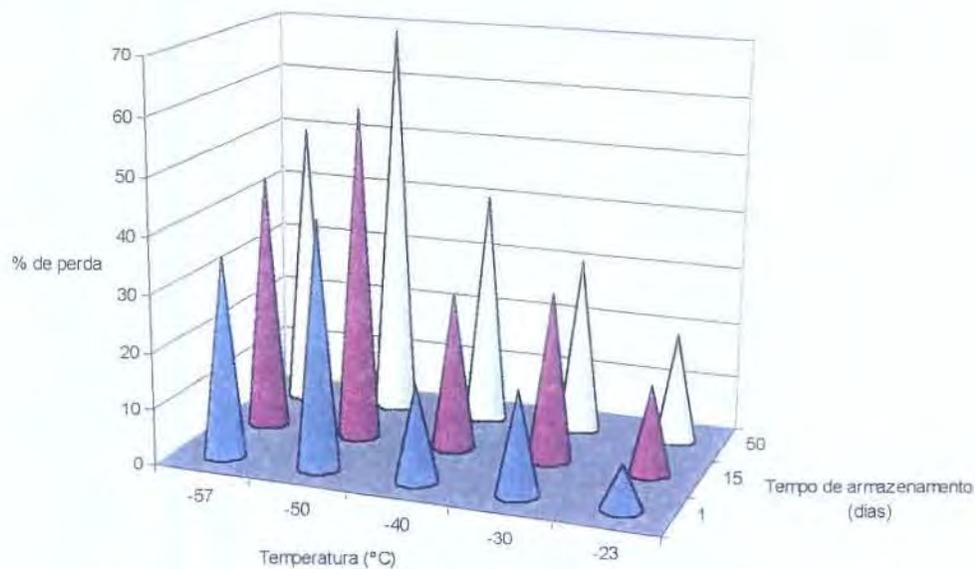


Figura 3.20 - Índice de perda no volume de CO_2 da massa congelada em congelador criogênico com ventilação

Ao observar a Figura 3.20, constata-se a perda da capacidade de produção de CO_2 em todos os tempos de armazenamento, maiores para as temperaturas de -57 e -50°C e menores para as temperaturas de -40 , -30 e -23°C . Observa-se uma relação direta do aumento da perda com o tempo de armazenamento e com a diminuição da temperatura de congelamento.

Observando as Figuras 3.19 e 3.20 conjuntamente, chama a atenção que, apesar das leveduras ter sido inibidas no seu crescimento em todas as condições de armazenamento e temperatura, aquelas células de levedura presentes nas massas congeladas a temperaturas superiores a -40°C , não perderam sua capacidade de produção de CO_2 , o que sugere que células de levedura congeladas a temperaturas superiores, na faixa de -30 a -23°C , conseguem um certo grau de recuperação de sua atividade fermentativa, fato já pesquisado por Brown (1991) e Ray (1986).

3.4. CONCLUSÕES

O presente capítulo permitiu concluir que o sistema que utiliza nitrogênio líquido pode ser utilizado para congelar massas destinadas à fabricação de pão, sendo necessário um controle das temperaturas de congelamento, pois ficou demonstrado que temperaturas baixas extremas são prejudiciais à massa e ao pão.

A condição de trabalho na câmara criogênica **sem ventilação** não é adequada, devido à má distribuição do gás dentro do equipamento, o que traz conseqüências deletérias à massa e ao pão e pelo maior consumo de agente refrigerante.

Com relação à variável **temperatura**, para ambas condições com e sem ventilação, a temperatura de -30°C apresentou-se mais favorável às características da massa e do pão, quando comparada com a temperatura de -50°C .

Com relação à variável **tamanho de biscnaga**, houve uma resposta diferente para as condições com e sem ventilação. Para a condição com ventilação, a biscnaga de 80 g apresentou-se mais benéfica para o desempenho da massa em panificação. Para a condição sem ventilação, a biscnaga de 175 g apresentou-se mais benéfica para a maioria das respostas estudadas.

Avaliando todos os resultados obtidos, da análise estatística e das curvas de congelamento, concluiu-se que o congelamento C1 realizado **com ventilação, a -30° C e com bismagas de 175 g** apresentou-se como o mais estável para as características reológicas da massa, para as características da viabilidade e de produção de CO_2 pelas leveduras e para as características tecnológicas do pão ao longo da armazenagem de 50 dias.

Com relação ao estudo da influência do tempo de armazenamento, houve um aumento progressivo da perda da qualidade da massa e do pão ao longo do armazenamento das massas congeladas na câmara criogênica, na faixa de -57 até -23° C. Todas as características avaliadas neste estudo foram prejudicadas durante o armazenamento sob congelamento. Quando se avaliou o número de leveduras viáveis conjuntamente com o volume de CO_2 , verificou-se, nas temperaturas mais altas de congelamento, que a redução do número de células não foi acompanhada pela perda da capacidade de produção de gás, sugerindo algum mecanismo de restabelecimento nestas temperaturas.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- AUTIO, K.; SINDA, E. Frozen doughs rheological changes and yeast viability. **Cereal Chemistry**, **69**: 409-413, 1992.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. UNICAMP, Campinas. p. 165-186, 1996.
- BENDER, L. D.; LAMB, J. The preservation of yeast viability in frozen dough. **Journal of Food Science & Technology**, **28**: 952-953, 1977.
- BERGLUND, P. T.; SHELTON, D. R.; FREEMAN, T. P. Frozen bread dough ultrastructure as affected by duration of frozen storage and freeze-thaw cycles. **Cereal Chemistry**, **68**: 105-107, 1991.

- BHATTACHARYA, M.; LANGSTAFF, T. M.; BERZONSKY, W. A. Effect of frozen storage and freeze thaw cycles on the rheological and baking properties on frozen doughs. **Food Research International**, **36**: 365-372. 2003.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis and model building**. Cap. 15. Wiley and Sons, New York. 1968.
- BROWN, M. H. Microbial aspects of frozen foods. Cap. 2. In: **Food freezing: Today and tomorrow**. Bald, W. B. Springer Verlag. 1991.
- BRÜMMER, J. M. Bread and rolls from frozen doughs in Europe. In: **Frozen and refrigerated doughs and batters**. Ed. Kulp, K.; Lorenz, K.; Brümmer, J. AACC Inc. 1995.
- CAUVAIN, S. P. Dough retarding and freezing. Cap. 6. In: **Technology of Bread Making**. Editado por Cauvain, S. P. e Young, S. L. Aspen Publication. 1999.
- CLEGG, J. S.; SEITZ, P.; HAZENWOOD, C. F. Cellular response to extreme water loss. **Cryobiology**, **19** : 306-316. 1982.
- EL DASH, A. A. Standardized mixing and fermentation procedures for experiments baking test. **Cereal Chemistry**, **55**: 336. 1978.
- EL-HADY, E. A.; EL-SAMAHY, S. K.; SEIBEL, W.; BRÜMMER, J. M. Changes in gas production and retention in non prefermented frozen wheat doughs. **Cereal Chemistry**, **73** (4): 472-477, 1996.
- FRANKS, F.; MATHIAS, S.; GALFRE, P.; BROWN, D. Ice nucleation and freezing in undercooled cells. **Cryobiology**, **20**: 298-309. 1983.
- GEHRKE, H. H.; PRALLE, K.; DECKWER, W. D. Freeze drying of microorganisms - Influence of cooling rate on survival. **Food Biotechnology**, **6** (1): 35-49, 1992.
- HIRASAWA, R.; YOKOIGAWA, K.; ISOBE, Y.; KAWAI, H. Improving the freeze tolerance of baker's yeast by loading with trehalose. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, **65** (3): 522-526. 2001.

- HSU, K. H.; HOSENEY, R. C.; SEIB, P.A. Frozen dough. II. Effects of freezing and storing conditions on the stability of yeasted doughs. **Cereal Chemistry**, **56**: 424-426. 1979.
- INOUE, Y.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. II. Flour quality requirements for bread production from frozen dough. **Cereal Chemistry**, **69**: 423-428. 1992.
- KULP, K. Biochemical and biophysical principles of freezing. Cap. 4. In: KULP, K.; LORENZ, K., BRÜMMER, J. **Frozen & refrigerated doughs and batters**. A.A.C.C., St. Paul, Minnesota. 1995.
- LEHMANN, T. A. & DREESE, P. Stability of frozen bread doughs. Effects of freezing temperature. **AIB Technical Bulletin**, **3** (7), 1981.
- MAZUR, P. Kinetics of water loss from cells at subzero temperatures and the likelihood of intracellular freezing. **Journal of General Physics**, **47**: 347-369, 1963.
- MAZUR, P. Physical chemical basis of injury from intracellular freezing in yeast. In: ASAHINA, E. **Cellular injury and resistance in living organisms**. Inst. Low Temp. Sci., Sapporo. 1967. p.171.
- MAZUR, P. Cryobiology: The freezing of biological systems. **Science**, **168**: 939.1970.
- MAZUR, P. & SCHMIDT, J. J. Interaction of cooling velocity, temperature, and warming velocity on the survival of frozen and thawed yeast. **Cryobiology**, **5** (1): 1, 1968.
- MURAKAMI, Y.; HAHN, Y. S.; YOKOIGAWA, K.; ENDO, K.; KAWAI, H. Induction of freeze-sensitive mutants from a freeze-tolerant yeast *Torulaspora delbrueckii*. **Bioscience, Biotechnology & Biochemistry**, **58** (1): 206-207, 1994.
- NEI, T. Freezing and freeze-drying of microorganisms. **Cryobiology**, **1**: 87. 1964.
- NEI, T.; ARAKI, T.; MATSUSAKA, T. The mechanisms of cellular injury by freezing in microorganisms. In: ASAHINA, E. **Cellular injury and resistance in living organisms**. Inst. Low Temp. Sci., Sapporo. 1967. p.157.

- NEMETH, L. J.; PAULLEY, F. G.; PRESTON, K. R. Effects of ingredients and processing conditions on the frozen dough bread quality of a Canada Western Red Spring Wheat flour during prolonged storage. **Food Research International**, 29 (7): 609-616, 1996.
- NEYRENEUF, O.; DELPUECH, B. Freezing experiments on yeasted dough slabs. Effects of cryogenic temperatures on the baking performance. **Cereal Chemistry**, 70 (1): 109-111, 1993.
- RAY, B. Impact of bacterial injury and repair. In: Food microbiology: its past, present and future. **Journal of Food Protein**, 49: 651-655. 1986.
- RESENDE, J. B. **Avaliação do processo dinâmico de transferência de calor para o congelamento de polpas de frutas**. Tese do doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.
- SALAS-MELLADO, M. M. **Efeito de algumas variáveis do processo de panificação de massa congelada na estabilidade da massa estocada e na qualidade do pão**. M. Sc. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1992.
- SMEWING, J. **The measurement of dough and gluten extensibility using SMS/Kieffer rig and the TAXT2 Texture Analyser**. Surrey, SMS Ltd. 1995.
- VARRIANO-MARSTON, E. HSU, K. H.; MHADI, J. Rheological and structural changes in frozen dough. **Baker's Digest**, 54: 32-34, 41, 1980.

CAPÍTULO IV. ESTUDO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NA QUALIDADE PANIFICÁVEL DA MASSA CONGELADA EM TÚNEL DE AR FORÇADO

RESUMO

O objetivo deste capítulo foi estudar o efeito da temperatura de congelamento, da velocidade do ar do túnel de congelamento e do peso da bisnaga, considerados parâmetros operacionais, na qualidade da massa e do pão. Para tal finalidade, massas para pão contendo 10 % de trealose e 4 % de glúten Vital foram congeladas em túnel de ar forçado até a temperatura central de -15°C e estocadas durante 60 dias. Foram realizados 17 congelamentos, conforme planejamento experimental, considerando a temperatura, velocidade do ar e peso da bisnaga como variáveis independentes e as características reológicas da massa, a viabilidade e produção de CO_2 das leveduras e as características tecnológicas do pão como variáveis resposta. A análise estatística dos dados permitiu calcular os efeitos principais e de interação das variáveis, assim como obter modelos empíricos de primeira e segunda ordem que relacionaram matematicamente as variáveis independentes com as variáveis resposta. Foram elaborados curvas de superfície de resposta naquelas situações em que os modelos matemáticos foram preditivos. Analisando em conjunto as conclusões do estudo dos efeitos principais e dos modelos, verificou-se que as melhores condições para a estabilidade da massa e do pão foram a temperatura do ar do túnel na faixa de -20 a -25°C ; a velocidade do ar na faixa de 4,2 a 5,14 m/s; e o peso da bisnaga de massa de 80 a 120 gramas. O estudo da influência do tempo de armazenamento na qualidade tecnológica da massa e do pão, tomando como referência a massa não congelada, mostrou uma perda de qualidade de todas as características avaliadas ao longo do armazenamento de 60 dias.

ABSTRACT

The objective of this chapter was to study the effect of freezing temperature, air speed of freezing tunnel and the weight of the dough piece, considered operational parameters, in the dough and bread quality. For such purpose, doughs for bread containing 10 % of trehalose and 4 % of Vital gluten had been frozen in air tunnel forced until the central temperature of -15°C and stored during 60 days. Seventeen experiments had been carried through, according to experimental planning, considering the temperature, air speed and weight of the piece of dough bread as independent variables and the dough rheological characteristics, the viability and CO_2 production of the yeasts and the bread technological characteristics as response variables. The data statistics analysis allowed to calculate the main effects and the interaction of the variables, as well as getting empirical models of first and second order that had mathematically related the independent variables with the response variables. Response surface curves had been elaborated in those situations where the mathematical models had been predictives. Analyzing both conclusions of the study of the main effect together with the models, it was verified that the best conditions for the dough and bread stability had been the tunnel air temperature in the range of -20 to -25°C ; the air speed in the range of 4,2 to 5,14 m/s; and the weight of the dough piece of 80 to 120 g. The study of the influence of storage time in the dough and bread technological quality, taking as reference the unfrozen dough, showed a loss of quality of all the characteristics evaluated in the period of 60 days.

4.1. INTRODUÇÃO

O uso das massas congeladas tem aumentado nas padarias, supermercados e restaurantes em todo o mundo, permitindo que a panificação tenha-se tornado um processo mais fácil e mais lucrativo (Laaksonen e Roos, 2000).

A maior desvantagem das massas congeladas é o desempenho variável do produto após a estocagem sob congelamento. Geralmente, as massas congeladas sem fermentação apresentam um melhor desempenho quando comparadas às massas que sofreram fermentação. As massas congeladas apresentam, após o descongelamento, tempos mais longos de fermentação. Um segundo problema com as massas congeladas é o crescimento dos cristais de gelo na massa. A medida que os cristais de gelo crescem durante a estocagem, a água que hidrata a proteína é removida. Após o descongelamento, esta água não volta para a proteína e a massa fica úmida, pegajosa e com uma estrutura grosseira. Remodelar ou laminar a massa elimina o problema, porém esta não é uma opção viável na operação *bake-off* que corresponde à massa congelada, produzida numa central e forneada em outro lugar.

O congelamento está baseado no princípio físico da separação da água da massa, como resultado da formação de cristais de gelo abaixo de 0° C. Reid (1990) assinalou que a formação de gelo resulta em mudanças microestruturais nos alimentos. Geralmente cristais de gelo grandes se formam nos processos de congelamento lento, entretanto nos congelamentos rápidos forma-se uma quantidade relativamente grande de pequenos cristais de gelo. Portanto, uma velocidade de congelamento rápido promove uma cristalização mais uniforme através do material, levando a um produto de alta qualidade.

Segundo Brown (1991), os processos de congelamento são classificados, de acordo com a velocidade de congelamento em: congelamento lento, de 1 a 10 °C/hora; congelamento comercial, de 10 a 50 °C/hora e congelamento rápido, acima de 50 °C/hora, sendo que o alimento sempre congelará da parte externa para o centro e, segundo ele, a velocidade de congelamento será função do tamanho e da área superficial da unidade que

está sendo congelada, da sua condutividade térmica e dos gradientes de temperatura que existam dentro do alimento e seu meio circundante. Os congelamentos lentos e rápidos têm efeitos opostos sobre a cristalização e sobre a concentração de solutos. Em velocidades lentas de congelamento, se formarão grandes cristais de gelo e a “frente de cristais de gelo” se movimentará lentamente através do produto que está sendo congelado, aumentando a concentração de solutos. Em velocidade de congelamento rápida, numerosos cristais pequenos de gelo se formarão dentro e fora das células e os solutos não se concentrarão, como ocorre nos processos de congelamento lento. Portanto, a velocidade de congelamento e a composição do meio em torno das células de levedura afetarão o tipo e a extensão da injúria.

As massas com fermento são más condutoras de calor e, por causa disso, a velocidade com que o centro resfria é bem menor que a velocidade com que a superfície se resfria. As diferenças reais de velocidade de resfriamento entre a superfície e o centro estão relacionadas, em parte, com a temperatura de resfriamento, porém são mais influenciadas pelo tamanho do produto, mais especificamente, de sua dimensão característica. Quanto maior a peça de massa, maior é esta dimensão e maior o diferencial de temperatura para uma determinada temperatura de resfriamento. A atividade da levedura na massa continua durante o resfriamento inicial e subseqüentes períodos de estocagem, enquanto a temperatura não seja tão baixa para causar o congelamento da massa. A atividade é mais vigorosa nas partes “quentes” da massa, normalmente no centro, devido à baixa condutividade da massa. Em algumas circunstâncias, pode ocorrer uma considerável produção de gás e expansão da massa. A quantidade real de gás produzido depende principalmente do nível de levedura, da temperatura inicial da massa, da temperatura de resfriamento e da capacidade da massa em reter o gás produzido. A perda da atividade gaseificante é devida principalmente à perda da viabilidade das leveduras durante o congelamento inicial e durante o subseqüente armazenamento, o que pode ser compensado pelo aumento do nível de levedura na formulação. Junto com a perda de gás, há uma perda progressiva do volume do produto com o aumento da estocagem (Cauvain, 1999).

Casey e Foy (1995) revisaram os efeitos de congelamento e descongelamento sobre as células de levedura e o mecanismo pelo qual ocorre a danificação celular. Em particular, eles consideraram que o trabalho de Mazur (1970) mostrou que as membranas das células de levedura perdem sua capacidade para “bloquear” a passagem de cristais de gelo abaixo da faixa de temperatura de -10 a -15° C. Geralmente, os produtos de massas congeladas atingem temperaturas em torno de -20° C, se não no início do congelamento, com certeza durante o armazenamento sob congelamento. Os cristais de gelo, provavelmente, continuarão a crescer com o aumento do tempo de estocagem, obtendo-se, nestas condições, uma danificação significativa das membranas celulares.

A susceptibilidade das células de levedura à injúria durante o congelamento inicial e a subsequente armazenagem sob baixas temperaturas, tem levado ao desenvolvimento de cepas de levedura com maior resistência ao congelamento e descongelamento. Em alguns casos, as novas cepas de leveduras têm inicialmente velocidades menores de produção de gás comparadas às leveduras padrão, fazendo com elas sejam mais adequadas para a produção de massas congeladas (Hino *et al.*, 1987; Báguena *et al.*, 1991). Outras tentativas têm incluído o uso de leveduras ricas em trealose, onde esse açúcar atua como um agente crioprotetor (D'Amore *et al.*, 1991) e a aplicação de leveduras secas tem tido resultados variáveis (Spooner, 1990; Neyreneuf e Van der Plaat, 1991).

Dos diferentes tipos de congeladores disponíveis, o túnel de ar forçado (*blast freezer*) oferece o melhor compromisso entre a velocidade e a temperatura de operação. O túnel é um equipamento muito flexível que se adapta a produtos de todas as dimensões e formas, embalados ou não. Neste caso, recomenda-se que nenhuma parte da massa esteja sujeita a temperaturas menores que -35° C, para evitar danificação excessiva às células de levedura presentes na massa. Congeladores domésticos não são adequados para produzir quantidades grandes de massa congelada devido a velocidades de congelamento muito lentas, menores que $0,21^{\circ}$ C/min, que permitem alta produção de gás ocorrendo nas primeiras etapas de resfriamento, com uma subsequente perda da qualidade do produto.

Cauvain (1979) informou que as variações da velocidade do ar do túnel tem um efeito desprezível no desempenho da massa e na qualidade do pão.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

No trabalho de Sahlström *et al.* (1999), foram congeladas massas por 30 minutos a -35°C com uma velocidade de congelamento de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ em túnel de congelamento. Estes pesquisadores concluíram que a temperatura da massa, a adição de DATEM, o tempo de descongelamento e a absorção de água, tiveram um efeito significativo na qualidade das massas congeladas.

Por outro lado, Kenny *et al.* (2001) usaram um túnel de congelamento para congelar massas até a temperatura central de -7°C que foram embaladas em sacos plásticos e estocadas a $-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$; eles avaliaram o desempenho na panificação após 1, 10 e 20 semanas de estocagem sob congelamento, estudando o efeito da temperatura da massa após a mistura, o tempo de descanso, o tempo e a forma de descongelamento. Eles concluíram que, para conseguir a máxima estabilidade da massa congelada, a temperatura após a mistura não deve exceder os 22°C , que tempos curtos (5 a 15 minutos) de descanso são benéficos para o desenvolvimento da massa e que descongelamentos de 7 a 8 horas, utilizando um método de aumento da temperatura por etapas foi adequado.

Pesquisadores do grupo de Nemeth *et al.* (1996) usaram um congelador de baixa temperatura com ventilador para circulação de ar a -35°C para congelar massas por 2 a 3 horas, que foram embaladas em sacos plásticos e estocadas a -20°C sob condições para as massas atingirem uma temperatura central de 0°C em menos de 60 minutos. Eles estudaram a influência do nível de absorção de água, a energia requerida na mistura, o tipo de misturador, os tempos de fermentação intermediário e final, a presença ou ausência de reforçadores da massa, ciclos parciais de congelamento/descongelamento e a adição de 30% de uma farinha extraforte sobre a qualidade do pão, medida como volume e escore da qualidade tecnológica em um período de armazenamento de 26 semanas. Eles concluíram que todas as variáveis estudadas tiveram um efeito significativo ($P \leq 0,05$) sobre a qualidade do pão e que esses efeitos foram mais pronunciados nos tempos de armazenamento mais prolongados.

Le Bail *et al.* (1999), estudando os efeitos das condições de estocagem na qualidade das massas para pão francês, congelaram massas em túnel com velocidades de ar de 1 m/s a -20°C , medindo a velocidade de congelamento entre 0 e -18°C , que foi de $0,19^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Eles estudaram a influência da duração do armazenamento e da flutuação da temperatura neste período, concluindo que com flutuações mínimas de temperatura ($\pm 0,4^{\circ}\text{C}$) houve uma redução de 6,7% do volume da massa após 37 dias a -22°C e uma redução de 48 % quando as massas foram expostas a flutuações de temperatura num local a 20°C .

Havet *et al.* (2000), estudando a influência das condições de congelamento no desempenho em panificação de massas congeladas para pão francês, avaliaram a atividade das leveduras e a reologia de massas congeladas em túnel. Peças de massa de forma cilíndrica foram testadas mostrando diferenças tanto na atividade das leveduras e na reologia da massa com velocidades de congelamento crescentes. Os resultados confirmaram observações prévias relacionadas ao declínio do desempenho em panificação (Inoue e Bushuk, 1991; Neyreneuf e Delpuech, 1993) e a perda de elasticidade da massa (Berland, 1993) com velocidades altas de congelamento. Além disso, este trabalho demonstrou que a atividade das leveduras foi sempre maior na superfície do que no centro, confirmando resultados prévios (Le Bail *et al.*, 1998, Havet e Le Bail, 1999). A contagem de colônias das leveduras tendeu a confirmar os resultados obtidos nas medições de volume de CO_2 . O maior achado consistiu em que se demonstrou claramente que o aparecimento da “porosidade aberta” na massa durante o congelamento foi afetada pela velocidade de congelamento. Este trabalho demonstrou tal como outros pesquisadores (Inoue e Bushuk, 1991; Kulp, 1995) que a cristalização de gelo pode ser a origem do enfraquecimento do glúten. Uma velocidade alta de congelamento produziu uma rede de glúten mais danificada. Estes resultados mostraram um efeito sinérgico da velocidade de congelamento em ambos parâmetros: atividade da levedura e reologia da massa, e, portanto, no volume do pão.

O objetivo deste capítulo foi estudar o efeito das variáveis temperatura do meio de congelamento, velocidade do ar do túnel e peso da bisnaga de massa na qualidade da massa e do pão, de massas congeladas e armazenadas durante 60 dias.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Material

4.2.1.1 Matéria-prima

A farinha de trigo utilizada e suas características reológicas foram apresentadas no item 3.2.1.1 do Capítulo III.

4.2.1.2 Ingredientes e reagentes

Os ingredientes e reagentes utilizados e suas especificações técnicas foram apresentadas no item 3.2.1.2 do Capítulo III.

4.2.1.3. Equipamentos

Neste trabalho foram utilizados os equipamentos listados a seguir:

- Amassadeira automática espiral com duas velocidades marca Hypo modelo H1E10;
- Cortadora marca Hypo modelo DV2560;
- Modeladora marca Hypo;
- Anemômetro TRI-Sense da marca Cole Palmer Instrumental Co., modelo No 37000-00;
- Túnel de congelamento com fluxo de ar horizontal, mostrado na Figura 4.1, que consiste de 2 caixas concêntricas de aço inoxidável com dimensões externas de 1,05 x 0,78 x 0,60 m e volume interno de 0,32 m³. O sistema de refrigeração do túnel é composto de um compressor semi-hermético (BITZER – MOD. NBS 1700), operando com refrigerante R-408^A (FORANE FX-10 – Elf Atochem), sistema de condensação a água e expansão

direta do refrigerante no evaporador por meio de válvulas de expansão termostáticas, com equalização externa, adaptado por Resende (2000).



Figura 4.1. Túnel de congelamento de ar forçado utilizado para congelamento das massas.

- Termopares de cobre constantan;
- Sistema de aquisição de dados: O sistema utilizado foi o descrito por Resende (2000) que consistiu em um sistema que possui uma chave eletrônica seletora de canais composta de placas contendo canais com configuração de contato bipolar para termopares e um canal destinado à junta fria;
- Congelador comum vertical de laboratório, com temperatura média igual a $-18 \pm 1^{\circ} \text{C}$;
- Cabine do extensígrafo com temperatura controlada de 30°C ;
- Estufa retilínea Fanem a 45°C ;
- Câmara incubadora Fanem modelo 347CD;
- Capela de fluxo laminar marca Veco;
- Homogeneizador de laboratório Stomaker 400;
- Incubadora Fanem modelo 347M;
- Lupa com luz marca Hellige;
- Forno de micro-ondas com prato giratório da marca Brastemp;
- Autoclave vertical marca Favve;
- Analisador de textura TAXT2 (Texture Technologie Corp. Scarsdale NY/ Surrey Stable Microsystems, SMS, Godalming, Surrey, UK);

- Reofermentômetro marca Chopin modelo F3 da indústria Chopin S/A, Group Tripette e Renane, Villeneuve, La Garenne, France);
- Forno elétrico de bancada marca Lyar da indústria J. Rial e Cia Ltda.;
- Cortadora elétrica da marca Siam Util.

4.2.2. Métodos

4.2.2.1 Formulação e preparo da massa

A formulação básica e o preparo da massa de pão tipo francês foram apresentados no item 3.2.2.1 do Capítulo III.

4.2.2.2. Dimensões das bisnagas de massa

As bisnagas obtidas após o corte da massa, cujo peso foi previamente definido por planejamento experimental apresentaram as dimensões mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Dimensões das bisnagas* de massa de pão antes do congelamento.

Peso (g)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
47,7	22	88
80	30	97,5
127,5	36	104
175	38	110
207	39	135

* Média de 10 medições.

Juntamente com as bisnagas de massa destinadas a congelamento, foram obtidas para cada ensaio, amostras sem congelar denominadas de tempo zero, utilizadas como referência no estudo do tempo de armazenamento.

4.2.2.3. Congelamento em túnel de ar forçado: calibração de termopares, determinação de velocidade de ar do túnel e operação de congelamento

A calibração dos termopares foi realizada conforme o item 3.2.2.3 do Capítulo III.

Com a finalidade de estudar o efeito da velocidade do ar do túnel do congelamento, analisou-se primeiramente como mudar a velocidade do ventilador, o que foi conseguido alterando a frequência do motor. Para conseguir valores de velocidade utilizadas normalmente em congelamento de produtos alimentícios, trabalhou-se com frequências variando de 30 a 60 Hz e ainda uma condição de velocidade inferior a 30 Hz pela colocação de uma prancha perfurada na entrada do túnel, que foi denominada de “30 Hz com prancha”. Para efetuar as medidas de velocidade de ar dentro do túnel variou-se a frequência do motor do ventilador, realizando as medições introduzindo o anemômetro através de perfurações na porta do túnel que permitiram a aquisição de dados em vários pontos da secção, como é mostrado na Figura 4.2. Os valores médios da velocidade do túnel se apresentam na Tabela 4.2 e foram obtidos matematicamente utilizando o programa Statistica.

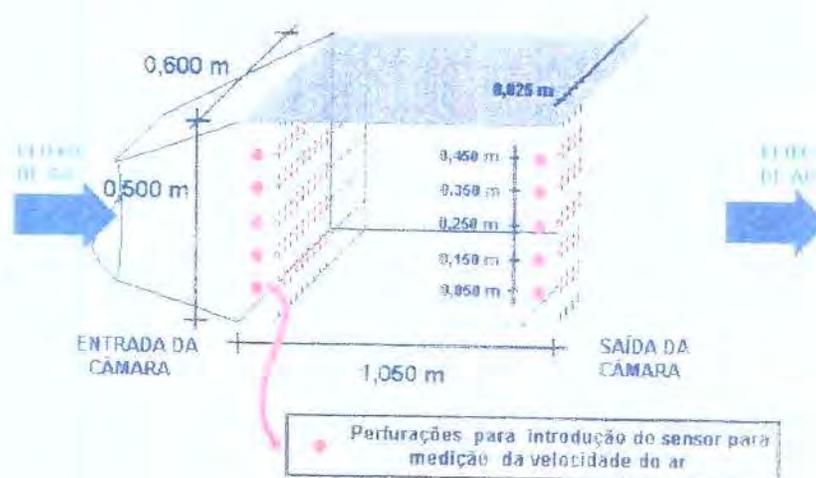


Figura 4.2. Pontos de medição da velocidade do ar no túnel de congelamento.

Tabela 4.2. Velocidades de ar obtidas variando a frequência do motor do ventilador do túnel de congelamento.

Frequência do motor (Hz)	Velocidade de ar (m/s)
30 com prancha	1,28
30	3,06
40	4,14
50	5,14
60	6,41

As bandejas com as bisnagas distribuídas uniformemente, foram levadas até o túnel de ar forçado estabilizado na temperatura do ensaio. De maneira similar ao teste em câmara criogênica, os termopares para o registro da temperatura foram inseridos no sentido radial: perto da superfície, na zona intermediária e no centro da bisnaga da massa, para o cálculo posterior das velocidades e tempos de congelamento.

O ponto final do congelamento foi considerado no momento em que a temperatura do termopar localizado no centro da bisnaga registrou o valor de -15°C para congelamentos realizados a temperaturas iguais ou inferiores a -15°C , ou quando a temperatura da massa se igualou à temperatura do ar, para congelamentos realizados a temperaturas maiores que -15°C .

4.2.2.4. Armazenamento

As bisnagas de massa congelada foram acondicionadas em sacos de polietileno, fechados e estocados em congelador comum de laboratório a uma temperatura de -18°C . Foram retiradas amostras após 1, 30 e 60 dias de armazenamento, para avaliação da qualidade da massa e do pão.

4.2.2.5. Descongelamento e fermentação

Para realizar as determinações de qualidade na massa, as bisnagas foram descongeladas em cabine a 30° C até a temperatura central de 20° C. A fermentação das massas para elaboração do pão foi realizada no mesmo equipamento durante 1 hora e 35 minutos.

4.2.2.6. Avaliação da qualidade da massa

A avaliação da qualidade da massa através das determinações de: número de leveduras viáveis, microextensibilidade mediante o texturômetro TAXT-2, altura da massa e volume de CO₂ mediante o reofermentômetro Chopin F3, foi realizada conforme os itens 3.2.2.6.1, 3.2.2.6.2 e 3.2.2.6.3 apresentados no Capítulo III, respectivamente.

4.2.2.7. Elaboração e avaliação da qualidade do pão

A elaboração do pão e as determinações de volume, score e dureza, foram realizadas conforme os itens 3.2.2.7.1, 3.2.2.7.2, 3.2.2.7.3 e 3.2.2.7.4 apresentados no Capítulo III, respectivamente.

4.2.2.8. Planejamento experimental e avaliação estatística dos dados

Uma vez definidas as variáveis independentes e as variáveis resposta, foi realizado um desenho experimental, optando-se por um planejamento fatorial 2³, conforme metodologia de Box *et al.* (1978) e Barros Neto *et al.* (1996).

Foram realizados 17 ensaios, conforme matriz de planejamento apresentada na Tabela 4.3. As variáveis estudadas foram: temperatura do ar, peso da bisnaga e velocidade do ar do túnel.

Tabela 4.3.- Matriz do planejamento experimental fatorial completo de dois níveis

Ensaio de congelamento	X1 Temperatura	X2 Velocidade	X3 Peso bisnaga	X1 °C	X2 m/s	X3 G
T1	-1	-1	-1	-25	3,06	80
T2	+1	-1	-1	-15	3,06	80
T3	-1	+1	-1	-25	5,14	80
T4	+1	+1	-1	-15	5,14	80
T5	-1	-1	+1	-25	3,06	175
T6	+1	-1	+1	-15	3,06	175
T7	-1	+1	+1	-25	5,14	175
T8	+1	+1	+1	-15	5,14	175
T9	0	0	0	-20	4,14	127,5
T10	0	0	0	-20	4,14	127,5
T11	0	0	0	-20	4,14	127,5
T12	- α	0	0	-28,4	4,14	127,5
T13	+ α	0	0	-11,6	4,14	127,5
T14	0	- α	0	-20	1,28	127,5
T15	0	+ α	0	-20	6,41	127,5
T16	0	0	- α	-20	4,14	47,7
T17	0	0	+ α	-20	4,14	207

As variáveis dependentes ou resposta estudadas foram:

(i) Na massa:

- Força da massa (F, g-f/mm) corresponde à área da curva média medida como força x distância obtida nas análises de microextensibilidade;

- Altura da massa (H, mm) corresponde à altura máxima da curva de desenvolvimento da massa obtida no reofermentômetro;

- Contagem de leveduras (L, UFC/g) corresponde ao número de leveduras viáveis presentes por grama de massa;

- Volume de CO₂ (CO₂, mL) corresponde ao volume de dióxido de carbono produzido pelas leveduras medido no reofermentômetro.

(ii) No pão:

- Escore tecnológico (E) é o somatório das notas conferidas pelas características tecnológicas do pão;

- Volume específico (Vesp, cm³/g) é a relação entre o volume aparente e o peso do pão;

- Dureza do pão (D, g-f) corresponde ao pico da curva força x tempo obtida nas análises de textura do pão.

A análise estatística dos resultados, utilizando o programa Statistica versão 5.0, permitiu calcular os efeitos principais e de interação das variáveis sobre as respostas, permitindo determinar os **efeitos** mais significativos e ajustar empiricamente **modelos** de primeira e segunda ordem correlacionando as variáveis e as respostas. Obteve-se, assim, modelos preditivos que permitiram desenhar curvas de superfície de resposta e de contorno para visualização e interpretação dos resultados, nos 3 tempos de armazenamento: 1, 30 e 60 dias.

4.2.2.9. Estudo do tempo de armazenamento

Para descrever o efeito do tempo de armazenamento sobre as características da massa e do pão, dos congelamentos lineares T1 a T8, foram calculados índices de ganho ou perda das características avaliadas, considerando a massa não congelada como referência e expressos como porcentagem, o que permitiu a elaboração de curvas que relacionaram estes índices nos tempos de armazenamento de 1, 30 e 60 dias. As características avaliadas neste estudo foram: força e altura da massa, escore, volume específico e dureza do pão, contagem de leveduras e volume de CO₂ produzido, como explicado anteriormente nos pontos (i) e (ii) do item 4.2.2.8.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. Obtenção das curvas de congelamento

As curvas de temperatura versus tempo, de todos os ensaios realizados no túnel se apresentam nas figuras mostradas no Anexo 3.

4.3.2. Estudo do efeito das variáveis temperatura, peso da bisnaga e velocidade do ar nas variáveis resposta da massa e do pão

O planejamento experimental das variáveis em estudo permitiu realizar a **análise dos efeitos** que se apresenta nas Tabelas 4.2 a 4.7. Neste estudo só serão considerados os ensaios lineares, ou seja, do T1 a T8.

4.3.2.1. Após 1 dia de congelamento

A Tabela 4.4 reúne os resultados obtidos nas análises da massa e do pão dos ensaios lineares de congelamento em túnel após 1 dia de armazenamento.

Os valores apresentados na Tabela 4.4 foram submetidos a tratamento estatístico que analisou os **efeitos** das variáveis independentes sobre as dependentes. A análise dos resultados permitiu verificar a influência positiva ou negativa, o nível de confiança e a magnitude, como se mostra na Tabela 4.5.

Tabela 4.4. Valores das variáveis medidas na massa e no pão dos congelamentos realizados em túnel após 1 dia de armazenamento sob congelamento.

Exp	Temp	Veloc	Peso	Força (g-f/mm)	Altura (mm)	Escore	Vesp (cm ³ /g)	Dureza (g-f)	Leved x 10 ⁵ (UFC/g)	Vol CO ₂ (mL)
T1	-25	3,06	80	1288	80,2	85,5	4,10	226,8	65	1376
T2	-15	3,06	80	1414	76,0	86,0	3,40	212,9	94	1356
T3	-25	5,14	80	1264	74,2	88,0	4,55	201,2	16	1614
T4	-15	5,14	80	1139	79,1	86,5	5,00	131,3	30	1309
T5	-25	3,06	175	1174	81,2	80,5	3,05	385,5	51	1242
T6	-15	3,06	175	1431	80,0	85,0	3,60	355,4	105	1237
T7	-25	5,14	175	1229	77,3	81,5	3,45	246,7	14	1284
T8	-15	5,14	175	1086	77,4	82,0	3,85	261,0	32	1304

Tabela 4.5. Efeito da temperatura, da velocidade do ar, do peso da bisnaga e suas interações nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 1 dia.

		Força (g-f/mm)	Altura (mm)	Escore	Vesp (cc/g)	Dureza (g-f)	Leved x 10 ⁵ (UFC/g)	Vol CO ₂ (mL)
Temperatura	Efeito	28,75	-	-	-	-24,9	28,75	-77,5
	IC, %	95	-	-	-	88	91	76
Velocidade	Efeito	-147,25	-2,35	-	0,675	-85,1	-55,75	75,0
	IC, %	99	99	-	76	98	97	75
Peso	Efeito	-46,25	1,60	-4,25	-0,775	119,1	-	-147,0
	IC, %	98	98	78	80	99	-	91
Temp x Veloc	Efeito	-162,75	2,60	-	-	-	-12,75	-65,0
	IC, %	99	99	-	-	-	70	70
Temp x Peso	Efeito	28,25	-0,45	-	-	17,0	-	85,0
	IC, %	94	87	-	-	79	-	79
Vel x Peso	Efeito	-	-0,90	-	-	-31,5	-	-
	IC, %	-	96	-	-	92	-	-
T x V x P	Efeito	-37,25	-1,95	-	-	25,1	-	77,5
	IC, %	97	99	-	-	88	-	76
Correlação (r ²)		0,83	0,69	0,67	0,79	0,99	0,75	0,90

Observando a Tabela 4.5, e considerando as variáveis independentes separadamente, percebe-se que:

- a) O aumento da temperatura, de -25 para -15° C, tem um efeito positivo na força da massa e nas leveduras, e um efeito negativo na dureza do pão e no volume de CO_2 produzido pelas leveduras;
- b) A velocidade do ar, quando passou de 3,06 a 5,14m/s, teve um efeito negativo na força, na dureza e nas leveduras, e um efeito positivo no volume de CO_2 ;
- c) O peso da bisnaga, quando passou de 80 para 175g, teve um efeito negativo na força e no volume de CO_2 , e positivo na dureza do pão, como se observa no histograma da Figura 4.3.

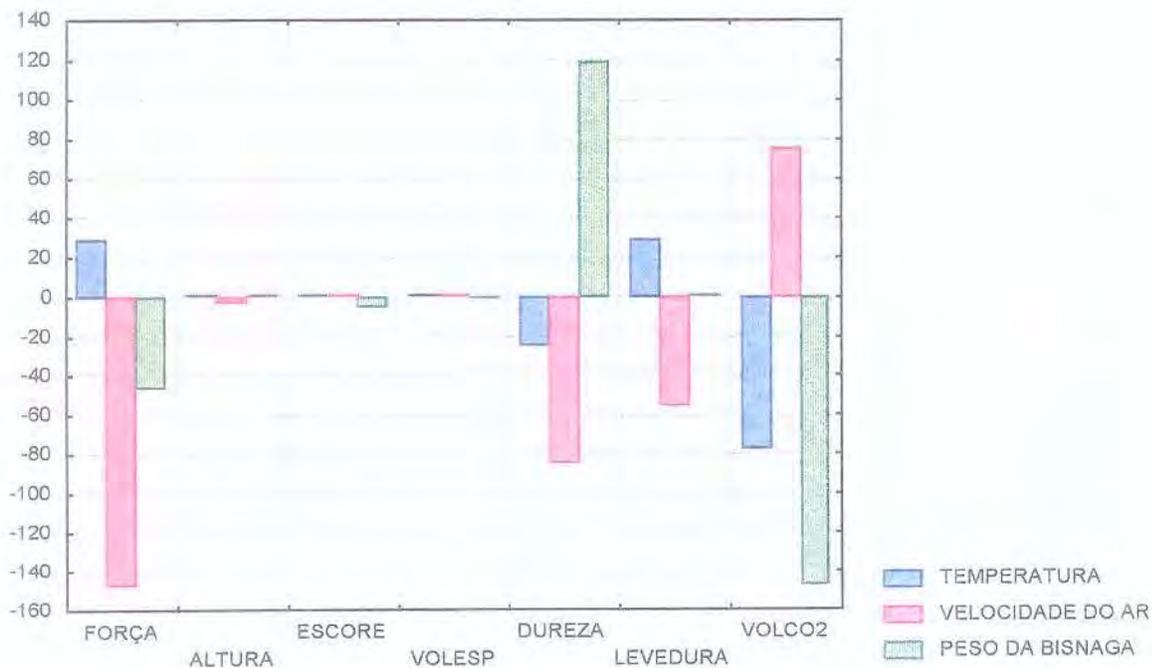


Figura 4.3. Efeito das variáveis sobre as características da massa e do pão após 1 dia de congelamento.

As variáveis dependentes mais influenciadas, após 1 dia de congelamento, foram a força da massa, a dureza do pão e o volume de CO_2 , sendo as leveduras levemente influenciadas e as outras variáveis tiveram influência pequena.

Analisando a Tabela 4.5, que mostra o efeito das interações das variáveis sobre as respostas, verificou-se que:

- Houve uma interação negativa da temperatura com a velocidade do ar sobre a força da massa, as leveduras e o volume de CO₂;
- A interação conjunta da temperatura com o peso da bisnaga influenciou positivamente a força da massa, a dureza do miolo do pão e o volume de CO₂;
- A velocidade do ar com o peso da bisnaga apresentaram interação negativa sobre a dureza do pão;
- As variáveis estudadas mostraram interação conjunta, influenciando negativamente a força da massa e positivamente a dureza do pão e o volume de CO₂, o que pode ser observado graficamente no histograma da Figura 4.4.

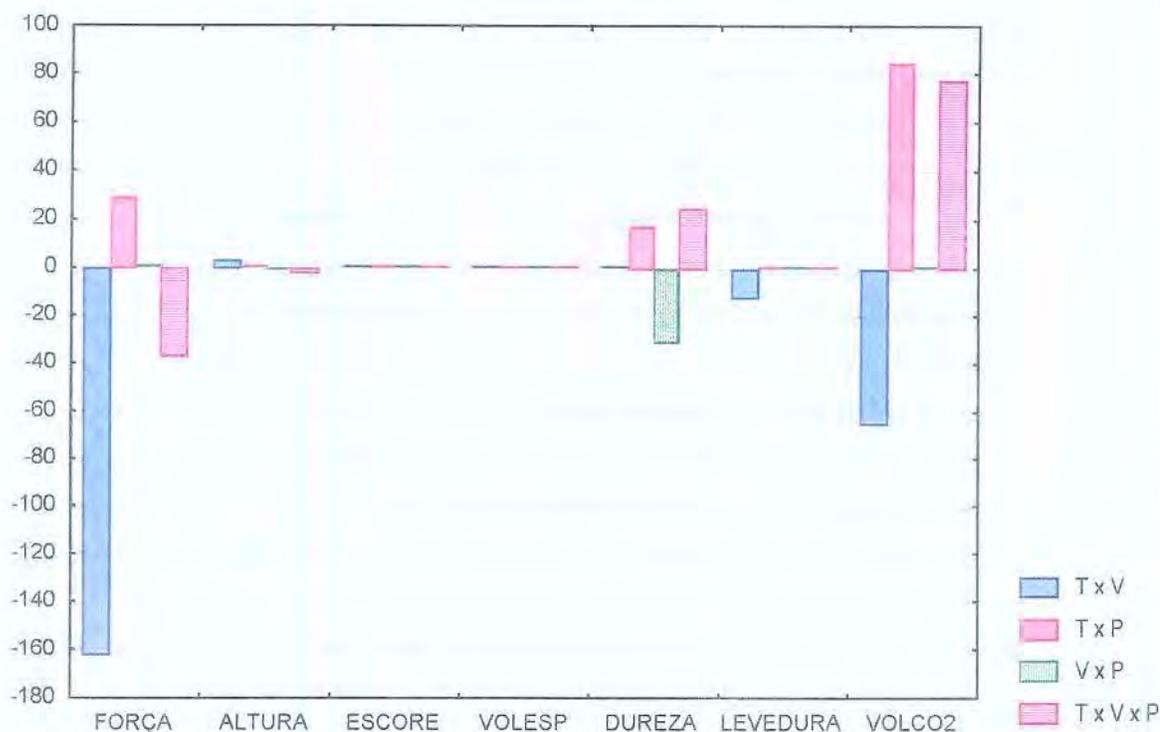


Figura 4.4. Efeito das interações das variáveis sobre as características da massa e do pão após 1 dia de congelamento.

As variáveis dependentes mais influenciadas pelas interações das variáveis independentes foram: a força da massa, a dureza do miolo do pão e o volume de CO₂ produzido pelas leveduras.

4.3.2.2. Após 30 dias de armazenamento sob congelamento.

A Tabela 4.6 reúne os resultados obtidos nas análises da massa e do pão dos ensaios lineares de congelamento em túnel após 30 dias de armazenamento.

Tabela 4.6. Valores das variáveis medidas na massa e no pão dos congelamentos realizados em túnel após 30 dias de armazenamento congelado.

Exp	Temp	Vel	Peso	Força (g-f/mm)	Altura (mm)	Escore	Vesp (cm ³ /g)	Dureza (g-f)	Leved x 10 ⁵ (UFC/g)	Vol CO ₂ (mL)
T1	-25	3,06	80	1517	78,9	79,5	2,90	364	65	1200
T2	-15	3,06	80	1224	74,6	82,5	3,40	384	87	1018
T3	-25	5,14	80	1215	74,7	87,5	4,85	209	180	1472
T4	-15	5,14	80	1571	78,0	83,5	3,65	275	120	1209
T5	-25	3,06	175	1479	80,1	72,5	2,10	741	53	1124
T6	-15	3,06	175	1128	79,8	76,0	2,40	616	59	1185
T7	-25	5,14	175	1497	75,4	85,5	4,90	271	103	1410
T8	-15	5,14	175	1390	79,1	81,5	3,20	328	53	1287

Os valores apresentados na Tabela 4.6 foram submetidos a tratamento estatístico que analisou os efeitos das variáveis independentes sobre as dependentes. A análise dos resultados permitiu verificar a influência positiva ou negativa, o nível de confiança e a magnitude, como se mostra na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Efeito da temperatura, da velocidade do ar e do peso da bisnaga e suas interações nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 30 dias.

		Força (g-f/mm)	Altura (mm)	Escore	Vesp (cm ³ /g)	Dureza (g-f)	Leved x 10 ⁵ (UFC/g)	Vol CO ₂ (mL)
Temperatura	Efeito	-98,75	-	-	-	-	-20,5	-126,75
	(T) IC, %	98	-	-	-	-	95	95
Velocidade	Efeito	81,25	-	6,875	1,450	-255,5	48,0	212,75
	(V) IC, %	97	-	87	90	96	99	98
Peso	Efeito	-	2,05	-4,375	-	181,0	-46,0	-
	(P) IC, %	-	70	75	-	94	99	-
T x V	Efeito	223,25	2,90	-	-0,925	-	-34,5	-66,25
	IC, %	99	81	-	80	-	98	84
T x P	Efeito	-130,25	-	-	-	-	-	95,75
	IC, %	99	-	-	-	-	-	91
V x P	Efeito	58,75	-	-	-	-123,5	-26,0	-
	IC, %	95	-	-	-	88	97	-
T x V x P	Efeito	-101,25	-	-	-	-	6,5	-
	IC, %	98	-	-	-	-	72	-
Correlação (r²)		0,94	0,81	0,85	0,89	0,96	0,98	0,95

Observando a Tabela 4.7, que mostra os efeitos das variáveis após 30 dias de armazenamento sob congelamento, verificou-se que:

- A temperatura do ar, quando passou de -25 a -15° C, influenciou negativamente a força da massa, a contagem de leveduras e o volume de CO₂ produzido;
- A velocidade do ar, quando passou de 3,06 a 5,14 m/s, influenciou positivamente a força da massa e as leveduras presentes, e negativamente a dureza do pão e o volume de CO₂ produzido pelas leveduras;
- O peso da bisnaga, quando passou de 80 para 175 g, influenciou positivamente a dureza do pão e negativamente a contagem de leveduras.

As outras variáveis foram influenciadas de maneira muito menos marcante, como se observa no histograma da Figura 4.5.

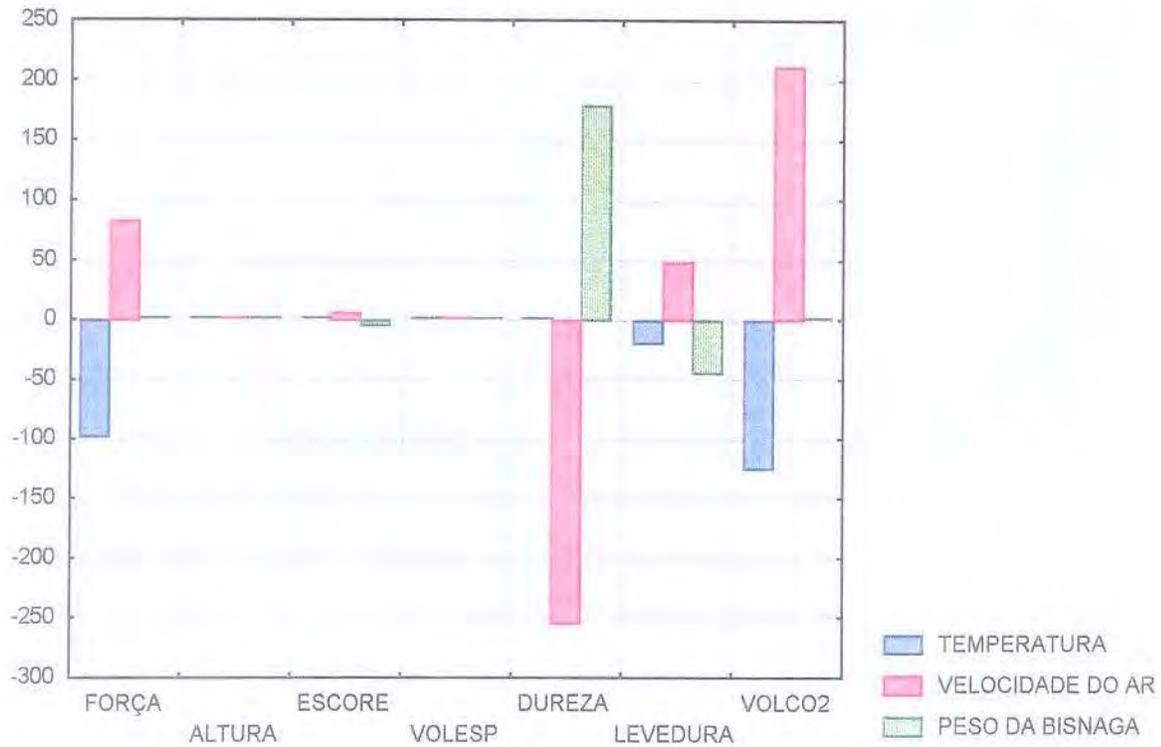


Figura 4.5. Efeito das variáveis sobre as características da massa e do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento.

Após 30 dias de estocagem a baixas temperaturas, as variáveis que sofreram maior influência continuaram sendo a força da massa, a dureza do miolo e o volume de CO₂ produzido pelas leveduras. A contagem de leveduras, por outro lado, foi moderadamente influenciada e as outras variáveis muito pouco influenciadas.

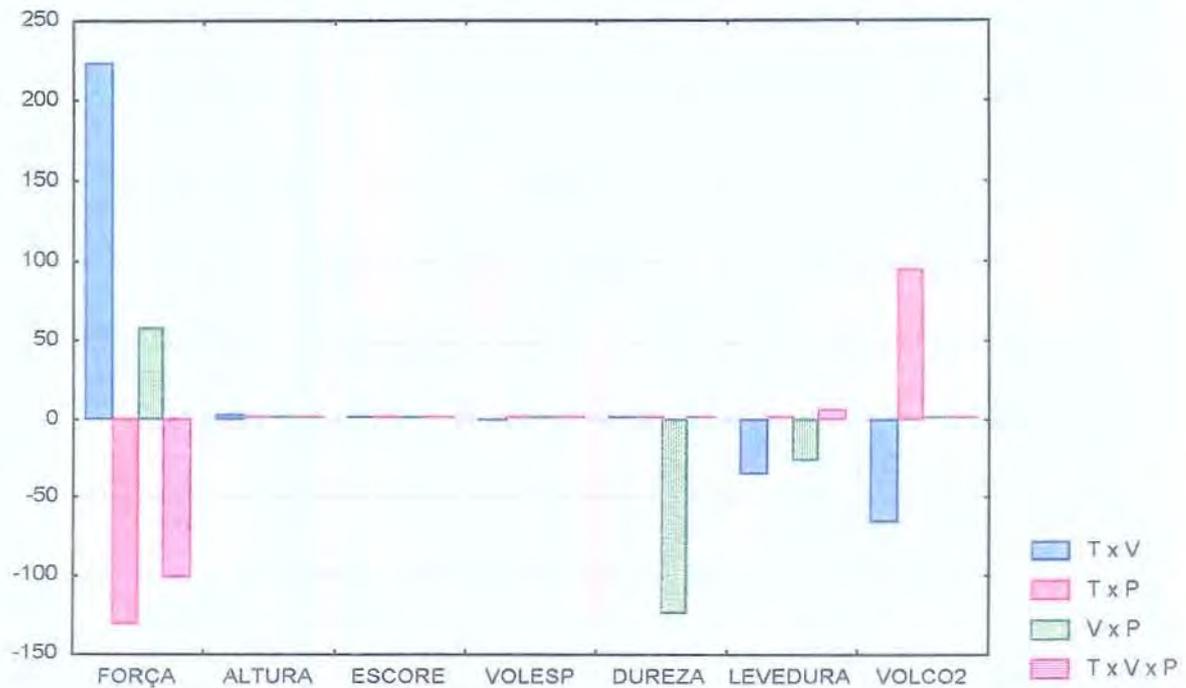


Figura 4.6. Efeito das interações das variáveis sobre as características da massa e do pão após 30 dias de armazenamento congelado.

O histograma da Figura 4.6 mostra:

- Uma influência considerável e positiva da interação da temperatura do ar com a velocidade do ar sobre a força da massa, negativa e pequena sobre a contagem de leveduras, e negativa e moderada sobre o volume de CO_2 ;
- Uma influência negativa da interação da temperatura com o peso da bisnaga sobre a força da massa, e positiva sobre o volume de CO_2 ;
- Uma influência positiva da interação da velocidade do ar com o peso da bisnaga sobre a força da massa, e negativa sobre a dureza do miolo e o volume de CO_2 produzido pelas leveduras;
- Uma influência negativa da interação das três variáveis independentes sobre a força da massa, e positiva, porém muito pequena, sobre a contagem de leveduras.

4.3.2.3. Após 60 dias de estocagem congelada

A Tabela 4.8 reúne os resultados obtidos nas análises da massa e do pão dos ensaios lineares de congelamento em túnel após 60 dias de armazenamento.

Tabela 4.8. Valores das variáveis medidas na massa e no pão dos congelamentos realizados em túnel após 60 dias de armazenamento congelado.

Exp	Temp	Vel	Peso	Força (g-f/mm)	Altura (mm)	Escore	Vesp (cm ³ /g)	Dureza (g-f)	Leved x 10 ⁵ (UFC/g)	Vol CO ₂ (mL)
T1	-25	3,06	80	1025	78,1	78,5	2,9	401,7	65	1063
T2	-15	3,06	80	1202	76,8	79,5	3,4	570,7	75	998
T3	-25	5,14	80	1088	73,3	87,5	4,4	273,2	110	1443
T4	-15	5,14	80	1188	77,7	79,5	2,9	441,7	120	1192
T5	-25	3,06	175	1197	70,1	69,0	1,6	1099,2	58	958
T6	-15	3,06	175	1021	78,6	71,0	2,3	546,9	58	1052
T7	-25	5,14	175	1383	72,9	80,0	3,8	276,7	103	1417
T8	-15	5,14	175	1190	77,9	77,5	2,7	577,6	53	1041

Os valores apresentados na Tabela 4.8 foram submetidos a tratamento estatístico que analisou os efeitos das variáveis independentes sobre as dependentes. A análise dos resultados permitiu verificar a influência positiva ou negativa, o nível de confiança e a magnitude, como se mostra na Tabela 4.9.

Analisando a Tabela 4.9, que mostra o efeito da temperatura do ar, da velocidade do ar e do peso da bisnaga, e as interações dessas variáveis sobre as características da massa e do pão após 60 dias de armazenamento congelado, verificou-se que:

- A temperatura do ar teve um efeito negativo na força da massa e no volume de CO₂ produzido pelas leveduras;
- A velocidade do ar tem um efeito positivo na força da massa, na contagem de leveduras e no volume de CO₂, e negativo na dureza do pão;
- O peso da bisnaga influenciou positivamente a força da massa e a dureza do pão, e negativamente a contagem de leveduras.

Tabela 4.9. Efeito da temperatura, da velocidade do ar, do peso da bisnaga e suas interações nas variáveis resposta da massa e do pão armazenados durante 60 dias.

		Força (g-f/mm)	Altura (mm)	Score	Vesp (cc/g)	Dureza (g-f)	Leved x 10 ⁵ (UFC/g)	Vol CO ₂ (mL)
Temperatura	Efeito	-23,0	4,15	-	-	-	-	-149,5
	IC, %	87	99	-	-	-	-	84
Velocidade	Efeito	101,0	-	6,625	0,90	-262,325	32,5	255,5
	IC, %	99	-	86	89	99	95	93
Peso	Efeito	72,0	-1,60	-6,875	-0,80	203,275	-24,5	-
	IC, %	98	94	87	87	98	92	-
Temp x Veloc	Efeito	-23,5	0,55	-	-0,95	213,175	-12,5	-164,0
	IC, %	88	72	-	90	98	78	86
Temp x Peso	Efeito	-161,5	2,60	-	-	-147,225	-17,5	-
	IC, %	99	97	-	-	97	87	-
Veloc x Peso	Efeito	76,5	1,50	-	-	-133,575	-12,5	-
	IC, %	98	94	-	-	96	78	-
T x V x P	Efeito	15,0	-2,30	-	-	213,425	-12,5	-
	IC, %	76	97	-	-	98	78	-
Correlação (r ²)		0,93	0,88	0,89	0,93	0,95	0,86	0,92

Todos estes efeitos são mostrados graficamente no histograma da Figura 4.7.

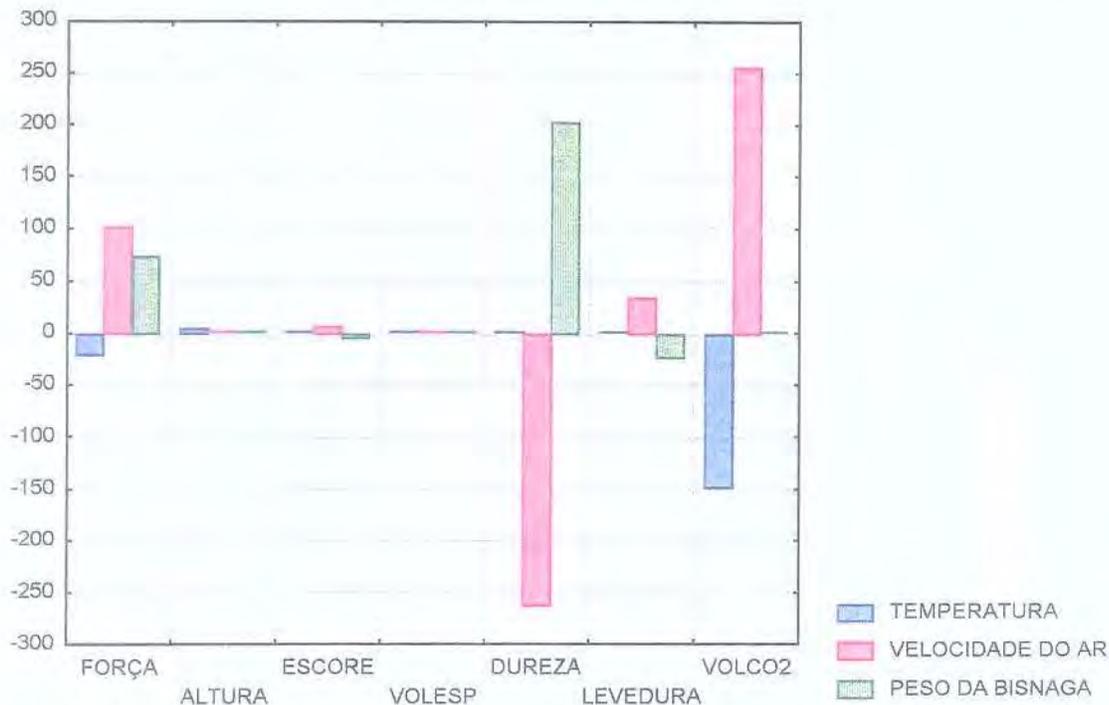


Figura 4.7. Efeito das variáveis sobre as características da massa e do pão após 60 dias de armazenamento congelado.

A análise das interações das variáveis independentes sobre as características da massa e do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento, mostrada na Figura 4.8, permitiu verificar que:

- A interação da temperatura do ar com a velocidade do ar influenciou negativamente a força da massa e o volume de CO_2 , e positivamente a dureza do pão;
- A interação da temperatura do ar com o peso da bisnaga influenciou negativamente a força da massa, a dureza do pão e a viabilidade das leveduras;
- A interação da velocidade do ar com o peso da bisnaga influenciou positivamente a força da massa e negativamente a dureza do pão e a viabilidade das leveduras;
- A interação das variáveis temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga influenciou positivamente a força da massa e a dureza do pão, e negativamente a contagem de leveduras.

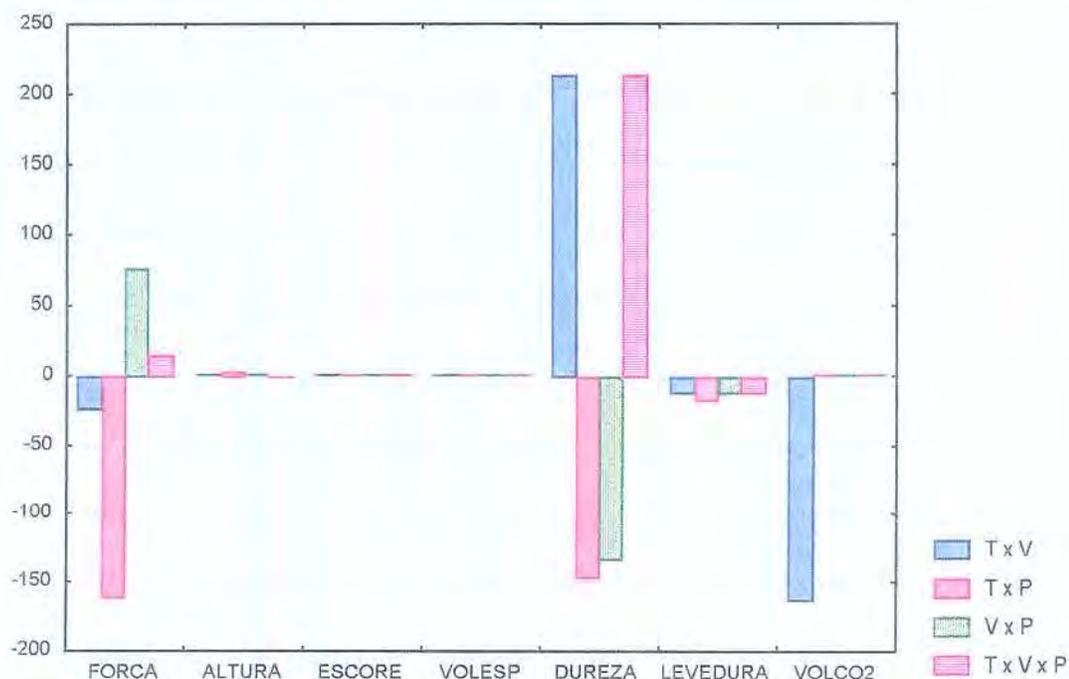


Figura 4.8.- Efeito das interações das variáveis sobre as características da massa e do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento.

Considerando as características reológicas da massa, representadas pela força e altura da massa, verificou-se uma influência maior das variáveis independentes estudadas sobre a força, quando comparada com a altura da massa.

Verificou-se que a extensibilidade da massa foi mais influenciada do que a altura. A temperatura prejudicou a extensibilidade após 30 e 60 dias de estocagem, não teve efeito nenhum na altura após 1 e 30 dias, mostrando um efeito benéfico após 60 dias.

Também, a velocidade do ar beneficiou a força da massa com 30 e 60 dias de armazenamento e só teve um efeito negativo após 1 dia de congelamento, tanto para a força, quanto para a altura da massa, e o tamanho da bisnaga teve um efeito não uniforme, tanto na força quanto na altura da massa.

A variação do efeito das variáveis temperatura, velocidade do ar e peso da bisnaga sobre as características reológicas da massa era esperada por ser estes parâmetros difíceis de medir, razão pela qual alguns resultados são contraditórios quando se consideram ambas

características. Como foi citado no estudo do congelamento criogênico, as características da massa obtidas com as medições de extensibilidade medidas no texturômetro e com as medições de altura da massa medidas no reofermentômetro não são as mesmas.

Considerando as características do pão, representadas pelo volume específico, o escore e a dureza do miolo, verificou-se que a temperatura não afetou as características do pão mas que a velocidade do ar teve um efeito positivo no volume específico e no escore do pão, e um efeito negativo na dureza. Quando a velocidade do ar passou de um valor de 3,06 m/s para 5,14 m/s, ela aumentou o volume específico do pão, aumentou o escore e diminuiu a dureza. O fato das velocidades do ar maiores apresentarem um efeito positivo nas características da massa foi comprovado por El-Hady *et al.* (1996), que trabalhando com temperaturas de congelamento de -20 a -30° C e com velocidades do ar de 1 e 3 m/s, concluíram que a melhor condição para obter maior atividade das leveduras e melhor qualidade do pão foi congelar a massa a -20° C com velocidade de 3 m/s. É necessário ressaltar que eles trabalharam com cilindros de massa maiores (peso 500 g, diâmetro 50 mm), que neste estudo e não foi especificado o tipo de congelador utilizado.

O tamanho da bisnaga teve um efeito negativo no volume específico, positivo na dureza e não uniforme no escore de qualidade tecnológica do pão. Quando esta variável passou do valor de 80 para 175 g, houve um efeito prejudicial no volume específico e na dureza do pão, assim como um efeito não uniforme nas notas, considerando-se então, que as características do pão foram menos prejudicadas nas bisnagas de massa menores. Este resultado pode ser explicado do ponto de vista da maior velocidade de congelamento e menor tempo no qual as bisnagas ficaram expostas às temperaturas de congelamento, o que pode ser observado claramente na figura mostrada no Anexo 3, que reúne os congelamentos lineares T1 a T8. Os congelamentos T1 e T3 com bisnagas de 80 g, apresentaram tempos de congelamento total menores que os congelamentos T7 e T8, realizados com bisnagas de 175 g. O fato das bisnagas maiores apresentar resultados menos benéficos pode dever-se então, aos maiores tempos que a massa fica submetida aos efeitos do frio, com maior possibilidade de formação dos cristais de gelo, que possam danificar a estrutura do glúten e

das leveduras, efeitos também comprovados por outros pesquisadores (Brown, 1991; Brümmer, 1995).

Considerando a produção de CO₂ e retenção de viabilidade das leveduras, verificou-se que a temperatura do túnel afetou de maneira não uniforme a contagem das leveduras, teve um efeito positivo após 1 dia, negativo com 30 dias e não teve efeito após 60 dias de armazenamento sob congelamento e que a temperatura do túnel teve um efeito negativo na produção de CO₂ pelas leveduras. Quando ela passou de -25 para -15°C, influenciou negativamente a produção de CO₂ pelas leveduras, sendo que houve uma diminuição proporcional ao tempo de armazenamento; com 1 dia houve uma diminuição de 77,5 mL, com 30 dias de 126,75 mL e de 149 mL com 60 dias de armazenamento sob congelamento.

Relacionando as duas variáveis (contagem de leveduras e volume de CO₂ produzido) com a temperatura, pode-se dizer que apesar de, com 1 dia, a contagem ter apresentado um leve aumento de 29 UFC, elas produziram 78 mL a menos de CO₂, com 30 dias houve uma redução de 20 UFC e uma diminuição de 127 mL de CO₂ e com 60 dias de estocagem sob congelamento, as células de levedura apresentaram novamente uma diminuição de 149 mL de CO₂ liberado. Verificou-se um efeito prejudicial da temperatura mais alta, na faixa de temperatura em estudo (-25 a -15° C), apresentando-se a temperatura de -25° C mais benéfica à manutenção da viabilidade celular e a produção de CO₂.

Também determinou-se que a velocidade do ar do túnel afetou clara e positivamente as características de viabilidade das leveduras e de produção de CO₂. Nos três tempos de armazenamento estudados houve aumento da contagem celular e do volume de CO₂ produzido. Quando a velocidade do ar passou de 3,06 para 5,14 m/s, houve um efeito benéfico na contagem de leveduras e no volume de CO₂.

O tamanho da bisnaga de massa afetou a contagem de leveduras após 30 e 60 dias de armazenamento sob congelamento, apresentando diminuições nos dois tempos e afetou negativamente também a produção de CO₂ após 1 dia. Quando se trabalhou com bisnagas

de massa maiores (175 g), houve um efeito prejudicial na contagem de leveduras e na produção de CO₂.

Relacionando as três variáveis estudadas, temperatura, velocidade do ar e tamanho da bisnaga, e seu efeito sobre a viabilidade e a produção de gás das leveduras, verificou-se que as condições de temperatura do ar menores, velocidades do ar maiores e tamanhos de bisnaga menores foram benéficos para o crescimento e atividade das leveduras. Estes resultados podem ser relacionados com o trabalho de Gehrke *et al.* (1992), que informaram que a velocidade de congelamento ótima para a levedura será suficientemente lenta para prevenir a formação de cristais de gelo intracelulares e simultaneamente rápida para evitar a injúria pelos efeitos de alta concentração de solutos. Também, Murakami *et al.* (1994) informaram que o crescimento e a viabilidade das leveduras diminuiu junto com a produção de CO₂ e que a causa deste efeito foi a desintegração das membranas celulares pela formação de cristais de gelo, sugerindo que os resultados deste trabalho nas faixas de temperatura menores e tempos de congelamento menores, houve menor oportunidade de formação de cristais de gelo grandes que pudessem danificar as leveduras e afetar a produção de gás.

4.3.3. Verificação de modelos empíricos que relacionam as variáveis independentes (temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga) com as variáveis resposta

Para a verificação de modelos empíricos quadráticos que relacionassem as variáveis resposta da qualidade da massa e do pão nos três tempos de estocagem estudados, foram calculados os coeficientes de regressão e montada a tabela ANOVA, que permitiu a realização do teste F, comparando o valor estimado de F, a partir dos dados experimentais com o valor tabelado para uma distribuição de referência. Para poder afirmar que a equação obtida pelo modelo é estatisticamente significativa e os dados experimentais são representados pelo modelo proposto, o valor do F estimado (calculado) deve ser no mínimo cinco vezes maior que o valor de F tabelado.

4.3.3.1. Verificação dos modelos quadráticos que relacionam as variáveis estudadas com as respostas obtidas.

Após a obtenção das tabelas ANOVA para cada variável estudada nos 3 tempos de estocagem avaliados chegou-se à comparação dos valores de F calculado e F tabelado como se mostra nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12. Os dados utilizados se apresentam no Anexo 4.

Tabela 4.10. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão, após 1 dia de congelamento.

Variável	Intervalo de Confiança (%)	F calculado (FC)	F tabelado (FT)	FC/FT	Modelo (*)
Força da massa	90	6,4	2,43	2,6	NP
Altura da massa	85	4,77	2,21	2,2	NP
Escore do pão	85	10,0	2,5	4,0	NP
Vol. específico	80	3,17	1,98	1,6	NP
Dureza do pão	90	4,17	2,51	1,7	NP
Leveduras	90	4,24	2,56	1,6	NP
Volume de CO ₂	90	9,6	3,07	3,1	NP

* NP = modelo não preditivo

Tabela 4.11. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão, após 30 dias de armazenamento sob congelamento.

Variável	Intervalo de Confiança (%)	F calculado (FC)	F tabelado (FT)	FC/FT	Modelo (*)
Força da massa	95	2,39	3,44	0,7	NP
Altura da massa	80	4,28	1,98	2,2	NP
Escore pão	80	4,65	1,98	2,3	NP
Vol. específico	80	4,34	1,93	2,2	NP
Dureza do pão	80	8,13	1,86	4,4	NP
Leveduras	80	3,28	1,90	1,7	NP
Volume de CO ₂	85	12,37	2,22	5,6	P

* P = modelo preditivo; NP = modelo não preditivo

Tabela 4.12. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão, após 60 dias de armazenamento sob congelamento.

Variável	Intervalo de Confiança (%)	F calculado (FC)	F tabelado (FT)	FC/FT	Modelo (*)
Força da massa	85	3,78	2,21	1,71	NP
Altura da massa	80	1,46	1,96	0,74	NP
Escore pão	75	6,66	1,55	4,29	NP
Vol específico	80	10,96	1,83	5,8	P
Dureza do pão	95	4,12	3,22	1,28	NP
Leveduras	75	2,68	1,60	1,67	NP
Volume de CO ₂	80	7,61	1,89	4,02	NP

* P = modelo preditivo; NP = modelo não preditivo

Observando as Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12, verifica-se que somente 2 respostas apresentaram os valores de F calculado pelo menos 5 vezes superiores ao F tabelado, elas

foram o volume de CO₂ na massa com 30 dias de estocagem e o volume específico do pão com 60 dias de armazenamento sob congelamento.

4.3.3.1.1. Verificação do modelo quadrático para o volume de CO₂ liberado pelas leveduras após 30 dias de armazenamento sob congelamento

Para verificação de um modelo quadrático para o volume de CO₂ liberado pelas leveduras considerando as variáveis temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga, foram calculados os coeficientes de regressão e feita a Tabela ANOVA. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14.

Tabela 4.13. Coeficiente de regressão para o volume de CO₂ com 30 dias de armazenamento sob congelamento

Fatores	Coefficientes de regressão	Erro padrão	t (2)	p	-85% Cnf. Limite	+85% Cnf. Limite
Média	1287,65*	23,83*	54,04*	0,00*	1233,28*	1342,02*
Temperatura (L)	-34,08*	11,20*	-3,04*	0,09*	-59,63*	-8,53*
Temperatura (Q)	-15,36	12,33	-1,24	0,34	-43,51	12,78
Velocidade (L)	87,73*	11,20*	7,84*	0,02*	62,18*	113,28*
Velocidade (Q)	-8,10	12,33	-0,66	0,58	-36,24	20,05
Peso (L)	11,66	11,20	1,04	0,41	-13,89	37,21
Peso (Q)	-8,28	12,33	-0,67	0,57	-36,42	19,87
Temp. x Velocidade	-33,12	14,62	-2,26	0,15	-66,49	0,24
Temperatura x Peso	47,88*	14,62*	3,27*	0,08*	14,51*	81,24*
Velocidade x Peso	-9,38	14,62	-0,64	0,59	-42,74	23,99

* valores estatisticamente significativos a 85% de confiança (p < 0,15)

L: linear, Q: quadrático.

Tabela 4.14. Tabela ANOVA para o volume de CO₂ com 30 dias de armazenamento sob congelamento

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F CALCULADO	F TABELADO
Regressão	139204,5	3	46401,5	12,37	2,22
Resíduos	48752,0	13	3750,2		
Falta de ajuste	45331,3	11	4121,0		
Erro puro	3420,7	2	1710,3		
Total	187956,5	16	11747,28		

% variação explicada (R^2) = 74,06

% máxima variação explicável ($(SQ_T - SQ_{EP})/SQ_T$) = 98,18

coeficiente de correlação (R) = 0,86

Pelos resultados mostrados na Tabela 4.14 da Análise de Variância (ANOVA), observa-se que o valor do teste F calculado foi de 12,37, cerca de 6 vezes maior que o valor de F tabelado de 2,2, indicando que o modelo de segunda ordem obtido é estatisticamente significativo e preditivo para os congelamentos estudados. Desta forma, a quantidade de CO₂ produzida pelas leveduras pode ser predita em função da temperatura do ar do túnel e do peso da bisnaga de massa, apresentando uma interação das variáveis temperatura e peso da bisnaga através da Equação (4.1) codificada.

$$\text{Volume CO}_2 = 1.287,65 - 34,08T + 87,73V + 47,88TP \quad [4.1]$$

Onde: Volume CO₂ em mL

T = temperatura do ar do túnel, em °C

V = velocidade do ar do túnel, em m/s

P = peso da bisnaga de massa, em g

4.3.3.1.2. Superfície de resposta do modelo que relaciona o volume de CO₂ com a temperatura do ar e o tamanho da bisnaga

A partir deste modelo, foi possível obter-se a superfície de resposta que permite analisar as melhores condições de temperatura do ar e tamanho de bisnaga, para maior produção de CO₂, conforme mostrado nas Figuras 4.9 a e b.

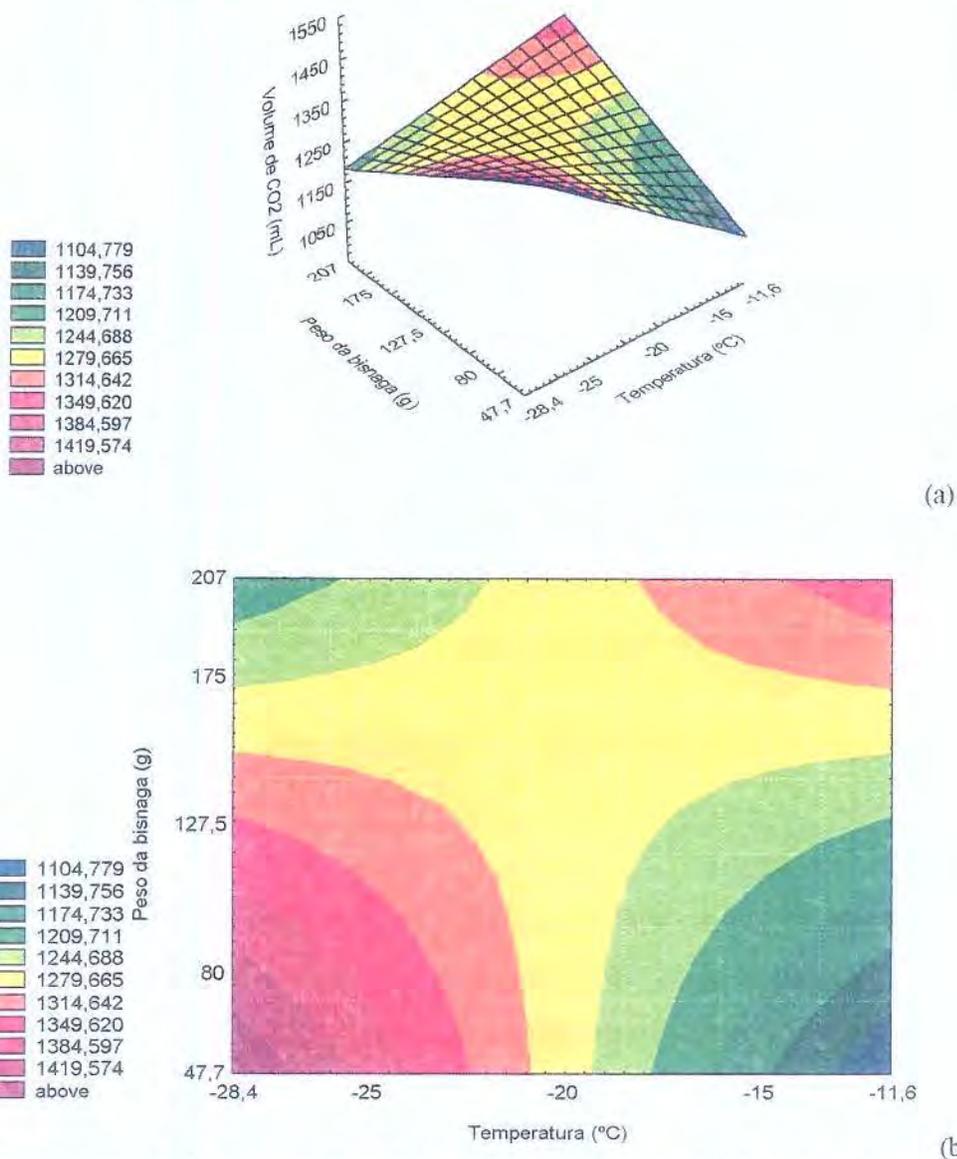


Figura 4.9. Superfície de resposta para a produção de CO₂ com 30 dias de armazenamento congelado em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga (a). Curva de contorno para a produção de CO₂ em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga (b).

A partir da análise da Figura 4.9, é possível dizer que a área de maior produção de CO₂ encontra-se na faixa de temperatura de -22 até -28,4° C e de peso de bisnaga de 50 a 127,5 gramas, com um valor médio de 1.474,62 mL de CO₂.

4.3.3.1.3. Verificação do modelo quadrático para o volume específico do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento.

Para verificação de um modelo quadrático para volume específico do pão, considerando as variáveis temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga de massa, foram calculados os coeficientes de regressão e feita a Tabela ANOVA. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.15 e 4.16.

Tabela 4.15. Coeficientes de regressão para o volume específico do pão com 60 dias de armazenamento sob congelamento

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t (2)	P	-80% Cnf. Limite	+80% Cnf. Limite
Média	2,92*	0,26*	11,25*	0,01*	2,43*	3,41*
Temperatura (L)	-0,06	0,12	-0,54	0,64	-0,30	0,16
Temperatura (Q)	0,19	0,13	1,38	0,30	-0,07	0,44
Velocidade (L)	0,30*	0,12*	2,46*	0,13*	0,07*	0,53*
Velocidade (Q)	-0,10	0,13	-0,72	0,54	-0,35	0,16
Peso (L)	-0,53*	0,12*	-4,34*	0,05*	-0,76*	-0,30*
Peso (Q)	-0,08	0,13	-0,59	0,61	-0,33	0,17
Temp. x Velocidade	-0,48*	0,16*	-2,98*	0,10*	-0,78*	-0,17*
Temperatura x Peso	0,08	0,16	0,47	0,68	-0,22	0,38
Velocidade x Peso	0,20	0,16	1,25	0,34	-0,10	0,50

* valores estatisticamente significativos a 80% de confiança (p < 0,20)

L: linear, Q: quadrático

Tabela 4.16. Tabela ANOVA para o volume específico do pão com 60 dias de armazenamento sob congelamento

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F CALCULADO	F TABELADO
Regressão	6,87	3	2,29	10,96	1,89
Resíduos	2,72	13	0,21		
Falta de ajuste	2,32	11	0,21		
Erro puro	0,41	2	0,20		
Total	9,60	16	0,60		

% variação explicada (R^2) = 71,62

% máxima variação explicável $(SQ_T - SQ_{EP})/SQ_T = 95,73$

coeficiente de correlação (R) = 0,85

Pelos resultados mostrados na Tabela 4.16 da análise de Variância (ANOVA) observa-se que o valor do teste F calculado foi de 10,96, cerca de 6 vezes maior que o valor de F tabelado de 1,89, indicando que o modelo de segunda ordem obtido é estatisticamente significativo e preditivo para os congelamentos estudados. Desta forma, o volume específico dos pães (cm^3/g) pode ser predito em função da temperatura do ar e da velocidade do ar do túnel através da Equação (4.2) codificada:

$$\text{Volume específico} = 2,92 + 0,30V - 0,53P - 0,48TV \quad [4.2]$$

Onde: Volume específico em cm^3/g

T = temperatura do ar do túnel, em °C

V = velocidade do ar do túnel, em m/s

P = peso da bisnaga de massa, em g

4.3.3.1.4. Superfície de resposta do modelo que relaciona o volume específico do pão com a temperatura do ar e a velocidade do ar do túnel.

A partir deste modelo, foi possível obter a superfície de resposta que permite analisar as melhores condições de temperatura do ar e velocidade do ar para os maiores valores de volume específico do pão. A superfície de resposta e o gráfico de contorno se apresentam na Figura 4.10 a e b.

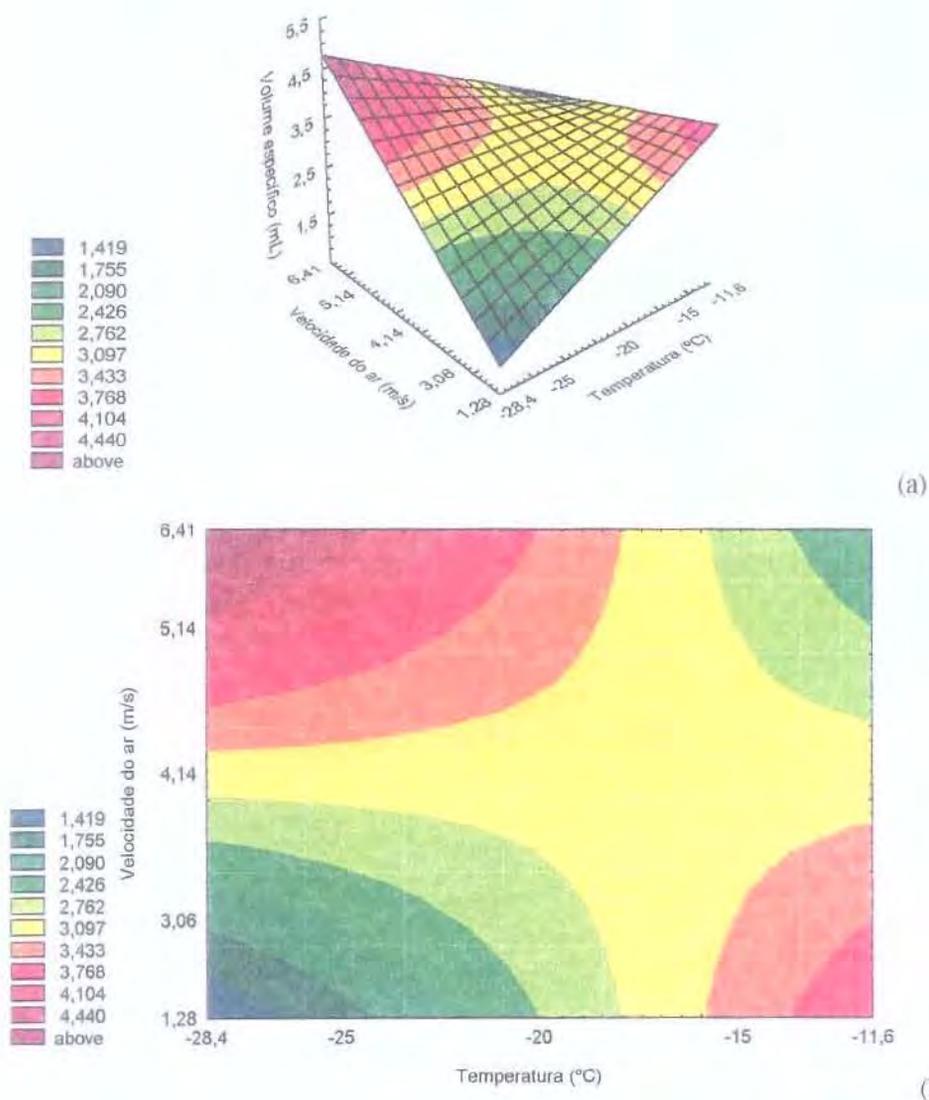


Figura 4.10. Superfície de resposta para o volume específico do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento (a). Curva de contorno para o volume específico do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento (b).

A partir da análise da Figura 4.10 **a** e **b**, é possível dizer que os maiores valores de volume específico do pão foram obtidos na faixa de temperatura de -21 até -28,4° C e de velocidade do ar do túnel na faixa de 4,5 a 6,4 m/s.

4.3.3.2. Verificação de modelos empíricos lineares que relacionem as variáveis estudadas com as respostas obtidas

Com os resultados das variáveis resposta dos ensaios lineares, incluindo os testes do ponto central, procurou-se verificar se haveria modelos lineares preditivos. Baseados na tabela ANOVA e pela comparação dos valores de F calculado e de F tabelado, determinaram-se primeiramente quais as variáveis que produziriam modelos de primeira ordem preditivos.

4.3.3.2.1. Modelos preditivos apresentados pelas massas após 1 dia de congelamento

Os resultados obtidos após 1 dia de congelamento se apresentam na Tabela 4.17.

Tabela 4.17. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão após 1 dia de congelamento.

Variável	Intervalo de Confiança (%)	F calculado (FC)	F tabelado (FT)	FC/FT	Modelo (*)
Força da massa	90	4,31	3,45	1,25	NP
Altura da massa	85	1,27	2,39	0,53	NP
Escore do pão	75	8,28	1,51	5,48	P
Vol. específico	75	5,23	1,66	3,15	NP
Dureza do pão	75	24,02	1,89	12,7	P
Leveduras	90	9,67	3,11	3,1	NP
Volume do CO ₂	75	3,78	1,79	2,11	NP

*P = modelo preditivo; NP = modelo não preditivo

Observando a Tabela 4.17, que mostra os valores de F calculado e F tabelado para as variáveis após 1 dia de congelamento, verifica-se que o escore e a dureza do pão foram as variáveis que apresentaram modelos preditivos.

4.3.3.2.1.1. Verificação do modelo linear para a variável escore do pão após 1 dia de congelamento

Para a verificação de um modelo linear para a variável escore do pão, considerando as variáveis temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga, foram calculados os coeficientes de regressão e feita a Tabela ANOVA. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.18 e 4.19.

Tabela 4.18. Coeficiente de regressão para escore do pão após 1 dia de congelamento.

Fatores	Coefficientes de regressão	Erro padrão	t (2)	P	-75% Cnf. Limite	+75% Cnf. Limite
Média	84,09*	1,00*	83,77*	0,00*	82,48*	85,70*
Temperatura (L)	0,50	1,18	0,42	0,71	-1,39	2,39
Velocidade (L)	0,12	1,18	0,11	0,92	-1,76	2,01
Peso (L)	-2,12*	1,18*	-1,80*	0,21*	-4,01*	-0,24*
Temp. x Velocidade	-0,75	1,18	-0,64	0,59	-2,64	1,14
Temperatura x Peso	0,75	1,18	0,64	0,59	-1,14	2,64
Velocidade x Peso	-0,62	1,18	-0,53	0,65	-2,51	1,26

* valores estatisticamente significativos a 75% de confiança ($p < 0,25$). L: linear.

Tabela 4.19. Tabela ANOVA para escore do pão após 1 dia de congelamento

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F CALCULADO	F TABELADO
Regressão	36,12	1	36,12	8,28	1,51
Resíduos	39,28	9	4,36		
Falta de ajuste	17,12	7	2,44		
Erro puro	22,17	2	11,08		
Total	75,41	10	7,54		

% variação explicada (R^2) = 47,90

% máxima variação explicável $(SQ_T - SQ_{EP})/SQ_T = 70,60$

coeficiente de correlação (R) = 0,69

Pelo fato dos coeficientes de regressão serem significativos somente para a variável peso de bisnaga e por apresentar um valor de R^2 baixo, não foi possível chegar à determinação de modelo ou da superfície de resposta.

4.3.3.2.1.2. Verificação do modelo linear para a variável dureza do pão após 1 dia de congelamento

Para a verificação de um modelo linear para a variável dureza do pão, considerando as variáveis temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga, foram calculados os coeficientes de regressão e feita a Tabela ANOVA. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.20 e 4.21.

Tabela 4.20. Coeficiente de regressão para dureza do pão com 1 dia de congelamento

Fatores	Coefficientes de regressão	Erro padrão	t (2)	P	-75% Cnf. Limite	+75% Cnf. Limite
Média	249,30*	3,97*	62,85*	0,00*	242,94*	255,66*
Temperatura (L)	-12,45*	4,65*	-2,68*	0,12*	-19,91*	-4,99*
Velocidade (L)	-42,55*	4,65*	-9,15*	0,01*	-50,01*	-35,09*
Peso (L)	59,558*	4,65*	12,80*	0,01*	52,09*	67,01*
Temp. x Velocidade	-1,45	4,65	-0,31	0,78	-8,91	6,01
Temperatura x Peso	8,50*	4,65*	1,83*	0,21*	1,04*	15,96*
Velocidade x Peso	-15,758*	4,65*	-3,39*	0,08*	-23,21*	-8,29*

* valores estatisticamente significativos a 75% de confiança ($p < 0,25$)

L: linear.

Tabela 4.21. Tabela ANOVA para dureza do pão após 1 dia de congelamento

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F CALCULADO	F TABELADO
Regressão	46656,16	5	9331,23	24,02	1,89
Resíduos	1942,44	5	388,49		
Falta de ajuste	1596,28	3	532,09		
Erro puro	346,16	2	173,08		
Total	48598,60	10	4859,86		

% variação explicada (R^2) = 96,00

% máxima variação explicável $(SQ_T - SQ_{EP})/SQ_T = 99,29$

coeficiente de correlação (R) = 0,98

Pelos resultados mostrados na Tabela 4.21 da análise de variância, observa-se que o valor do teste F calculado foi de 24,02, valor em torno de 13 vezes o valor do F tabelado 1,89, indicando que o modelo de primeira ordem obtido é estatisticamente significativo e preditivo para os congelamentos estudados. Desta forma, a dureza do miolo do pão pode ser predita em função da temperatura do ar, da velocidade do ar do túnel e do peso da bisnaga de massa através da Equação (4.3) codificada.

$$\text{Dureza do pão} = 249,30 - 12,45T - 42,55V + 59,558P + 8,50TP - 15,758VP \quad [4.3]$$

Onde: Dureza do pão em g-f/s

T = temperatura do ar do túnel, em °C

V = velocidade do ar do túnel, em m/s

P = peso da bisnaga de massa, em g

4.3.3.2.1.3. Superfície de resposta de modelo que relaciona a dureza do pão com a temperatura do ar e o peso da bisnaga

A partir do modelo foi possível obter-se as superfícies de resposta, que permitiram analisar as condições que proporcionaram maior dureza do pão em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga, como mostra na Figura 4.11 a e b.

Ao analisar as Figuras 4.11 a e b, pode-se dizer que os maiores valores de dureza do miolo do pão foram conseguidos com as bisnagas de tamanho maiores que 127,5 g e que a temperatura do ar tem uma influência menor na dureza do pão do que o peso da bisnaga de massa. Pensando que a dureza é uma característica negativa, os valores menores (pão mais macio) foram conseguidos na faixa de temperatura de -15 a -20° C com bisnagas de 80 g. Observa-se, também, que, independentemente da temperatura de congelamento, o aumento do peso da bisnaga de massa provocou um aumento na dureza do pão.

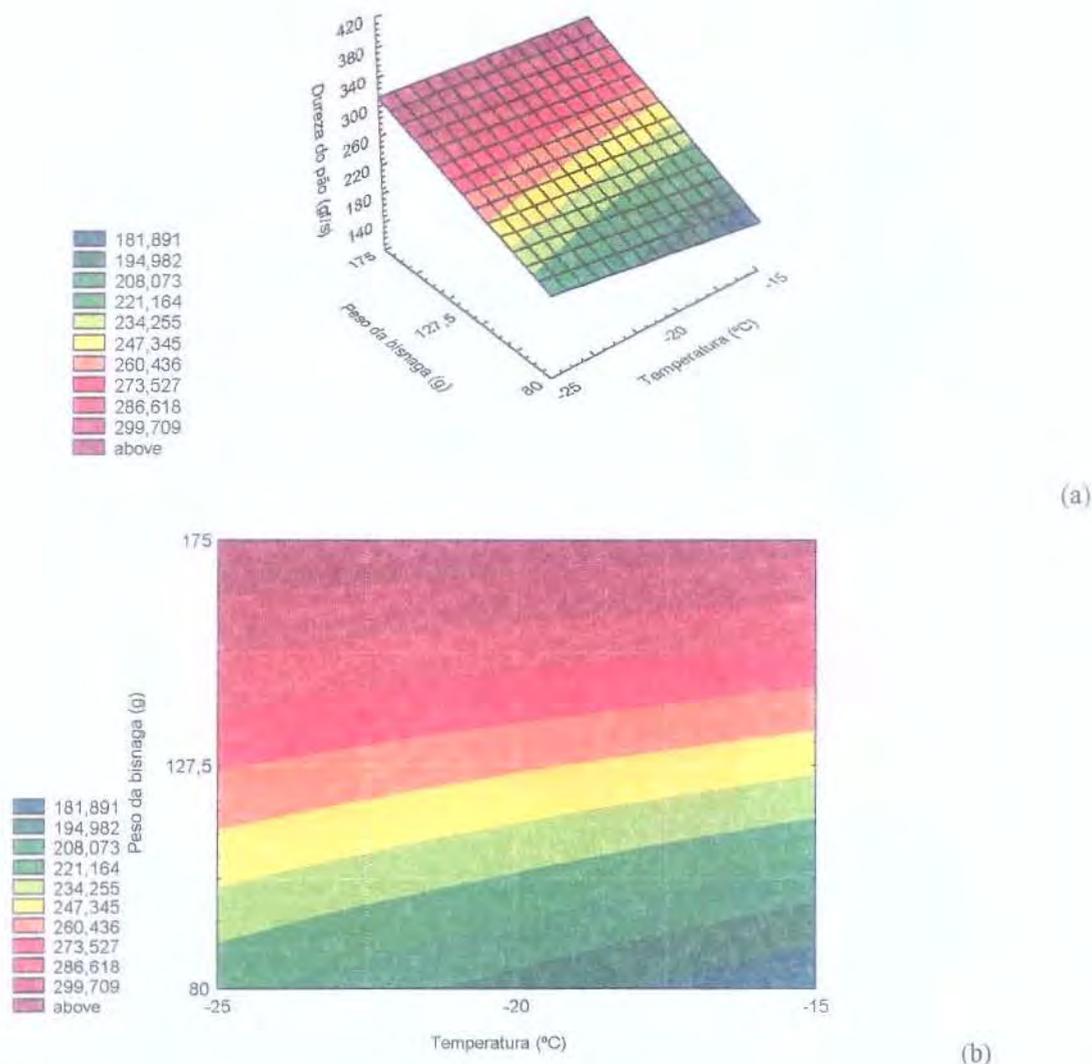


Figura 4.11. Superfície de resposta da dureza do pão em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga (a). Curva de contorno da dureza do pão em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga (b).

4.3.3.2.1.4. Superfície de resposta de modelo que relaciona a dureza do pão com a velocidade do ar e o peso da bisnaga

A partir do modelo foi possível obter-se a superfície de resposta que permitiu analisar as condições que produziram a maior dureza do miolo do pão em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga, e que são apresentadas nas Figuras 4.12 a e b.

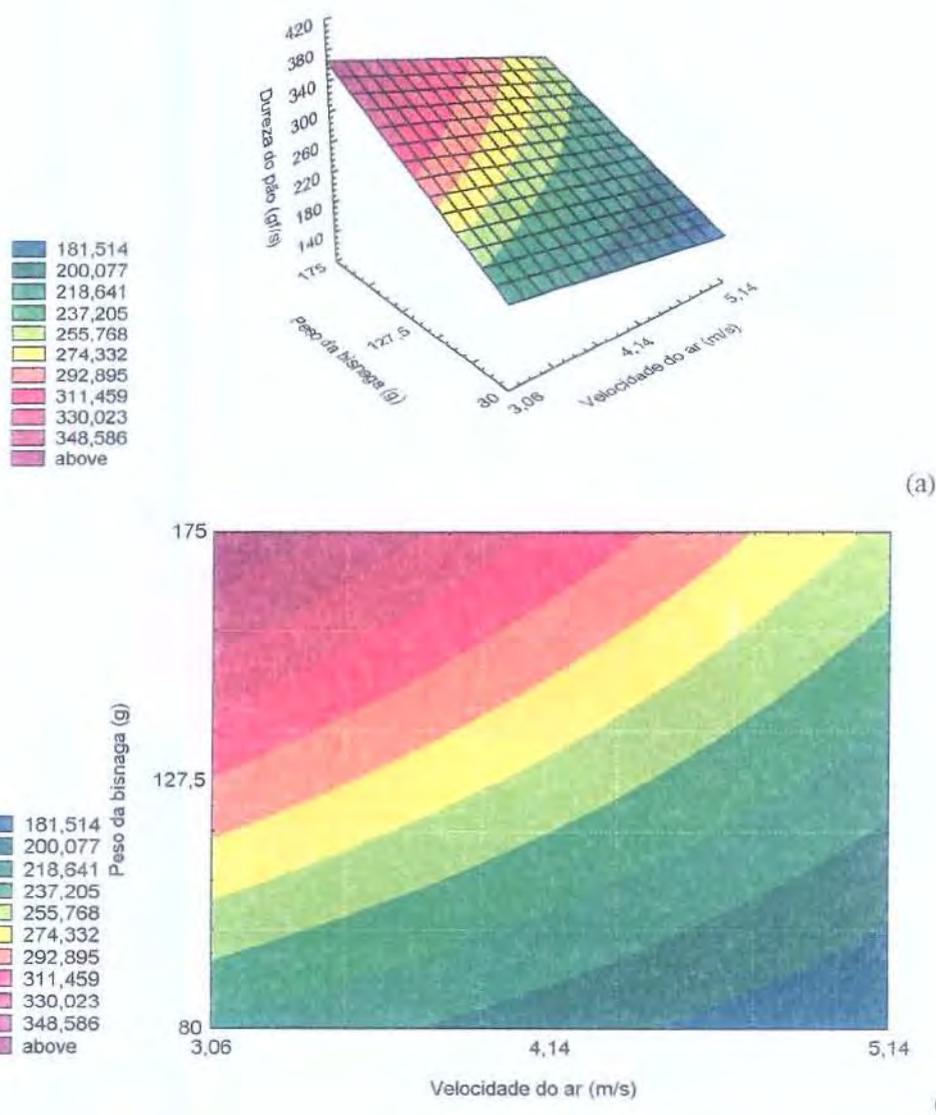


Figura 4.12. Superfície de resposta da dureza do pão em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga após 1 dia de congelamento (a). Curva de contorno da dureza do pão em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga após 1 dia de congelamento (b).

Ao analisar as Figuras 4.12 a e b, pode-se dizer que os maiores valores de dureza do pão foram encontrados para as condições de peso de bisnaga na faixa de 127,5 a 175 g e velocidades do ar na faixa de 3,06 a 4,14 m/seg. Para a melhor qualidade do pão e maior maciez do miolo, os menores valores de dureza do pão se concentram nas áreas de bisnaga menor (80g) e maiores velocidades do ar (5,14 m/s).

4.3.3.2.2. Modelos preditivos apresentados pela massa após 30 dias de armazenamento sob congelamento

Os resultados da análise estatística para verificação da determinação de modelos preditivos após 30 dias de armazenamento congelado se apresentam na Tabela 4.22.

Tabela 4.22. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento.

Variável	Intervalo de Confiança (%)	F calculado (FC)	F tabelado (FT)	FC/FT	Modelo (*)
Força da massa	95	5,11	5,02	1,02	NP
Altura da massa	80	5,20	2,13	2,44	NP
Escore do pão	75	7,88	1,66	4,74	NP
Vol. específico	80	9,76	2,14	4,56	NP
Dureza do pão	85	23,9	2,62	9,12	P
Leveduras	95	45,95	5,05	9,09	P
Volume do CO ₂	80	19,35	2,25	8,6	P

* P = modelo preditivo; NP = modelo não preditivo

Observando a Tabela 4.22, que mostra os valores de F calculado e F tabelado para todas as variáveis resposta após 30 dias de armazenamento sob congelamento, verificou-se que a dureza do miolo do pão, a contagem de leveduras e o volume de CO₂ apresentaram coeficientes entre F calculado e F tabelado bem superiores a 5, indicando que poderia obter-se modelos preditivos.

4.3.3.2.2.1. Verificação do modelo linear para a variável dureza do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento

Para a verificação de um modelo linear para a variável dureza do miolo do pão, considerando as variáveis temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga, foram

calculados os coeficientes de regressão e feita a Tabela ANOVA. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.23 e 4.24.

Tabela 4.23. Coeficiente de regressão para a dureza do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento

Fatores	Coefficientes de regressão	Erro padrão	t (2)	P	-85% Cnf. Limite	+85% Cnf. Limite
Média	390,27*	19,45*	20,07*	0,00*	345,89*	434,65*
Temperatura (L)	2,25	22,80	0,10	0,93	-49,79	54,29
Velocidade (L)	-127,75*	22,80*	-5,60*	0,03*	-179,79*	-75,71*
Peso (L)	90,50*	22,80*	3,97*	0,06*	38,46*	142,54*
Temp. x Velocidade	28,50	22,80	1,25	0,34	-23,54	80,54
Temperatura x Peso	-19,25	22,80	-0,84	0,49	-71,29	32,79
Velocidade x Peso	-61,75*	22,80*	-2,71*	0,11*	-113,79*	-9,71*

* valores estatisticamente significativos a 85% de confiança ($p < 0,15$)

L: linear.

Tabela 4.24. Tabela ANOVA para a dureza do pão após 30 dias de armazenamento sob congelamento

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F CALCULADO	F TABELADO
Regressão	226587,0	3	75529,0	23,90	2,62
Resíduos	22121,2	7	3160,2		
Falta de ajuste	13800,5	5	2760,1		
Erro puro	8320,7	2	4160,3		
Total	248708,2	10	24870,8		

% variação explicada (R^2) = 91,11

% máxima variação explicável $(SQ_T - SQ_{EP})/SQ_T = 96,65$

coeficiente de correlação (R) = 0,95

Pelos resultados da Tabela 4.24 da análise de variância observa-se que o valor do teste F calculado foi de 23,9, valor em torno de 9 vezes maior que F tabelado de 2,62,

indicando que o modelo de primeira ordem obtido é estatisticamente significativo e preditivo para os congelamentos estudados. Desta forma, a dureza do miolo do pão pode ser predita em função da velocidade do ar do túnel e do peso da bisnaga da massa (P) através da Equação (4.4) codificada:

$$\text{Dureza do pão} = 390,27 - 127,75V + 90,50P - 61,75VP \quad [4.4]$$

Onde: Dureza em g-f/s

V = velocidade do ar do túnel, em m/s

P = peso da bisnaga de massa, em g

4.3.3.2.2. Superfície de resposta de modelo que relaciona a dureza do pão com a velocidade do ar e o peso da bisnaga

A partir do modelo foi possível obter-se a superfície de resposta que permitiu analisar as condições que produziram a maior dureza do miolo do pão em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga após 30 dias de armazenamento sob congelamento e que são apresentadas nas Figuras 4.13 a e b.

Ao analisar as Figuras 4.13 a e b, pode-se dizer que os maiores valores de dureza do miolo do pão foram conseguidos nas condições de bisnaga na faixa de 127,5 a 175 g e de velocidade na faixa de 3,06 a 4,11 m/s. Contrariamente, a maior maciez do miolo se obteve na faixa de bisnagas menores e de velocidades maiores. É interessante verificar pela Figura 4.13 b que mostra a curva de contorno, que em valores de velocidade alta do túnel conseguiram-se valores altos de maciez para todos os pesos de bisnaga, o que quer dizer que em valores de velocidade acima de 4,14 m/s o tamanho da bisnaga não influenciou na maciez do pão.

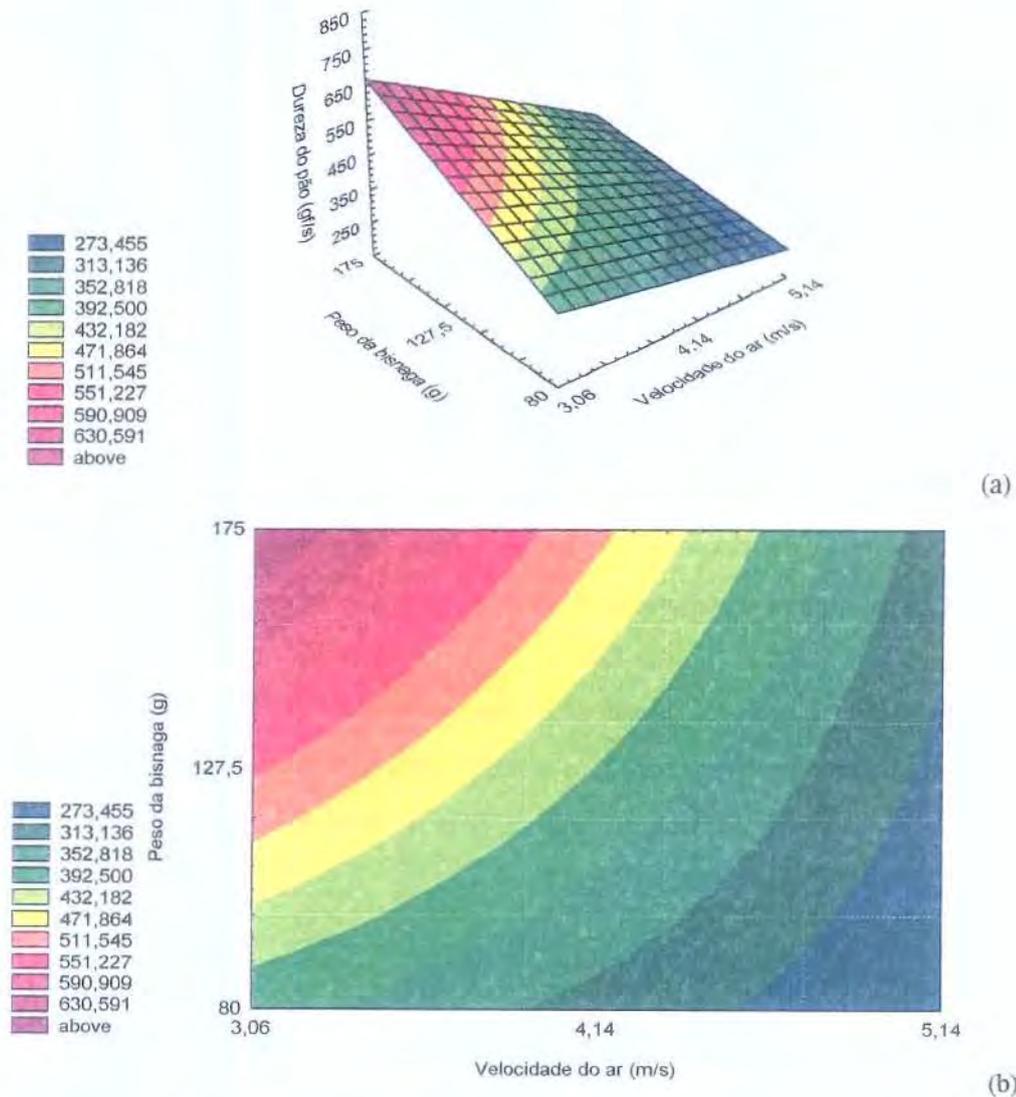


Figura 4.13. Superfície de resposta da dureza do pão em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga após 30 dias de armazenamento sob congelamento (a). Curva de contorno da dureza do pão em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga após 30 dias de armazenamento sob congelamento (b).

4.3.3.2.2.3. Verificação do modelo linear para a variável contagem de leveduras após 30 dias de armazenamento congelado

Para a verificação de um modelo linear para a variável contagem de leveduras, considerando as variáveis temperatura, velocidade do ar e peso da bisnaga, foram

calculados os coeficientes de regressão e feita a Tabela ANOVA. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.25 e 4.26.

Tabela 4.25. Coeficiente de regressão para contagem de leveduras após 30 dias de armazenamento.

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t (2)	P	-95% Cnf. Limite	+95% Cnf. Limite
Média	92,09*	1,84*	49,99*	0,00*	84,16*	100,02*
Temperatura (L)	-10,25*	2,16*	-4,74*	0,04*	-19,54*	-0,96*
Velocidade (L)	24,00*	2,16*	11,11*	0,01*	14,70*	33,29*
Peso (L)	-23,00*	2,16*	10,65*	0,01*	-32,29*	-13,70*
Temp. x Velocidade	-17,25*	2,16*	-7,98*	0,02*	-26,54*	-7,96*
Temperatura x Peso	-0,75	2,16	-0,35	0,76	-10,04	8,54
Velocidade x Peso	-13,00*	2,16*	-6,02*	0,03*	-22,29*	-3,70*

* valores estatisticamente significativos a 95% de confiança ($p < 0,05$)

Tabela 4.26. Tabela ANOVA, para contagem de leveduras após 30 dias de armazenamento sob congelamento.

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F CALCULADO	F TABELADO
Regressão	13413,00	5	2682,600	45,95	5,05
Resíduos	291,91	5	58,382		
Falta de ajuste	217,24	3	72,414		
Erro puro	74,67	2	37,333		
Total	13704,91	10	1370,491		

% variação explicada (R^2) = 97,87

% máxima variação explicável $(SQ_T - SQ_{EP})/SQ_T = 99,46$

coeficiente de correlação (R) = 0,99

Pelos resultados da Tabela 4.26 da análise de variância observa-se que o valor do teste F calculado foi de 45,95, valor em torno de 9 vezes maior que F tabelado de 5,05,

indicando que o modelo de primeira ordem obtido é estatisticamente significativo e preditivo para os congelamentos estudados. Desta forma, a contagem de leveduras pode ser predita em função da temperatura (T), da velocidade do ar do túnel (V) e do peso da bisnaga da massa (P) através as Equação (4.5) codificada:

$$\text{Contagem de leveduras} = 92,09 - 10,25T + 24,00V - 23,00P - 17,25TV - 13,00VP \quad [4.5]$$

Onde: Contagem de leveduras em UFC/g

T = temperatura do ar do túnel, em °C

V = velocidade do ar do túnel, em m/s

P = peso da bisnaga de massa, em g

4.3.3.2.2.4. Superfície de resposta de modelo que relaciona a contagem de leveduras com a velocidade do ar e a temperatura

A partir do modelo foi possível obter-se a superfície de resposta que permitiu analisar as condições que produziram a maior contagem de leveduras, em função da velocidade do ar e da temperatura, após 30 dias de congelamento e que são apresentadas nas Figuras 4.14 a e b.

Ao analisar as Figuras 4.14 a e b, pode-se dizer que os maiores valores de contagem de leveduras foram conseguidos nas condições de temperatura inferior (faixa de -20 a -25°C) e de velocidade maior (4,3 a 5,14 m/s).

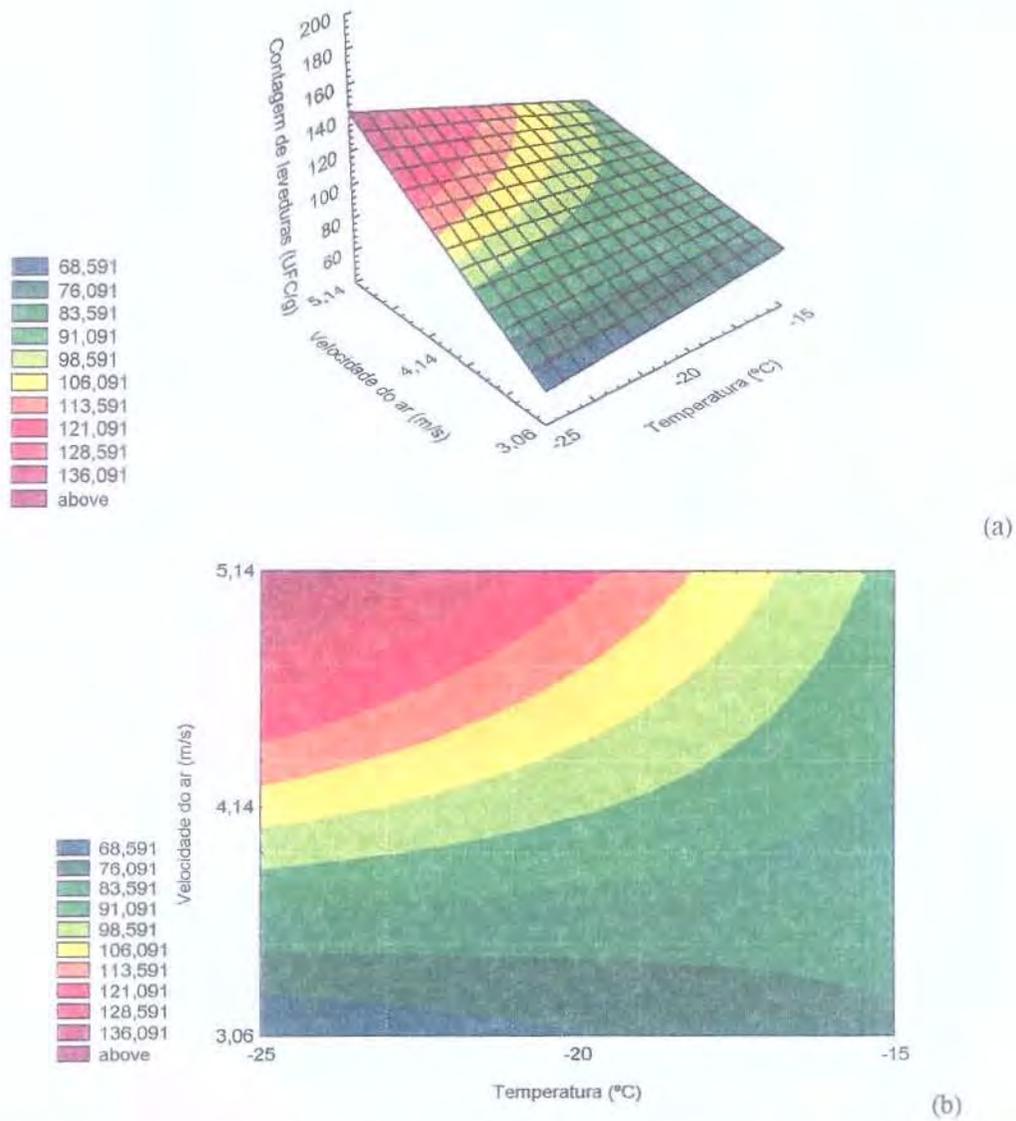


Figura 4.14.- Superfície de resposta da contagem de leveduras em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento sob congelamento (a). Curva de contorno da contagem de leveduras em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento sob congelamento (b).

4.3.3.2.2.5. Superfície de resposta de modelo que relaciona a contagem de leveduras com a velocidade do ar e o peso da bisnaga

A partir do modelo foi possível obter-se a superfície de resposta que permitiu analisar as condições que produziram a maior contagem de leveduras, em função da velocidade do ar e do peso da bisnaga, após 30 dias de congelamento e que são apresentadas nas Figuras 4.15 a e b.

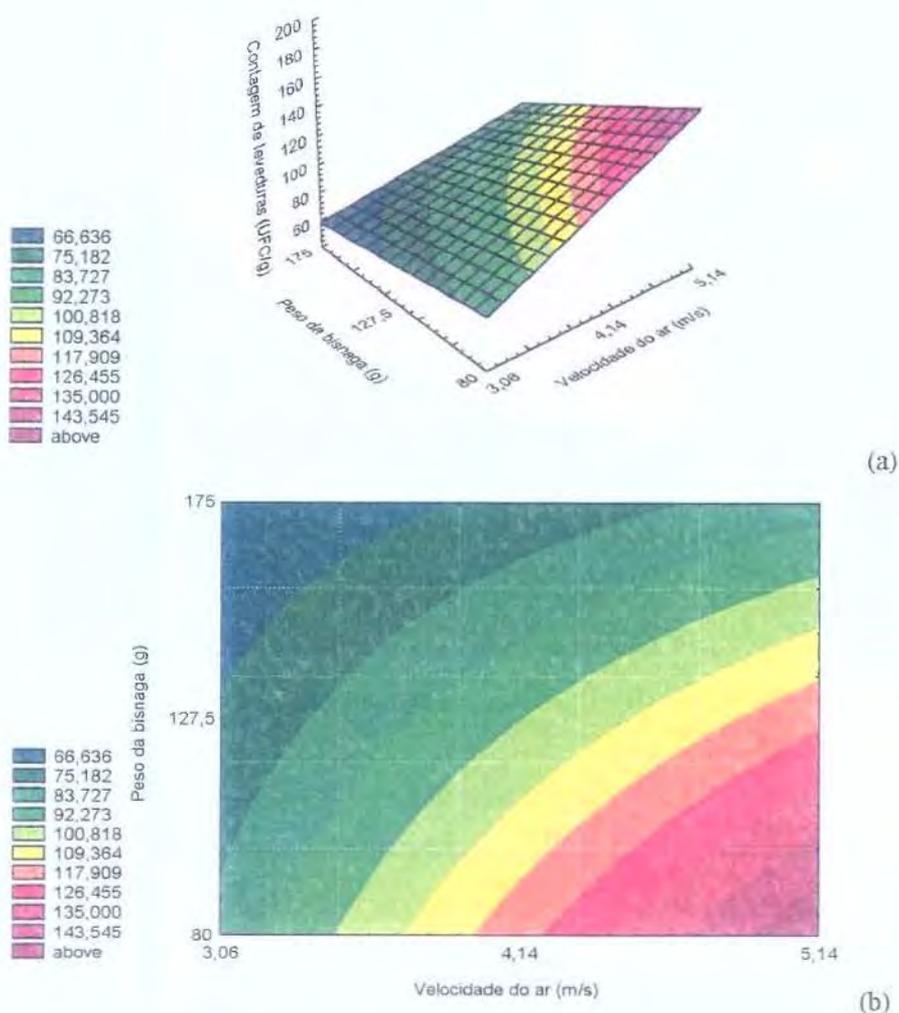


Figura 4.15. Superfície de resposta da contagem de leveduras em função da velocidade do ar e do peso de bisnaga após 30 dias de armazenamento sob congelamento (a). Curva de contorno da contagem de leveduras em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento sob congelamento (b).

Ao analisar as Figuras 4.15 a e b, pode-se dizer que os maiores valores de contagem de leveduras foram conseguidos nas condições de bisnaga na faixa de 80 a 120 g e de velocidade de 4,2 a 5,14 m/s

4.3.3.2.6. Verificação do modelo linear para a variável volume de CO₂ após 30 dias de estocagem sob congelamento

Para a verificação de um modelo linear para a variável volume de CO₂, considerando as variáveis temperatura, velocidade do ar e peso da bisnaga, foram calculados os coeficientes de regressão e feita a Tabela ANOVA. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.27 e 4.28.

Tabela 4.27. Coeficiente de regressão para o volume de CO₂ após 30 dias de armazenamento sob congelamento.

Fatores	Coefficientes de regressão	Erro padrão	t (2)	p	-80% Cnf. Limite	+80% Cnf. Limite
Média	1250,82*	12,47*	100,31*	0,00*	1227,31*	1274,33*
Temperatura (L)	-63,38*	14,62*	-4,33*	0,05*	-90,95*	-35,80*
Velocidade (L)	106,38*	14,62*	7,28*	0,02*	78,80*	133,95*
Peso (L)	13,38	14,62	0,91	0,46	-14,20	40,95
Temp. x Velocidade	-33,12*	14,62*	-2,26*	0,15*	-60,70*	-5,55*
Temperatura x Peso	47,88*	14,62*	3,27*	0,08*	20,30*	75,45*
Velocidade x Peso	-9,38	14,62	-0,64	0,59	-36,95	18,20

* valores estatisticamente significativos a 80% de confiança (p < 0,20)

Tabela 4.28. Tabela ANOVA, para o volume de CO₂ após 30 dias de armazenamento sob congelamento.

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F CALCULADO	F TABELADO
Regressão	149770,4	4	37442,60	19,35	2,25
Resíduos	11607,2	6	1934,53		
Falta de ajuste	8186,5	4	2046,62		
Erro puro	3420,7	2	1710,33		
Total	161377,6	10	16137,76		

% variação explicada (R^2) = 92,81

% máxima variação explicável ($(SQ_T - SQ_{EP})/SQ_T$) = 97,88

coeficiente de correlação (R) = 0,96

Pelos resultados da Tabela 4.28 da análise de variância observa-se que o valor do teste F calculado foi de 19,35, valor em torno de 9 vezes maior que F tabelado de 2,25, indicando que o modelo de primeira ordem obtido é estatisticamente significativo e preditivo para os congelamentos estudados. Desta forma, o volume de CO₂ pode ser predito em função da temperatura, da velocidade do ar do túnel e do peso da bisnaga da massa através da Equação (4.6) codificada:

$$\text{Volume de CO}_2 = 1.250,82 - 63,38T + 106,38V - 33,12TV + 47,88TP \quad [4.6]$$

Onde: Volume de CO₂ em mL

T = temperatura do ar do túnel, em °C

V = velocidade do ar do túnel, em m/s

P = peso da bisnaga de massa, em g

4.3.3.2.2.7. Superfície de resposta de modelo que relaciona o volume de CO₂ com a velocidade do ar e a temperatura

A partir do modelo foi possível obter-se a superfície de resposta que permitiu analisar as condições que produziram o maior volume de CO₂, em função da velocidade do ar e da temperatura, após 30 dias de congelamento e que são apresentadas nas Figuras 4.16 a e b.

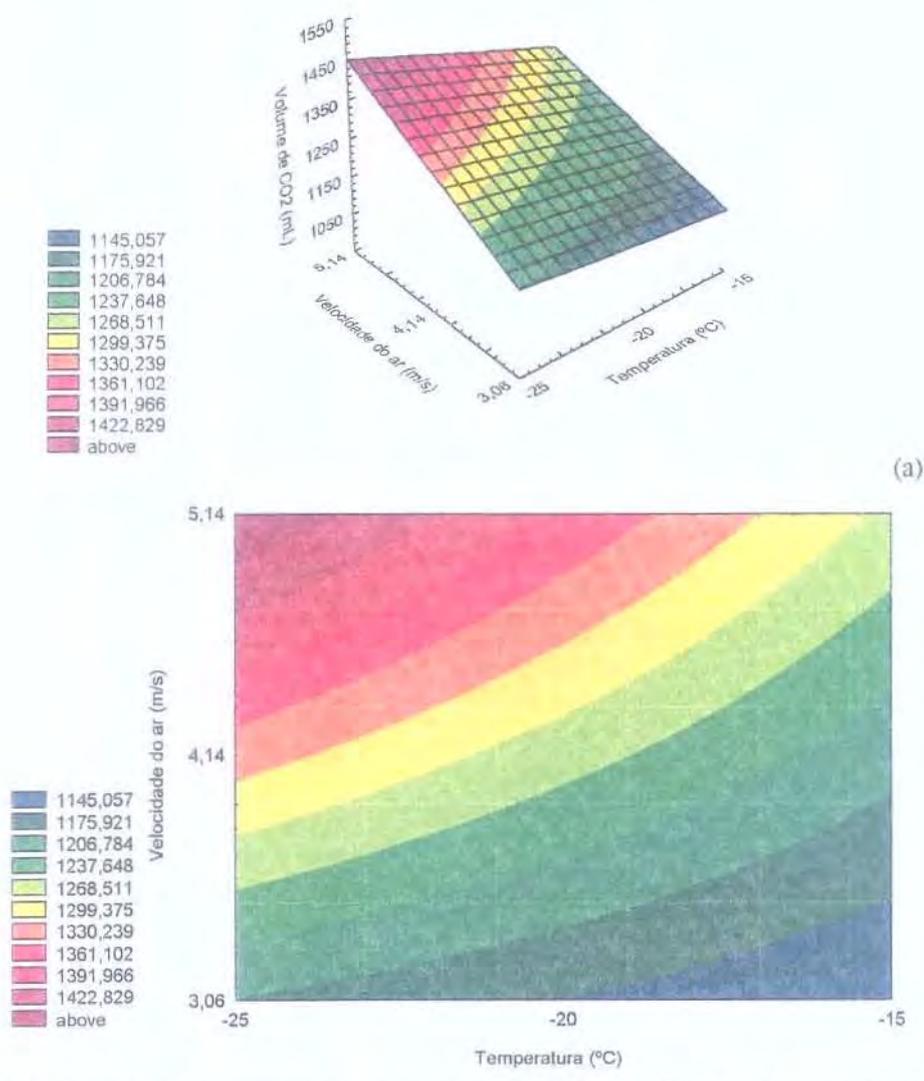


Figura 4.16. Superfície de resposta do volume de CO₂ em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento sob congelamento (a). Curva de contorno do volume de CO₂ em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento sob congelamento (b).

Ao analisar as Figuras 4.16 **a** e **b**, pode-se dizer que os maiores valores de volume de CO₂ foram conseguidos nas condições de temperatura inferior (faixa de -20 a -25°C) e de velocidade maior (acima de 4,14 m/s) e foram de 1.391 a 1.465 mL de CO₂.

4.3.3.2.2.8. Superfície de resposta de modelo que relaciona o volume de CO₂ com a temperatura e o peso da bisnaga

A partir do modelo foi possível obter-se a superfície de resposta que permitiu analisar as condições que produziram o maior volume de CO₂, em função da temperatura do ar e do peso da bisnaga, após 30 dias de congelamento e que são apresentadas nas Figuras 4.17 **a** e **b**.

Ao analisar as Figuras 4.17 **a** e **b**, pode-se dizer que os maiores valores de volume de CO₂ foram conseguidos na faixa de bisnaga de 80 a 145 g e de temperatura menor (faixa de -22 a -25° C) e que foram de 1.301,38 a 1341 mL de CO₂.

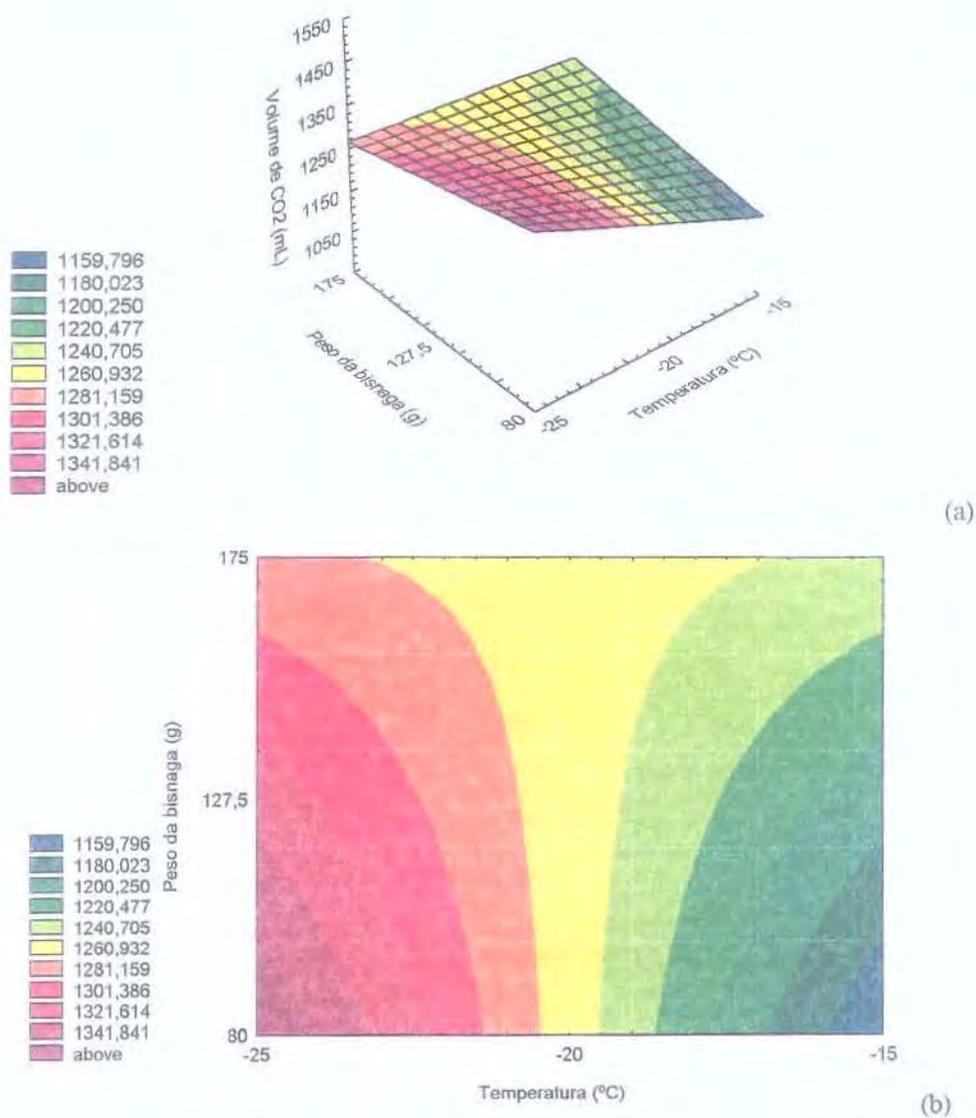


Figura 4.17. Superfície de resposta do volume de CO₂ em função da temperatura do ar e do peso de bisnaga após 30 dias de armazenamento sob congelamento (a). Curva de contorno da contagem de leveduras em função da velocidade do ar e da temperatura após 30 dias de armazenamento sob congelamento (b).

4.3.3.2.3. Modelos preditivos apresentados pelas massas armazenadas durante 60 dias

Após a análise estatística dos resultados da qualidade da massa e do pão com 60 dias de estocagem determinaram-se as variáveis que produziram modelos preditivos e que são apresentados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29. Valores de F calculado e F tabelado com os respectivos intervalos de confiança para cada resposta estudada da qualidade da massa e do pão após 60 dias de armazenamento sob congelamento.

Variável	Intervalo de Confiança (%)	F calculado (FC)	F tabelado (FT)	FC/FT	Modelo (*)
Força da massa	85	8,19	3,37	2,43	NP
Altura	70	4,09	3,18	1,28	NP
Score do pão	85	9,68	2,63	3,68	NP
Vol. específico	85	10,64	2,62	4,06	NP
Dureza	95	3,39	----	----	NP
Leveduras	75	3,70	5,05	0,73	NP
Volume do CO ₂	80	13,76	2,17	6,34	P

* P = modelo preditivo; NP = modelo não preditivo

Ao observar a Tabela 4.29, que mostra os valores de F calculado e F tabelado, verificou-se que o volume de CO₂ foi a única resposta que apresentou um coeficiente maior que 5 após 60 dias de armazenamento congelado.

4.3.3.2.3.1. Verificação do modelo linear para a variável volume de CO₂ após 60 dias de armazenamento sob congelamento

Para a verificação de um modelo linear para a variável volume de CO₂ após 60 dias de estocagem, considerando as variáveis temperatura, velocidade do ar e peso da bisnaga, foram calculados os coeficientes de regressão e feita a Tabela ANOVA. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.30 e 4.31.

Tabela 4.30. Coeficiente de regressão para o volume de CO₂ após 60 dias de armazenamento sob congelamento

Fatores	Coefficientes de regressão	Erro padrão	t (2)	p	-80% Cnf. Limite	+80% Cnf. Limite
Média	1153,54*	28,78*	40,08*	0,00*	1099,28*	1207,81*
Temperatura (L)	-74,75*	33,75*	-2,22*	0,16*	-138,38*	-11,12*
Velocidade (L)	127,75*	33,75*	3,78*	0,06*	64,12*	191,38*
Peso (L)	-28,50	33,75	-0,84	0,49	-92,13	35,13
Temp. x Velocidade	-82,00*	33,75*	-2,43*	0,14*	-145,63*	-18,37*
Temperatura x Peso	4,25	33,75	0,12	0,91	-59,38	67,88
Velocidade x Peso	-15,75	33,75	-0,47	0,69	-79,38	47,88

* valores estatisticamente significativos a 80% de confiança ($p < 0,20$)

Tabela 4.31. Tabela ANOVA, para o volume de CO₂ após 60 dias de armazenamento sob congelamento

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F CALCULADO	F TABELADO
Regressão	229053,0	3	76351,0	13,76	2,17
Resíduos	38829,7	7	5547,1		
Falta de ajuste	20607,7	5	4121,5		
Erro puro	18222,0	2	9111,0		
Total	267882,7	10	26788,3		

% variação explicada (R^2) = 85,50

% máxima variação explicável $(SQ_T - SQ_{EP})/SQ_T = 93,20$

coeficiente de correlação (R) = 0,92

Pelos resultados da Tabela 4.31 da análise de variância observa-se que o valor do teste F calculado foi de 13,76, valor em torno de 6 vezes maior que F tabelado de 2,17,

indicando que o modelo de primeira ordem obtido é estatisticamente significativo e preditivo para os congelamentos estudados. Desta forma, o volume de CO₂ pode ser predito em função da temperatura (T) e da velocidade do ar do túnel (V) através as Equação (4.7) codificada:

$$\text{Volume de CO}_2 = 1.153,54 - 74,75T + 127,75V - 82,00TV \quad [4.7]$$

Onde: Volume de CO₂ em mL

T = temperatura do ar do túnel, em °C

V = velocidade do ar do túnel, em m/s

4.3.3.2.3.2. Superfície de resposta de modelo que relaciona o volume de CO₂ com a velocidade do ar e a temperatura após 60 dias de armazenamento sob congelamento

A partir do modelo foi possível obter-se a superfície de resposta que permitiu analisar as condições que produziram o maior volume de CO₂, em função da velocidade do ar e da temperatura, após 60 dias de congelamento e que são apresentadas nas Figuras 4.18 a e b.

Ao analisar as Figuras 4.18 a e b, pode-se dizer que os maiores valores de volume de CO₂ foram conseguidos nas condições de temperatura inferior (faixa de -20 a -25°C) e de velocidade maior do ar do túnel (acima de 4,14 m/s) e que foram de 1.366 a 1.465 mL de CO₂.

Analisando os resultados dos modelos preditivos obtidos após análise estatística, verificou-se que o modelo linear ajustou-se melhor às condições de trabalho deste estudo, mostrando um maior número de variáveis resposta, uma influencia significativa na qualidade da massa e do pão.

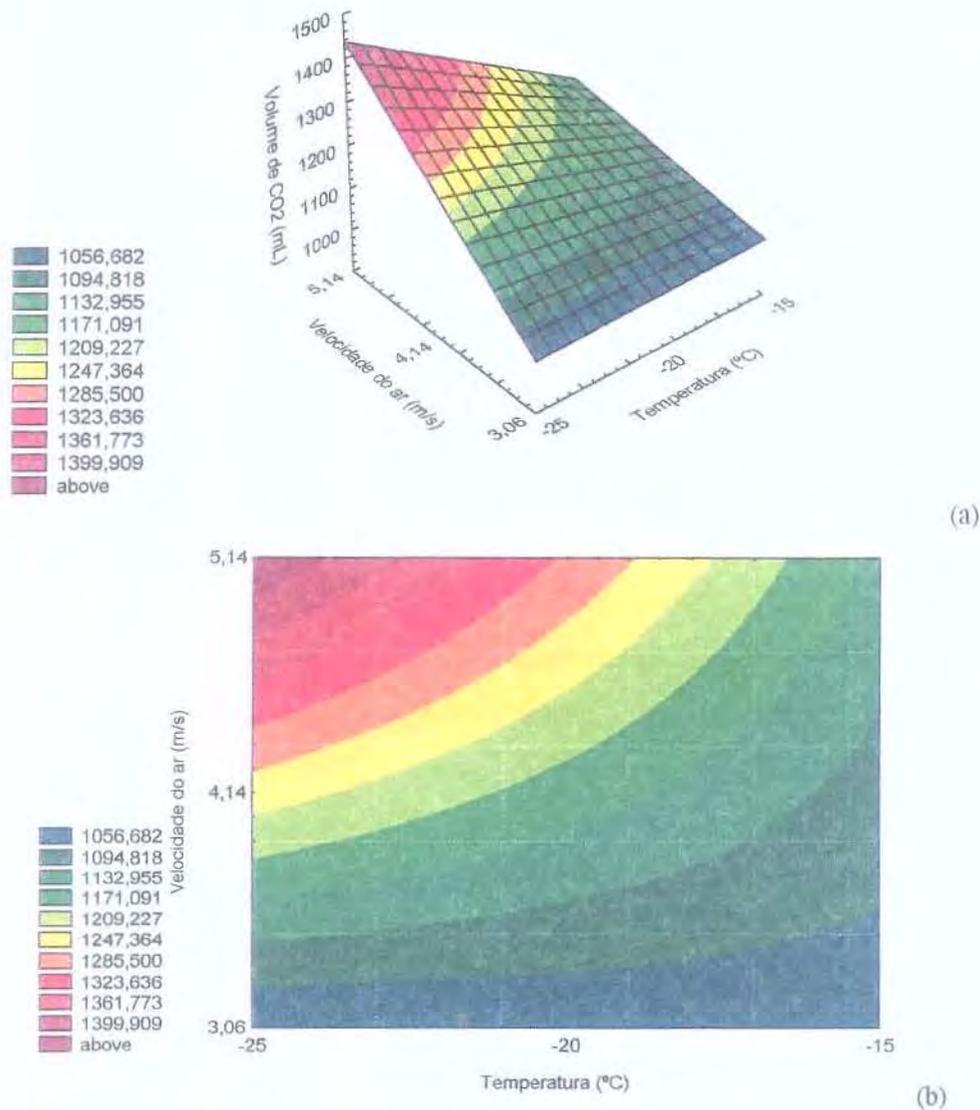


Figura 4.18. Superfície de resposta do volume de CO₂ em função da velocidade do ar e da temperatura após 60 dias de armazenamento sob congelamento (a). Curva de contorno do volume de CO₂ em função da velocidade do ar e da temperatura após 60 dias de armazenamento sob congelamento (b).

Com o aumento do tempo de armazenamento houve uma influencia maior na qualidade da massa e do pão, apresentando o tempo de 30 dias uma influencia marcante nas características de dureza, contagem de leveduras e volume de CO₂. Estes efeitos já foram estudados por Wang e Ponte (1995), que concluíram que a perda de atividade das leveduras

com o armazenamento congelado foi o principal fator que contribuiu ao prolongamento dos tempos de fermentação da massa. Também, Reed (1991) afirmou que houve deterioração da massa durante o armazenamento congelado, que os tempos de fermentação aumentaram, que o volume do pão diminuiu e que o miolo ficou grosseiro, piorando sua textura.

No tempo de 60 dias, o volume de CO₂ foi a única resposta significativamente importante, sugerindo que após 30 dias há uma “estabilização” das características da massa e do pão estudadas.

A dureza do miolo do pão foi influenciada após 1 e 30 dias de armazenamento congelado, sendo no último caso verificada uma significância maior (85%) do que após 1 dia de armazenamento congelado (75%)

O pão apresentou uma dureza maior nas condições de temperatura maior do túnel (acima de -20° C) com velocidades menores (< 4,2 m/s) e com bisnagas maiores (> 127,5 g).

A contagem de leveduras foi maior nas condições de temperatura inferior a -20° C, de velocidade do ar do túnel acima de 4,2 m/s e de peso de bisnaga de massa abaixo de 120 g.

O volume de CO₂ produzido pelas leveduras foi maior para as temperaturas inferiores a -20°C, com velocidades de ar acima de 4,2 m/s e com bisnagas com pesos inferiores a 150 g.

A perda da capacidade de retenção de gás pelo glúten já foi confirmada por vários autores (Berglund *et al.*, 1991; Varriano-Marston *et al.*, 1980; Inoue e Bushuk, 1992), que informaram que a cristalização do gelo produziu o enfraquecimento das propriedades reológicas da massa. Junto com eles também Shenouda (1980) já tinha postulado que ocorre desnaturação protéica devido à formação e crescimento de cristais de gelo e pela

desidratação devida à concentração de solutos, todos decorrentes do congelamento e das baixas temperaturas.

4.3.4. Estudo da influência do tempo de armazenamento nas características da massa e do pão de amostras congeladas nos ensaios T1 a T8 em túnel de ar forçado

Os resultados obtidos para as características avaliadas nos congelamentos T1 a T8, incluindo as amostras de massa não congelada e os índices de ganho ou perda, atribuindo o valor de 100% à massa não congelada, são apresentados na Tabela 4.32 para as características reológicas da massa, na Tabela 4.33, para as características tecnológicas do pão, e na Tabela 4.34, para a capacidade de fermentação das massas.

Tabela 4.32. Valores e índices de perda ou ganho ao longo do armazenamento das características de força e altura das massas congeladas nos ensaios lineares T1 a T8.

Ensaio	Tempo de armazenamento (dias)				Índices de ganho / perda		
	0	1	30	60	1 (%)	30 (%)	60 (%)
Força da massa							
T 1	936	1288	1517	1025	37,6	62,1	9,5
T 2	1070	1414	1224	1202	32,1	14,4	12,3
T 3	959	1264	1215	1088	31,8	26,7	13,5
T 4	1147	1139	1581	1188	-0,7	37,8	3,6
T 5	1400	1174	1479	1197	-16,1	5,6	-14,5
T 6	1118	1431	1128	1021	28,0	0,9	-8,7
T 7	960	1229	1497	1383	28,0	55,9	44,1
T 8	1162	1086	1390	1190	-6,5	19,6	2,4
Altura da massa							
T 1	79,3	80,2	78,9	78,1	1,1	-0,5	-1,5
T 2	77,0	76,0	74,6	76,8	-1,3	-3,1	-0,3
T 3	76,8	74,2	74,7	73,3	-3,4	-2,7	-4,6
T 4	78,6	79,1	78,0	77,7	0,6	-0,8	-1,1
T 5	95,9	81,2	80,1	70,1	-15,3	-16,5	-26,9
T 6	75,0	80,0	79,8	78,6	6,7	6,4	4,8
T 7	65,8	77,3	75,4	72,9	17,5	14,6	10,8
T 8	76,1	77,4	79,1	77,9	1,7	3,9	2,4

Tabela 4.33. Valores e índices de perda ou ganho ao longo do armazenamento das características de escore, volume específico e dureza do pão obtido das massas congeladas nos ensaios lineares T1 a T8.

Ensaio	Tempo de armazenamento (dias)				Índice de ganho / perda		
	0	1	30	60	1 (%)	30 (%)	60 (%)
Escore do pão							
T 1	87,0	85,5	79,5	78,5	-1,7	-8,6	-9,8
T 2	86,5	86,0	82,5	79,5	-0,6	-4,6	-8,1
T 3	95,0	88,0	87,5	86,5	-7,4	-7,9	-8,9
T 4	89,0	86,5	83,5	79,5	-2,8	-6,2	-10,7
T 5	79,5	80,5	72,5	69,0	1,3	-8,8	-13,2
T 6	80,0	85,0	76,0	71,0	6,3	-5,0	-11,3
T 7	89,0	81,5	85,5	80,0	-8,4	-3,9	-10,1
T 8	91,5	82,0	81,5	77,5	-10,4	-10,9	-15,3
Volume específico do pão							
T 1	4,35	4,10	2,90	2,90	-5,7	-33,3	-33,3
T 2	4,40	3,75	3,40	3,45	-14,8	-22,7	-21,6
T 3	6,30	4,55	4,85	4,40	-27,8	-23,0	-30,2
T 4	4,90	5,00	3,65	2,85	2,0	-25,5	-41,8
T 5	3,20	3,05	2,10	1,60	-4,7	-34,4	-50,0
T 6	3,90	3,60	2,40	2,20	-7,7	-38,5	-43,6
T 7	6,15	3,45	4,90	3,75	-43,9	-20,3	-39,0
T 8	5,80	3,85	3,20	2,65	-33,6	-44,8	-54,3
Dureza do miolo do pão							
T 1	181,60	226,80	364,05	401,70	24,9	100,5	121,2
T 2	218,40	212,85	383,90	570,70	-2,5	75,8	161,3
T 3	219,50	201,20	208,95	273,15	-8,3	-4,8	24,4
T 4	187,95	131,30	274,90	441,70	-30,1	46,3	135,0
T 5	438,55	385,45	741,40	1099,15	-12,1	69,1	150,6
T 6	298,50	355,40	615,70	546,85	19,1	106,3	83,2
T 7	138,95	246,65	270,85	276,65	77,5	94,9	99,1
T 8	105,05	261,00	328,15	577,60	148,5	212,4	449,8

Tabela 4.34. Valores e índices de perda ou ganho ao longo do armazenamento da contagem de leveduras e volume de CO₂ das massas congeladas nos ensaios lineares T1 a T8

Ensaio	Tempo de armazenamento (dias)				Índice de ganho / perda		
	0	1	30	60	1 (%)	30 (%)	60 (%)
Contagem de leveduras							
T 1	86	65	65	64	-24,4	-24,4	-25,6
T 2	105	94	87	75	-10,5	-17,1	-28,6
T 3	167	173	180	110	3,6	7,8	-34,1
T 4	123	109	120	115	-11,4	-2,4	-6,5
T 5	136	51	58	53	-62,5	-57,4	-61,0
T 6	99	105	63	58	6,1	-36,4	-41,4
T 7	150	126	103	95	-16,0	-31,3	-36,7
T 8	107	45	53	54	-57,9	-50,5	-49,5
Volume de CO₂							
T 1	1407	1376	1200	1063	-2,2	-14,7	-24,4
T 2	1431	1356	1018	998	-5,2	-28,9	-30,3
T 3	1638	1614	1472	1443	-1,5	-10,1	-11,9
T 4	1497	1309	1209	1192	-12,6	-19,2	-20,4
T 5	1306	1242	1124	958	-4,9	-13,9	-26,6
T 6	1315	1237	1185	1052	-5,9	-9,9	-20,0
T 7	1320	1284	1410	1417	-2,7	6,8	7,3
T 8	1568	1304	1287	1041	-16,8	-17,9	-33,6

Com os valores apresentados nas Tabelas 4.32, 4.33 e 4.34, elaboraram-se gráficos de índice de ganho para os valores positivos (%) e perda para os valores negativos (%), com o objetivo de visualizar o efeito do armazenamento nas características avaliadas.

4.3.4.1. Características reológicas das massas congeladas

Na Figura 4.19 mostram-se as curvas de ganho ou perda da força da massa dos congelamentos lineares T1 a T8, após congelamento, e 1, 30 e 60 dias de armazenamento sob congelamento.

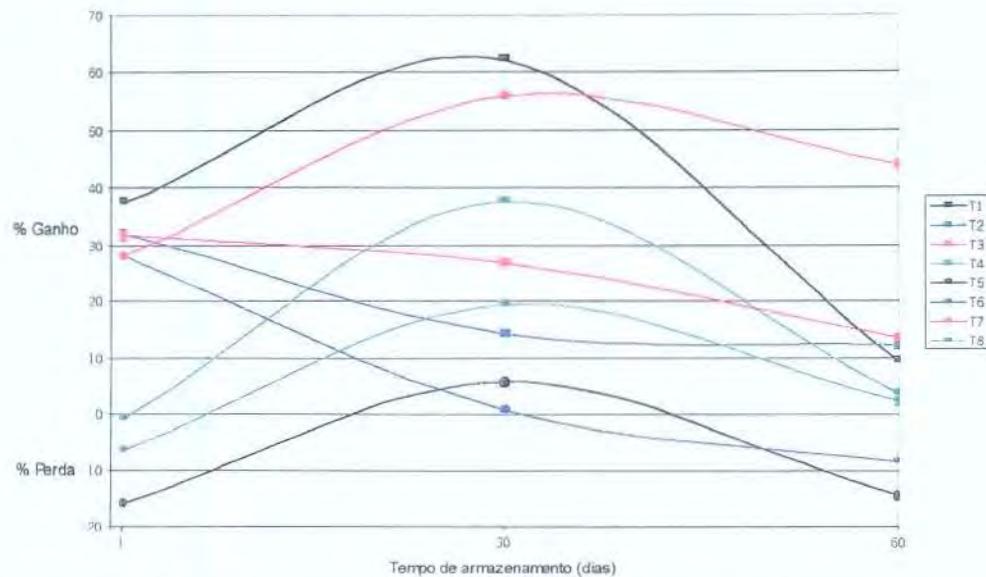


Figura 4.19. Índice de ganho ou perda da característica força da massa ao longo do armazenamento das massas congeladas em túnel de ar forçado

Observando a Figura 4.19, que mostra o comportamento da força da massa ao longo do armazenamento, verifica-se um comportamento variável desta característica, quando se leva em conta os diferentes congelamentos, e quando se avaliam os índices de ganho ou perda. Os congelamentos T1, T2, T3, T6 e T7 experimentaram aumentos da força da massa após congelamento e estocagem de 1 dia; os congelamentos T5 e T8 não entanto, experimentaram uma diminuição desta característica, e o congelamento T4 experimentou uma alteração de apenas 0,7 % de perda. Com 30 dias de armazenamento, os congelamentos T1, T7, T4, T8 e T5 experimentaram aumentos consideráveis, e o congelamento T3, uma leve diminuição do valor desta característica. No período de 30 para 60 dias de armazenamento congelado, todos os congelamentos experimentaram diminuições nos valores desta característica, indicados pela queda nas curvas de porcentagem de ganho. O comportamento menos explicável é o grande aumento experimentado pela massa com 30 dias de armazenamento, que numericamente significaria que a massa ficou mais forte, mais resistente, e que reologicamente poderia ser explicado pela alteração da estrutura das proteínas do glúten, já estudada por outros pesquisadores, dentre eles Privalov (1986). Constatou-se, por outro lado, que o congelamento T3 foi o que se apresentou mais estável ao armazenamento.

Na Figura 4.20 apresentam-se os índices de ganho ou perda da altura da massa, dos congelamentos T1 a T8, com relação ao tempo de armazenamento.

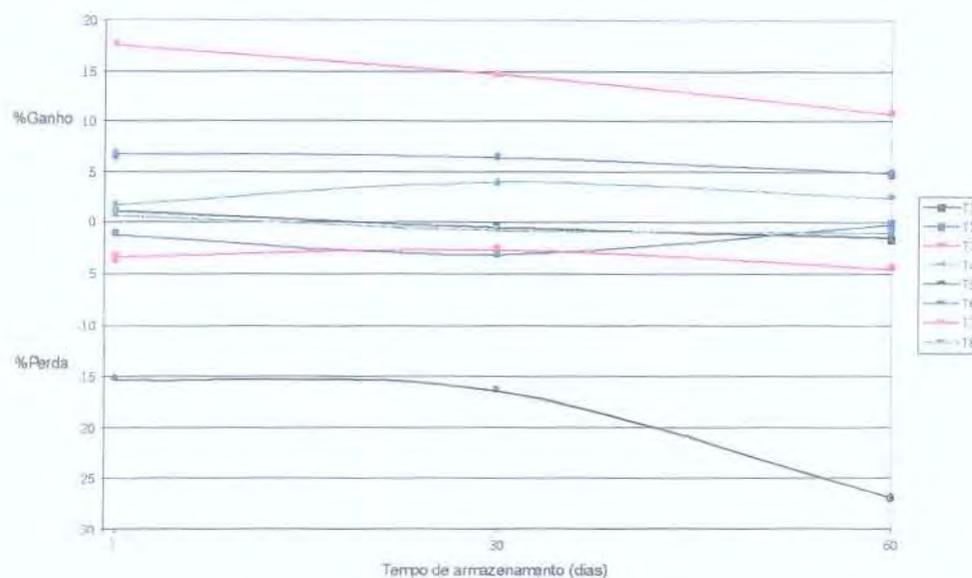


Figura 4.20. Índice de ganho ou perda da característica altura da massa ao longo do armazenamento das massas congeladas em túnel de ar forçado.

Observando a Figura 4.20, constata-se um comportamento diferente da característica altura da massa, quando comparada com a força da massa, apresentando-se a altura mais estável ao armazenamento durante o período estudado. Os congelamentos T7, T6, T8, T1 e T4 apresentaram ganho da altura da massa após congelamento e estocagem de 1 dia, e os congelamentos T2, T3 e T5 apresentaram perda na altura, no mesmo período. Com 30 dias de armazenamento houve uma pequena diminuição desta característica em todos os ensaios estudados. Após 60 dias de estocagem, observaram-se pequenos declínios e pequenos aumentos, exceto o congelamento T5, que mostrou uma perda maior no período de 30 a 60 dias. Pode-se concluir que as características reológicas das massas congeladas em diferentes condições no túnel de ar forçado, apresentaram ao longo do período de armazenamento estudado, um comportamento diferente, apresentando a força da massa uma variação maior no tempo de 30 dias, e a altura um comportamento mais estável ao armazenamento destacando-se o congelamento T5 como o que apresentou uma influência

negativa maior e os congelamentos T1 e T3, uma maior estabilidade ao armazenamento no período em estudo.

4.3.4.2. Características tecnológicas do pão obtido das massas congeladas

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.33, elaboraram-se as Figuras 4.21 **a**, **b** e **c**, que mostram o comportamento do escore, do volume específico e da dureza do pão, respectivamente, com relação ao tempo de armazenamento sob congelamento, dos pães elaborados com as massas congeladas nos congelamentos lineares T1 a T8.

Observando a Figura 4.21 **a**, que mostra o comportamento do escore das notas tecnológicas atribuídas aos pães, constata-se que houve pequenos ganhos e perdas após congelamento e 1 dia de armazenamento. Os congelamentos T5 e T6 apresentaram ganhos no escore do pão após 1 dia de armazenamento, no entanto, os congelamentos T2, T1 e T4, perdas menores de 5 %, e os congelamentos T3, T7 e T8, uma faixa de 7 a 8 % de perda. Após 30 dias de armazenamento, todos os congelamentos mostraram queda das notas apresentando os congelamentos T6, T5 e T1, uma queda maior que os congelamentos T2, T4 e T8. O congelamento T3 manteve-se estável ao longo do armazenamento. De 30 para 60 dias, os índices de perda aumentaram em todos os casos.

Observando a Figura 4.21 **b**, que mostra os índices de ganho ou perda do volume específico do pão ao longo do armazenamento, constata-se que, a exceção do congelamento T4, todos os congelamentos apresentaram perda desta característica após congelamento e 1 dia de armazenamento. Com 30 dias de armazenamento, todos os pães obtidos das massas congeladas em túnel, exceto T3, apresentaram uma perda do volume específico do pão, que continuou aumentando com o armazenamento posterior até 60 dias. Os congelamentos T2 e T3 mostraram-se mais estáveis que os outros congelamentos estudados.

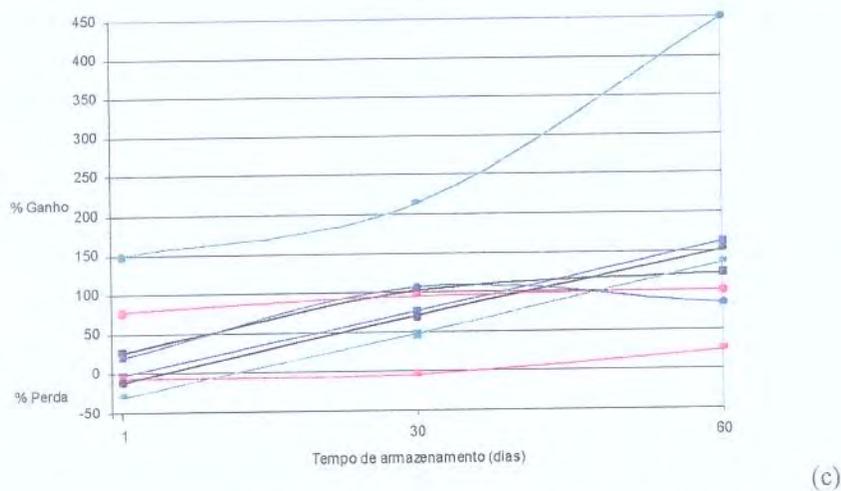
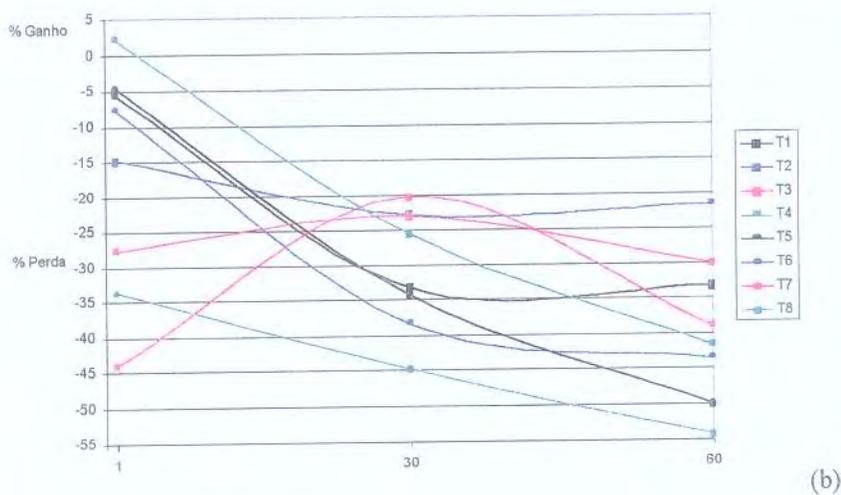
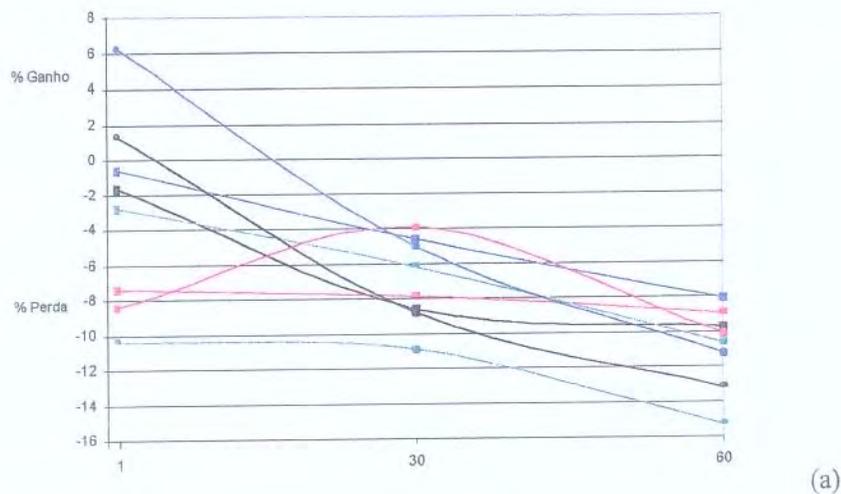


Figura 4.21. Índices de ganho ou perda das características tecnológicas do pão obtido da massa congelada em túnel e armazenada 1, 30 e 60 dias. (a) Escore do pão, (b) Volume específico do pão, (c) Dureza do miolo do pão.

Com relação à característica dureza do miolo do pão, mostrada na Figura 4.21 **c**, constata-se ganhos em todos os casos, em todos os tempos de armazenamento. Após congelamento e armazenamento de 1 dia, os congelamentos T4, T3, T5 e T2 mostraram uma pequena diminuição da dureza do miolo e os congelamentos T7 e T8 apresentaram um grande aumento desta característica. Após 30 dias de armazenamento, todos os pães apresentaram um aumento da dureza do miolo, exceto o T3, que se apresentou mais estável. O congelamento T8 mostrou um comportamento diferenciado, separando-se dos outros congelamentos, mostrando uma perda de qualidade muito maior que o resto dos ensaios, pelo grande porcentagem do ganho experimental, principalmente nos últimos 30 dias de armazenamento.

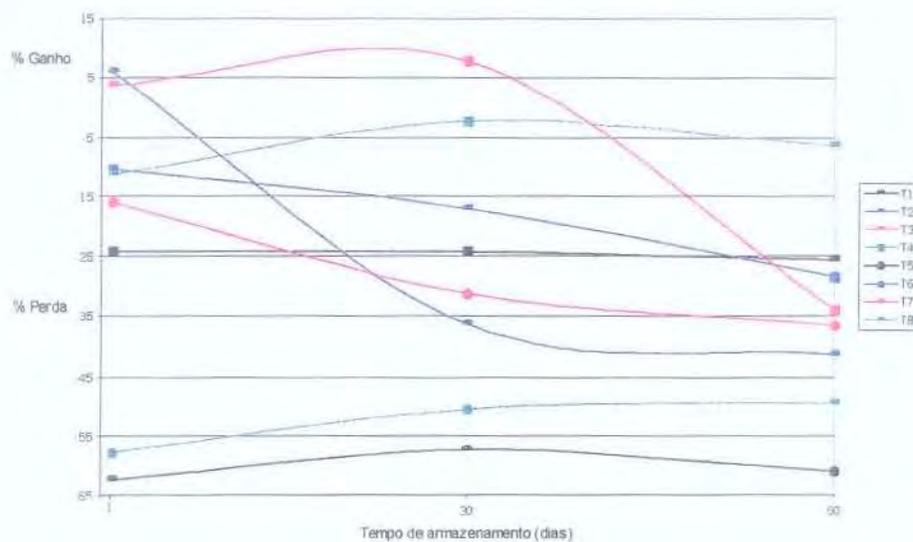
Avaliando as 3 características da qualidade do pão em conjunto, e desconsiderando o congelamento T7, que apresentou um comportamento anormal, pode-se dizer que os pães elaborados com as massas congeladas nas diferentes condições de temperatura, peso de bisnaga e ventilação, perderam qualidade tecnológica, destacando-se o congelamento T3 pela maior estabilidade ao congelamento, e o congelamento T8, por apresentar uma influência negativa nestas características de qualidade do pão.

4.3.4.3. Características de fermentação da massas congeladas

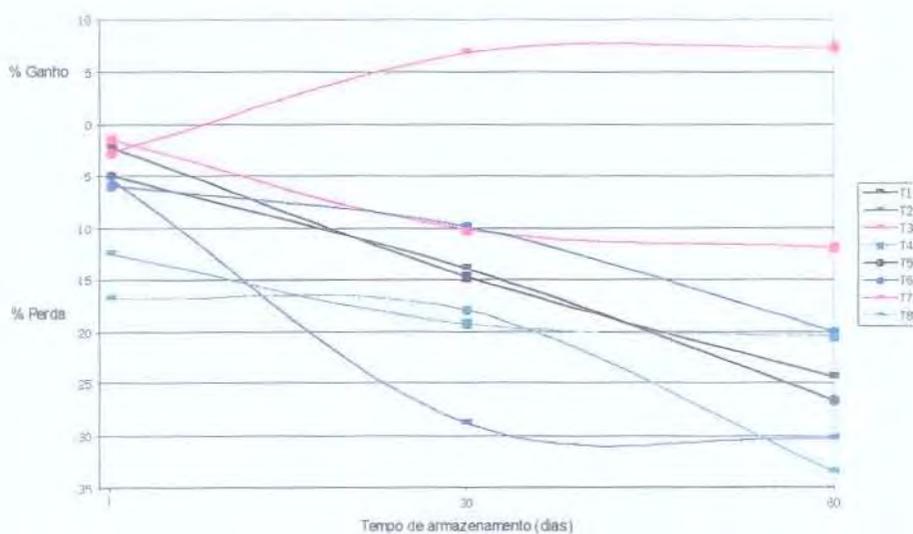
Baseando-se nos dados apresentados na Tabela 4.34, elaboraram-se as Figuras 4.22 **a** e **b**, que mostram os índices de ganho ou perda da contagem de leveduras e do volume de CO₂ produzido por estes microrganismos, após congelamento e armazenamento de 1, 30 e 60 dias das massas congeladas nos ensaios lineares T1 a T8.

Observando a Figura 4.22 **a** que mostra o comportamento da contagem de leveduras viáveis presentes nas massas após congelamento, e durante 1, 30 e 60 dias de armazenamento, constata-se que houve uma diminuição da contagem de microrganismos na maioria dos ensaios, exceto os congelamentos T6 e T3, que apresentaram um pequeno aumento. Os congelados T2, T7 e T1 apresentaram perdas em torno de 10 a 25 %, sendo que as massas produzidas pelos congelamentos T8 e T5 apresentaram uma redução drástica

das contagens após congelamento e 1 dia de armazenamento. Os mesmos congelamentos apresentam uma estabilização das contagens com 30 e 60 dias, contrariamente aos congelamentos T6, T7 e T2, que apresentaram uma queda neste período, sendo que os congelamentos T3 e T1 apresentaram-se mais estáveis. No período de 30 a 60 dias, todos os congelamentos apresentaram-se estáveis, exceto o T3.



(a)



(b)

Figura 4.22. Índices de ganho ou perda das características de fermentação das massas congeladas e armazenadas 1, 30 e 60 dias. (a) Contagem de leveduras, (b) Produção de CO₂.

Observando a Figura 4.22 b, que mostra o volume de CO₂ produzido pelas leveduras no período de 1, 30 e 60 dias constata-se que houve perda da capacidade de

produção de CO₂ em todos os ensaios, exceto o congelamento T7. As perdas após congelamento e 1 dia de armazenamento ficaram na faixa de 1 a 17 %. Uma perda maior observa-se no tempo de 30 dias para os congelamentos T3, T6, T5, T1, T4 e T8, destacando-se o congelamento T2 pela porcentagem de perda acentuada experimentada neste período. Com o avanço do armazenamento observa-se uma queda progressiva nos últimos 30 dias, apresentando os congelamentos T3 e T7 um comportamento mais estável desta característica no tempo de armazenamento estudado.

Observando em conjunto as duas características que mostram a capacidade de fermentação das massas, percebe-se uma perda da viabilidade celular, que em alguns casos acompanha uma diminuição da produção de CO₂ pelas leveduras, como no caso dos congelamentos T5 e T8, sendo esta relação não tão clara em outros ensaios, como os congelamentos T7 e T3. O comportamento das leveduras ao armazenamento e sua capacidade de produção de gás já foi pesquisada por outros autores (Brown, 1991; Ray, 1986), sugerindo pelos resultados mostrados neste trabalho como sendo uma área ainda a ser pesquisada.

A perda da qualidade das massas durante o armazenamento sob congelamento já foi estudada e confirmada por outros autores (Neyreneuff e Nitsche, 1989; Reed, 1991; Le Bail *et al.*, 1999), que demonstraram perda da capacidade de produção e de retenção de CO₂ pelas massas, o que se traduziu em tempos longos de fermentação final e perda da qualidade tecnológica do pão pela diminuição do volume e textura grosseira do miolo durante o armazenamento prolongado.

4.4.- CONCLUSÕES

Dos efeitos principais:

O estudo dos efeitos mostrou que as variáveis resposta da massa e do pão foram menos prejudicadas quando se trabalhou com temperaturas do ar de -25° C com velocidades de ar de 5,14 m/s e com bisnagas de massa de 80 g.

Do estudo dos modelos:

O modelo linear ajustou-se melhor às condições de trabalho deste estudo, mostrando um maior número de variáveis resposta, uma influencia significativa na qualidade da massa e do pão.

As variáveis dureza do miolo de pão, contagem de leveduras viáveis e volume de CO₂ produzido pelas leveduras permitiram a obtenção de modelos preditivos de primeira ordem que mostraram a relação matemática das variáveis temperatura do ar, velocidade do ar e peso da bisnaga com as respostas estudadas da qualidade da massa e do pão.

O pão apresentou uma dureza maior nas condições de temperatura maior do túnel (acima de -20° C) com velocidades menores (< 4,2 m/s) e com bisnagas maiores (> 127,5 g)

A contagem de leveduras foi maior nas condições de temperatura inferior a -20° C, de velocidade do ar do túnel acima de 4,2 m/s e de peso de bisnaga de massa abaixo de 120 g.

O volume de CO₂ produzido pelas leveduras foi maior para as temperaturas inferiores a -20° C, com velocidades de ar acima de 4,2 m/s e com bisnagas com pesos inferiores a 150 g.

Resumindo, o estudo dos modelos mostrou que as variáveis resposta da qualidade da massa e do pão foram menos prejudicadas quando se trabalhou com temperaturas na faixa de -20 a -25° C, com velocidades do ar superiores a 4,2 m/s e com bisnagas menores que 120 g.

Analisando em conjunto as conclusões do estudo dos efeitos principais e dos modelos verificou-se que as melhores condições para a estabilidade da massa e do pão foram:

- Temperatura do ar do túnel na faixa de -20 a -25° C
- Velocidade do ar na faixa de 4,2 a 5,14 m/s
- Peso da bisnaga de massa de 80 a 120 g

Os resultados do trabalho com túnel de ar forçado permitem concluir que para manter a qualidade da massa e do pão é aconselhável, nas condições aplicadas neste estudo, trabalhar com temperaturas inferiores, velocidades de ar superiores e peso de bisnaga inferiores.

Do estudo do tempo de armazenamento:

Todas as características da qualidade da massa e do pão foram prejudicadas pelo armazenamento sob congelamento. Das características reológicas medidas, a altura apresentou um comportamento mais uniforme do que a força da massa obtida das medidas de extensibilidade. Das características tecnológicas do pão, a dureza foi a que apresentou as maiores mudanças no decorrer do armazenamento congelado. Das características da fermentação da massa, houve variabilidade da relação da contagem de leveduras com a produção de CO₂.

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- BÁGUENA, R.; SORIANO, M. D.; MARTINEZ-ANAYA, M. A.; BENEDITO DE BARBER, C. Viability and performance of pure yeast strains in frozen doughs. **Journal of Food Science**, **56**: p.1690-1698. 1991.
- BERGLUND, P. T.; SHELTON, D. R.; FREEMAN, T.P. Frozen bread dough ultrastructure as affected by duration of frozen storage and freeze-thaw cycles. **Cereal Chemistry**, **68**: 105-107, 1991. BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis and model building**. Cap. 15. Wiley and Sons, New York. 1978.

- BERLAND, S. **Étude rheologique et calorimétrique de l'influence de traitements de congélation-décongélation sur les propriétés de pâtes de farine de blé. Répercussion en technologie boulangère**, Thèse de Doctorat Université Paris 11, France: ENSIA-Massy. 1993.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis and model building**. Cap. 15. Wiley and Sons, New York. 1978.
- BROWN, M. H. Microbial aspects of frozen foods. Cap. 2. In: **Food freezing: Today and tomorrow**. Editado por Bald, W. B. Springer Verlag. 1991.
- BRÜMMER, J. M. Bread and rolls from frozen doughs in Europe. In: **Frozen and refrigerated doughs and batters**. Ed. Kulp, K.; Lorenz, K.; Brümmer, J. AACC Inc. 1995.
- CASEY, G. P. e FOY, J. J. Yeast performance in frozen dough and strategies for improvement. In: **Frozen doughs and batters**. Editado por Kulp, K., Lorenz, K. e Brümmer, J. AACC, Saint Paul. p. 19-52. 1995.
- CAUVAIN, S. P. **Frozen bread dough**. FMBRA Report No. 84. CCFRA, Chipping Campden, 1979.
- CAUVAIN, S. P. Dough retarding and freezing. Cap. 6. In: **Technology of breadmaking**. Editado por Cauvain, S. P. e Young, L. S. Aspen Publication, 1999.
- D'AMORE, T.; CRUMPLEIN, R.; STENVART, G. G. The involvement of trehalose in yeast stress tolerance. **Journal of Industrial Microbiology**, 7: p.191-196, 1991.
- EL-HADY, E. A.; EL-SAMAHY, S. K.; SEIBEL, W.; BRÜMMER, J. M. Changes in gas production and retention in non prefermented frozen wheat doughs. **Cereal Chemistry**, 73 (4): 472-477, 1996.
- GEHRKE, H. H.; PRALLE, K.; DECKWER, W. D. Freeze drying of microorganisms - Influence of cooling rate on survival. **Food Biotechnology**, 6 (1): 35-49, 1992.

- HAVET, M., Le BAIL, A. Frozen bread dough: Impact of the freezing rate and the storage duration on gassing power. Workshop on process engineering of cereals. France: Montpellier, October 8. 1999.
- HAVET, M.; MANKAI, M.; Le BAIL, A. Influence of the freezing condition on the baking performance of french frozen doughs. **Journal of Food Engineering**, 45: 139-145. 2000.
- HINO, A.; TAKANO, H.; TANAKA, Y. New freeze-tolerant yeast for frozen dough preparations. **Cereal Chemistry**, 64: p.269-275, 1987.
- INOUE, Y.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. I. Effects of frozen storage and freeze-thaw cycles on baking and rheological properties. **Cereal Chemistry**, 68: p.627-631, 1991.
- INOUE, Y.; BUSHUK, W. Studies on frozen doughs. II. Flour quality requirements for bread production from frozen dough. **Cereal Chemistry**, 69: 423-428. 1992.
- KENNY, S.; GRAU, H.; ARENDT, E. K. Use of response surface methodology to investigate the effects of processing conditions on frozen dough quality and stability. **European Food Research Technology**, 213: 323-328. 2001.
- KULP, K. Biochemical and biophysical principles of freezing In: **Frozen doughs and batters**. Editado por Kulp, K., Lorenz, K. e Brümmer, J. AACC, Saint Paul. p. 19-52. 1995.
- LAAKSONEN, T. J. e ROOS, Y. H. Thermal, dynamic, mechanical and dielectric analysis of phase and state transitions of frozen wheat doughs. **Journal of Cereal Science**, 32: 281-292. 2000.
- Le BAIL, A.; GRINAND, C.; Le CLEACH, S.; MARTINEZ, S; QUILIN, E. Influence of storage conditions on frozen french bread dough. **Journal of Food Engineering**, 39: 289-291. 1999.

- Le BAIL, A.; HAVET, M.; PASCO, M. Influence of the freezing rate and of storage duration on the gassing power of frozen bread dough. **Proceedings of the Symposium of the International Institute of Refrigeration**. Nantes, France, September 16-18. 1998.
- MAZUR, P. Cryobiology. The freezing of biological systems. **Science**, **168**: 939-949. 1970.
- MURAKAMI, Y.; HAHN, Y. S.; YOKOIGAWA, K.; ENDO, K.; KAWAI, H. Induction of freeze-sensitive mutants from a freeze-tolerant yeast *Torulaspora delbrueckii*. **Bioscience, Biotechnology & Biochemistry**, **58** (1): 206-207, 1994.
- NEMETH, L. J.; PAULLEY, F. G.; PRESTON, K. R. Effects of ingredients and processing conditions on the frozen dough bread quality of a Canada Western Red Spring Wheat flour during prolonged storage. **Food Research International**, **29**(7): p. 609-616, 1996.
- NEYRENEUF, O.; DELPUECH, B. Freezing experiments on yeasted dough slabs. Effects of cryogenic temperatures on the baking performance. **Cereal Chemistry**, **70** (1): 109-111, 1993.
- NEYRENEUF, O.; NITSCHKE, G. Tiefgefrieren von Hefeteigen und teiglingen Anforderungen an Rohstoffe und Verfahren. **Getreide, Mehl und Brot**, **43**: 298-303. 1989.
- NEYRENEUF, O. e Van der PLAAT, J. B. Preparation of frozen french bread dough with improved stability. **Cereal Chemistry**, **68**: 60-66. 1991.
- PRIVALOV, P. L.; GRIK, Y. U.; VENYAMINOV, Y. S.; KUTYSHENKO, V. P. Cold denaturation of myoglobine. **Journal of Molecular Biology**, **190**: 487-497. 1986.
- REED, G. Use of yeast in baking. Cap. 7. In: **Yeast Technology**. AVI Book. 1991.
- REID, D. S. Optimizing the quality of frozen foods. **Food Technology**, **44** (7): 78-82. 1990.

- RESENDE, J. B. **Avaliação do processo dinâmico de transferência de calor para o congelamento de polpas de frutas**. Tese do doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- SALSTRÖM, S.; NIELSEN, A. O.; FAERGESTAD, E. M.; LEA, P.; PARK, W. J.; ELLEKJAER, M. R. Effect of dough processing conditions and DATEM on Norwegian Hearth bread prepared from frozen dough. **Cereal Chemistry**, **76** (1): 38-44. 1999.
- SHENOUDA, S. Y. K. Theories of protein denaturation during frozen storage of fish flesh. **Advances in Food Research**, **26**: 275-311. 1980.
- SPOONER, T. F. Hot prospects from frozen doughs. **Baking snack systems**, **12** (11): 18-22. 1990.
- VARRIANO-MARSTON, E. HSU, K. H.; MHADI, J. Rheological and structural changes in frozen dough. **Baker's Digest**, **54**: 32-34, 41, 1980.
- WANG, Z. J.; PONTE, J. G. Jr. Storage stability of gluten-fortified frozen dough. **Cereal Foods World**, **40** (11): 827-831, 1995.

CAPITULO V.- VELOCIDADE E TEMPO DE CONGELAMENTO DOS PROCESSOS CRIOGÊNICO E EM TÚNEL DE AR FORÇADO

RESUMO

A partir das curvas temperatura versus tempo, obtidas nos ensaios experimentais realizados nos congeladores criogênico e em túnel, calcularam-se as velocidades parciais e globais, assim como os tempos reais de congelamento. Foi definida a velocidade parcial de congelamento como aquela medida desde o momento que a massa atingiu 0° C até o fim do congelamento, fixado em -12° C, e velocidade global de congelamento, aquela medida no intervalo de 15° C até -12° C. Outro índice avaliado foi o tempo de congelamento real, obtido a partir das curvas experimentais, e o tempo de congelamento teórico, calculado pela fórmula simplificada de Pham (1986). A determinação das velocidades de congelamento permitiu classificar os processos em: rápidos, comerciais e lentos. Relacionando a velocidade e os tempos de congelamento com a qualidade de panificação das massas congeladas, concluiu-se que valores de velocidade na faixa de 0,84 °C/min até 1,27 °C/min, para os congelamentos criogênicos, e na faixa de 0,59 °C/min até 1,04 °C/min, para os congelamentos em túnel apresentaram-se adequados para a tecnologia de massas cruas congeladas para panificação.

ABSTRACT

From the curves temperature versus time, obtained through experimental assays in the cryogenic and tunnel freezers, the partial and global rates had been calculated, as well as the real freezing times. The partial freezing rate was defined as that measured since the moment that the dough reached 0° C until the end of the freezing operation, fixed at -12° C, and global freezing rate, that measured in the temperature range of 15 to -12° C. Another evaluated index was the real freezing time, obtained from the experimental freezing curves, and the theoretical freezing time, calculated from the simplified equation of Pham (1986). The determination of the freezing rates allowed to classify the freezing process in: fast, commercial and slow. Analyzing together the freezing rate and times of the cryogenic and tunnel systems with the baking quality of the frozen doughs, it was concluded that freezing global rates in the range of 0,84 to 1,27 °C/min, for the cryogenic freezing, and freezing global rates in the range of 0,59 °C/min until 1,04 °C/min, for the tunnel freezing were found as adequate for the frozen bread dough technology.

5.1. INTRODUÇÃO

Há vários parâmetros importantes, com relação à qualidade final dos alimentos congelados: o frescor do alimento, a velocidade de congelamento, o nível de temperatura, a estabilidade da temperatura durante o armazenamento e as condições de descongelamento.

Dois problemas principais acontecem no caso do congelamento de massas para pão que contém fermento: a viabilidade das leveduras (Méric *et al.*; 1997; Neyreneuf e Delpuech, 1993) e a reologia da massa (Berland, 1993), ambas afetadas pela velocidade de congelamento.

Le Bail *et al.* (1996) demonstraram que a perda do poder gaseificante pelas leveduras relacionou-se com a velocidade de congelamento, sendo que uma velocidade alta de congelamento resultou em uma sensibilidade maior das leveduras ao armazenamento, comparada com uma velocidade de congelamento baixa.

Por outro lado, Havet *et al.* (2000) demonstraram que o aparecimento da porosidade aberta da massa medida no reofermentômetro foi afetada pela velocidade de congelamento. Eles sugeriram que a cristalização do gelo pareceu ser a origem do enfraquecimento da massa e que altas velocidades de congelamento produziram uma rede de glúten mais danificada. Verificaram também, nesse trabalho, o efeito sinérgico da velocidade de congelamento na viabilidade das leveduras e na reologia da massa e, portanto, no volume do pão.

No preparo de massas para congelamento, diferentemente do congelamento de outros produtos como vegetais, não é necessária uma etapa de desativação enzimática ou de branqueamento. As enzimas que podem afetar adversamente as massas, como as proteases e amilases, podem ser evitadas selecionando farinhas que apresentem baixas atividades dessas enzimas ou omitindo os melhoradores de enzimas nas formulações. Na produção de massas congeladas, a preocupação principal é a manutenção da atividade fermentativa total e da integridade fisiológica das leveduras. Este objetivo pode ser alcançado através de

métodos de preparação de obtenção da massa e condições de congelamento e descongelamento adequados (Kulp, 1995).

No congelamento de massas é essencial manter a integridade das paredes das células de levedura, com a finalidade de preservar o mecanismo de transferência osmótica. Quando esta condição é preservada, consegue-se o intercâmbio da água entre as células de levedura e a massa durante o congelamento, onde ocorre a desidratação, devida à formação de gelo e o descongelamento, onde ocorre a reidratação, podendo manter-se assim velocidades normais de fermentação durante o *proofing* da massa. A outra parte da massa que não contém tecidos vivos precisa também ser mantida sem alteração, ou seja, a matriz do glúten que é um componente altamente funcional da massa, deve manter suas propriedades reológicas e físico-químicas, o que significa a reidratação durante o descongelamento, como também uma danificação mínima, devida à reações químicas e danificação física devida à formação de gelo durante a estocagem sob congelamento.

Reid (1983) notou que, se os alimentos podiam ser mantidos a temperaturas muito baixas, numa condição de super resfriamento sem formação de gelo, a sua qualidade poderia ser preservada. No entanto, com a formação de gelo, as propriedades físicas da massa são afetadas complicando o processo de congelamento. Ainda que a água seja um dos principais componentes da massa, ela não necessariamente congela no seu ponto normal de congelamento, pois os solutos diminuem o ponto de congelamento. Nestes sistemas não ocorre uma fase aguda de transição de água para gelo, pois a formação de gelo na fase água produz gradualmente altas concentrações de materiais solúveis. O efeito deste processo de concentração é uma depressão gradual do ponto de congelamento. Uma complicação adicional do congelamento de massas é o estado da água no sistema; além da água livre, uma porção significativa da água está ligada associada a proteínas, carboidratos e pentosanas (Bushuk, 1966).

O congelamento é a cristalização da água líquida na forma sólida denominada gelo. Esta mudança de fase acontece quando a temperatura da água se reduz abaixo de 0° C, ou nos alimentos, quando a temperatura cai abaixo da temperatura de congelamento da fase

líquida. Neste ponto, pode ocorrer super resfriamento sem a formação do gelo. A incerteza na iniciação da formação de gelo é devida ao problema da nucleação. De acordo com alguns pesquisadores (Langham e Mason, 1958; Bigg, 1963), o congelamento sem o efeito da nucleação pode ocorrer até uma temperatura em torno de -40°C . Nesta temperatura, núcleos espontaneamente formados são gerados para produzir gelo. Este tipo de nucleação é chamada de homogênea. Na fase líquida dos alimentos, várias partículas iniciam a nucleação a temperaturas muito superiores a -40°C . Esta transição é chamada de nucleação heterogênea. Uma vez que a nucleação acontece, os cristais de gelo podem crescer. Como a nucleação precisa vários graus de super resfriamento, o crescimento dos cristais de gelo pode acontecer com um super resfriamento mínimo. A velocidade de cristalização depende da velocidade de remoção do calor. A morfologia dos cristais é controlada pela velocidade de remoção de gelo, assim como pela direção do fluxo de calor durante sua remoção (Kulp, 1995).

A formação do cristal é afetada também pelo super resfriamento do meio (Reid, 1983). A propagação do gelo, um processo complexo na água pura é ainda mais complicado na presença de vários solutos na fase líquida. O etanol, o glicerol, a glicose e a sucrose afetam a velocidade de formação de gelo (Thomas, 1979, citado por Reid, 1983). Outro grupo de compostos que inibem a formação de gelo, chamados de agentes anticongelantes, aparecem em produtos naturais como proteínas e glicoproteínas (Feeney, 1982). A interação da nucleação e dos cristais de gelo afetam a forma e o tamanho dos cristais de gelo formados na massa. Esta relação é possivelmente a causa básica do efeito das velocidades de congelamento nas características do gelo. Quando o produto é congelado numa velocidade lenta, a nucleação é também lenta e causa, ao menos, inicialmente a formação de grandes cristais de gelo. O oposto é verdade quando o congelamento se realiza a altas velocidades, que favorecem a nucleação rápida e conseqüentemente, a formação de pequenos cristais de gelo.

A definição de velocidade de congelamento ($^{\circ}\text{C}/\text{hora}$) para um produto é a diferença entre a temperatura inicial e temperatura final, dividida pelo tempo de congelamento definida pelo Instituto Internacional de Refrigeração (Anon, 1972). Como a temperatura em

diferentes locais de um produto pode variar durante o congelamento, a velocidade de congelamento local para uma posição determinada define-se como a diferença entre a temperatura inicial e a temperatura no local dividida pelo tempo transcorrido até o momento no qual a última temperatura foi atingida nesse local (Singh e Heldman, 1993).

Segundo Brown (1991), os processos de congelamento são classificados de acordo com a velocidade de congelamento em:

1. Congelamento lento, de 0,0167 a 0,167 °C/min
2. Congelamento comercial, de 0,167 a 0,83 °C/min
3. Congelamento rápido, velocidades maiores de 0,83 °C/min

Sahlström *et al.* (1999), trabalhando com congelamento de massas em túnel, obtiveram velocidades de congelamento de 1 °C/min, no entanto, Le Bail *et al.* (1999) estimaram velocidades de 0,19 °C/min em congelamentos de massa em túnel medidas na faixa de temperatura de 0 a -18° C.

Poder prever e controlar o tempo de congelamento tem grande importância devido a influência na qualidade do produto e também para destes parâmetros determinar-se a capacidade de produção de um determinado equipamento e a economia do processo. Os cálculos da transferência de calor em situações em que existem mudanças de fase não são fáceis. Contudo, quando se deseja estimar o tempo de congelamento a partir de dados físicos ao invés de fazê-lo experimentalmente, existem duas possibilidades. No primeiro caso, pode-se usar um modelo matemático global e simplificado do qual se deriva uma equação que pode ser empregada para calcular o tempo de congelamento e numa grande diversidade de situações com bastante aproximação. Outro enfoque poderia adotar um modelo mais real e, em consequência, mais complicado e resolver equações diferenciais para o fluxo de calor mediante métodos numéricos, em vez de utilizar métodos analíticos. Neste caso, os dados terão uma aplicação específica e não geral. As fórmulas para estimar os tempos de congelamento baseiam-se geralmente em considerar que o corpo a congelar encontra-se inicialmente a uma temperatura uniforme e resfria-se a temperatura constante,

com um coeficiente de transmissão de calor constante entre a superfície do corpo e o meio refrigerante. Outra hipótese considerada é que as propriedades termofísicas condutividade térmica, calor específico e densidade aparente não variam com a temperatura durante o processo de congelamento, e que existe um ponto definido durante o congelamento no qual se libera o calor latente de fusão. Esta última suposição permite dividir o congelamento em três etapas: pré resfriamento do material sem congelar, congelamento propriamente dito e resfriamento do produto congelado até seu estado final ou têmpera, como é mostrado na Figura 5.1. O tempo de congelamento, baseado nestas suposições, denomina-se “tempo de congelamento calculado” (Brennan *et al.*, 1980).

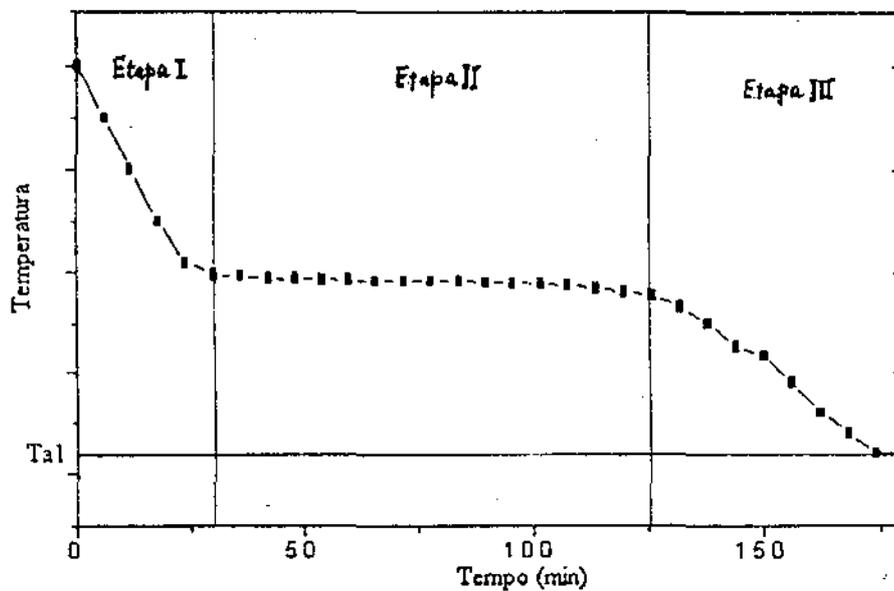


Figura 5.1. Curva temperatura/tempo, característica do congelamento de produtos alimentícios.

Os tempos de congelamento são critérios de desenho básicos para os sistemas de congelamento e representam os tempos de residência que um alimento deve ser exposto às condições de processo para conseguir o nível desejado de congelamento. A definição do tempo de congelamento mais amplamente aceita é: o tempo necessário para reduzir a

temperatura inicial do produto até uma temperatura final no local de resfriamento mais lento. Pham (1986) declarou que para ser útil em aplicações de engenharia, um método de cálculo não deve ser só exato mas também, de fácil aplicação. Portanto, deve requerer poucos dados de entrada, evitando demora em operações complexas ou referências a gráficos e tabelas. O método publicado por este pesquisador mostrou-se em maior concordância com resultados experimentais, do que o uso de métodos complexos.

Devido ao fato das propriedades térmicas dos alimentos dependerem da composição química e da temperatura, e de existirem muitos alimentos diferentes, é quase impossível determinar experimentalmente e tabular as propriedades termofísicas dos alimentos em todas as possíveis condições e composições (ASHRAE, 1998).

Com a finalidade de comparar os congelamentos criogênico e de convecção forçada em túnel, neste estudo, foram determinadas as velocidades de congelamento globais e parciais segundo o IIR (Anon, 1972), e os tempos de congelamento teóricos pelo método simplificado de Pham (1986). Ainda foram calculados os períodos do patamar de congelamento e os tempos de congelamento total, extraídos das curvas de temperatura versus tempo, obtidas nos testes experimentais do estudo do congelamento criogênico do capítulo III e do estudo do congelamento em túnel de ar forçado do capítulo IV.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1. Material

Para os cálculos dos índices de velocidade e tempo de congelamento, utilizaram-se os dados das curvas temperatura versus tempo experimentais, obtidas nos congelamentos criogênicos e em túnel, mostradas nos anexos 2 e 3, respectivamente.

5.2.1.1. Condições de ventilação, temperatura e tamanho de bisnaga.

Na Tabela 5.1, apresentam-se as condições de ventilação, temperatura do ar e dimensões de bisnaga dos ensaios lineares realizados na câmara criogênica e em túnel de ar forçado.

Tabela 5.1. Condições de ventilação, temperatura do ar e dimensões de bisnaga dos congelamentos criogênico e em túnel

Congelamento	Ventilação (m/s)	Temperatura do ar (°C)	Peso de bisnaga (g)	Diâmetro de bisnaga (mm)	Comprimento de bisnaga (mm)
C1	Com	-30	175	39	110
C2	Sem	-30	175	39	110
C3	Com	-50	175	39	110
C4	Sem	-50	175	39	110
C5	Com	-30	80	30	97,5
C6	Sem	-30	80	30	97,5
C7	Com	-50	80	30	97,5
C8	Sem	-50	80	30	97,5
T1	3,06	-25	80	30	97,5
T2	3,06	-15	80	30	97,5
T3	5,14	-25	80	30	97,5
T4	5,14	-15	80	30	97,5
T5	3,06	-25	175	39	110
T6	3,06	-15	175	39	110
T7	5,14	-25	175	39	110
T8	5,14	-15	175	39	110

5.2.2. Métodos

5.2.2.1. Determinação das três etapas de cada curva

Baseado nas Figuras dos anexos 2 e 3, que mostram as curvas temperatura versus tempo, procedeu-se à determinação das 3 etapas em cada curva, como se mostra nas Figuras 5.2 e 5.3, para os congelamentos criogênicos, e nas Figuras 5.4 e 5.5, para os congelamentos em túnel. Este procedimento foi adotado para facilitar a divisão das curvas em 3 etapas: pré-resfriamento, mudança de fase, e resfriamento final, registrando em cada caso, a temperatura inicial de congelamento, a temperatura no início e no fim do patamar de congelamento e a temperatura final de congelamento, expressas em graus Celsius e seus respectivos tempos, em minutos, registrados nas Tabelas 5.2 e 5.3.

5.2.2.2. Determinação do período do patamar de congelamento

Para determinar a duração do patamar da mudança de fase, calcularam-se os períodos de congelamento como a diferença entre o tempo final e o tempo inicial do patamar, obtidos das curvas experimentais, mostradas nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, e cujos valores foram registrados na Tabela 5.3.

5.2.2.3. Determinação das velocidades parciais e globais

Determinaram-se as velocidades parciais denominadas V_{p1} , e globais, denominadas V_{p2} que correspondem, respectivamente, à velocidade no intervalo de temperatura de 0 a -12°C e à velocidade no intervalo de temperatura de 15 a -12°C .

Para o cálculo das duas velocidades, utilizou-se a fórmula:

$$\text{Velocidade de congelamento} = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} \quad (5.1)$$

Onde: Velocidade de congelamento (°C/min)

T_2 = temperatura final (° C)

T_1 = temperatura inicial (° C)

t_2 = tempo final (min)

t_1 = tempo inicial (min)

5.2.2.4. Determinação do tempo de congelamento total real e teórico.

O tempo de congelamento total real obteve-se a partir das curvas de congelamento experimentais, e o tempo de congelamento total teórico foi calculado, baseando-se na equação simplificada de Pham (1986):

$$t = \frac{V}{hA} \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left(1 + \frac{Bi_s}{4} \right) \quad (5.2)$$

onde

$$\Delta H_1 = c_u (T_i - T_{fm}) \quad (5.3)$$

$$\Delta H_2 = L + c_s (T_{fm} - T_c) \quad (5.4)$$

$$\Delta T_1 = \left(\frac{T_i + T_{fm}}{2} \right) - T_{ar} \quad (5.5)$$

$$\Delta T_2 = T_{fm} - T_{ar} \quad (5.6)$$

$$Bi_s = hD / k_s \quad (5.7)$$

Onde :

V, A e D : volume, área e diâmetro das bisnagas de massa, consideradas como cilindros,

c_u : calor específico da massa antes do congelamento,

c_s : calor específico da massa após congelamento,

L : calor latente de congelamento,
 Ti : temperatura inicial de congelamento,
 T_{fm} : temperatura média de congelamento,
 Tc : temperatura final de congelamento, e
 Tar : Temperatura do ar.

para os cálculos dos tempos de congelamento realizados neste estudo correspondem a:

Temperatura do ar (° C): Temperatura de cada congelamento, conforme Tabela 5.1,

Temperatura inicial de congelamento (° C): Conforme Tabela 5.2,

Temperatura final de congelamento (° C): Conforme Tabela 5.2,

Diâmetro do cilindro (m): 0,039 para bisnaga de massa de 175 g
 0,030 para bisnaga de massa de 80 g

Coefficientes de transferência de calor (h):

C1 e C5 57 W/m²·K⁽¹⁾

C2 e C6 17 W/m²·K⁽¹⁾

C3 e C7 77 W/m²·K⁽¹⁾

C4 e C8 22 W/m²·K⁽¹⁾

T1 e T5 32 W/m²·K⁽¹⁾

T2 e T6 30 W/m²·K⁽¹⁾

T3 e T7 43 W/m²·K⁽¹⁾

T4 e T8 34 W/m²·K⁽¹⁾

Calor específico antes do congelamento (c_a): 2,81 x 10⁶ J/m³·K⁽²⁾

Calor específico após o congelamento (c_s): 1,88 x 10⁶ J/m³·K⁽²⁾

Calor latente de congelamento (L): 2,09 x 10⁸ J/m³⁽³⁾

Conductividade térmica (k_s): 0,95 W/m·K⁽²⁾

Onde: ⁽¹⁾ Heldman e Singh, 1981; ASHRAE, 1998; Earle, 1988

⁽²⁾ Rask, 1989

⁽³⁾ Pham, 1986

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Partindo das curvas apresentadas nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, obtiveram-se os dados de temperatura e tempos necessários aos cálculos de velocidades e tempos de congelamento.

5.3.1 Determinação das temperaturas iniciais e finais dos ensaios lineares criogênicos e em túnel

Baseando-se nas curvas mostradas nas figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 determinaram-se as temperaturas iniciais e finais de cada ensaio, e que são mostradas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Temperaturas iniciais e finais dos congelamentos lineares criogênicos e em túnel de ar forçado.

Congelamento	Temperatura inicial de congelamento (° C)	Temperatura final de congelamento (° C)
C1	28,55	- 15,52
C2	33,92	- 15,55
C3	27,38	- 17,30
C4	31,83	- 15,73
C5	27,64	- 19,37
C6	29,79	- 17,44
C7	27,97	- 16,40
C8	22,57	- 15,26
T1	16,90	- 12,50
T2	23,45	- 12,31
T3	15,68	- 18,19
T4	27,93	- 15,42
T5	23,46	- 15,06
T6	25,42	- 13,26
T7	36,79	- 18,98
T8	27,36	- 11,42

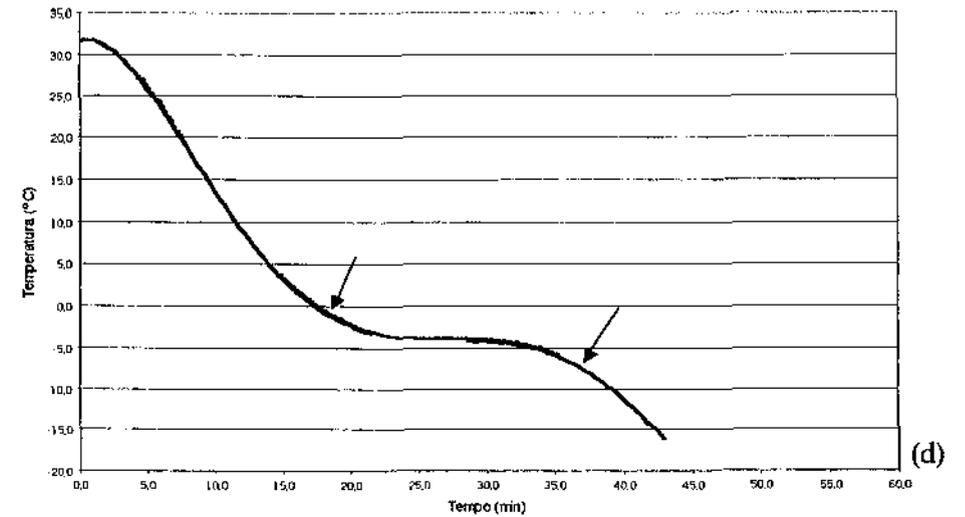
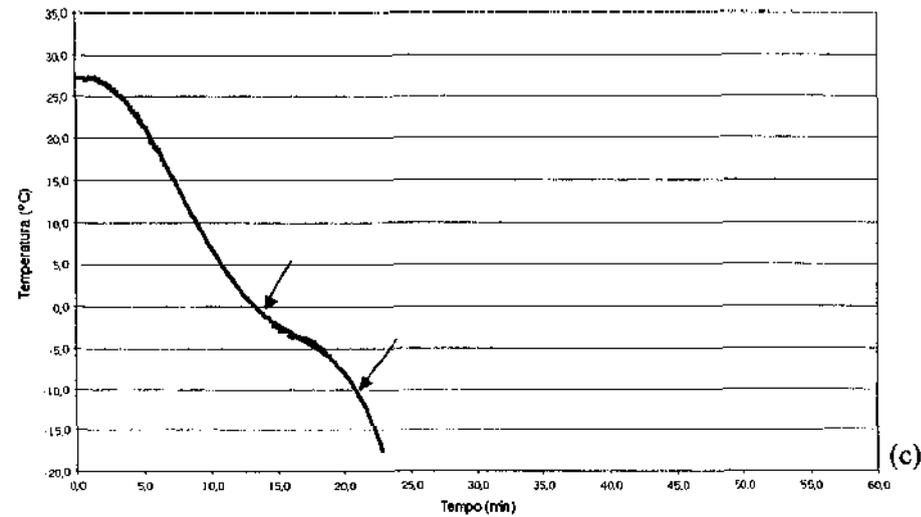
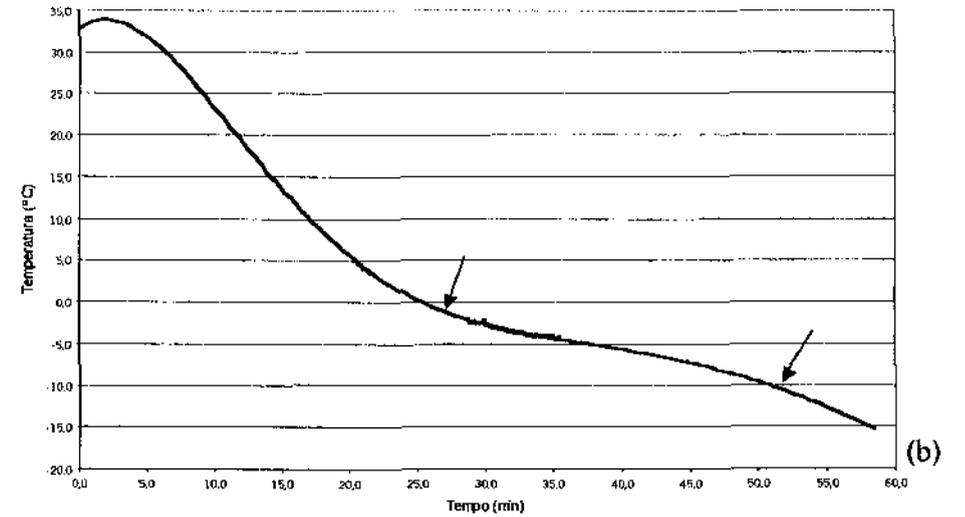
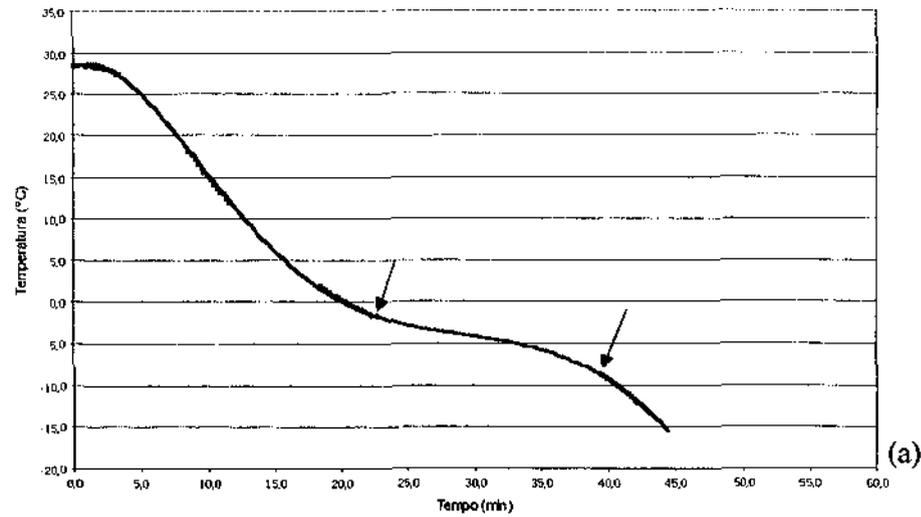
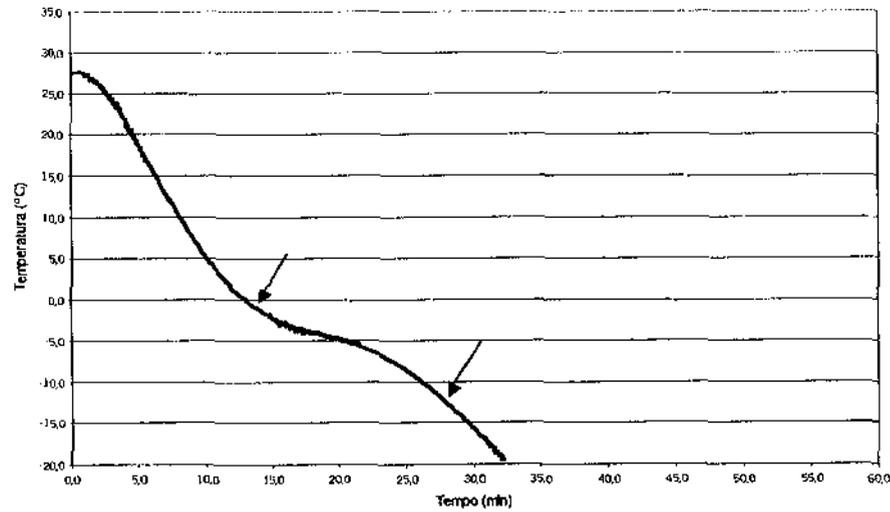
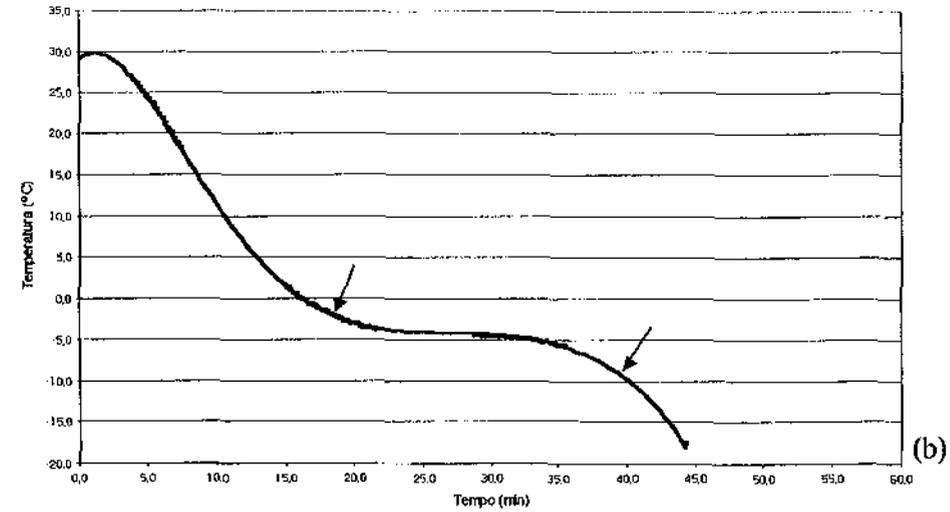


Figura 5.2 - Indicação das temperaturas e tempos para determinação das três fases dos congelamentos criogênicos:

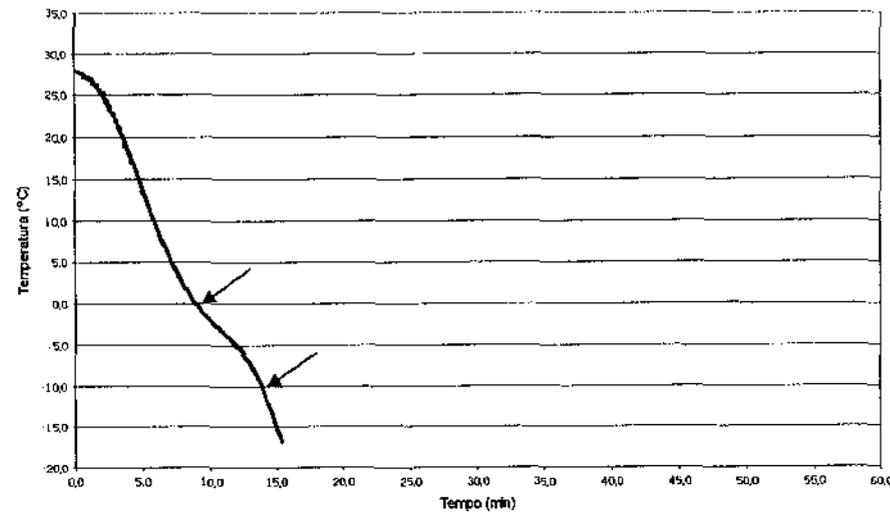
(a) Congelamento criogênico C1; (b) Congelamento criogênico C2; (c) Congelamento criogênico C3; e (d) Congelamento criogênico C4.



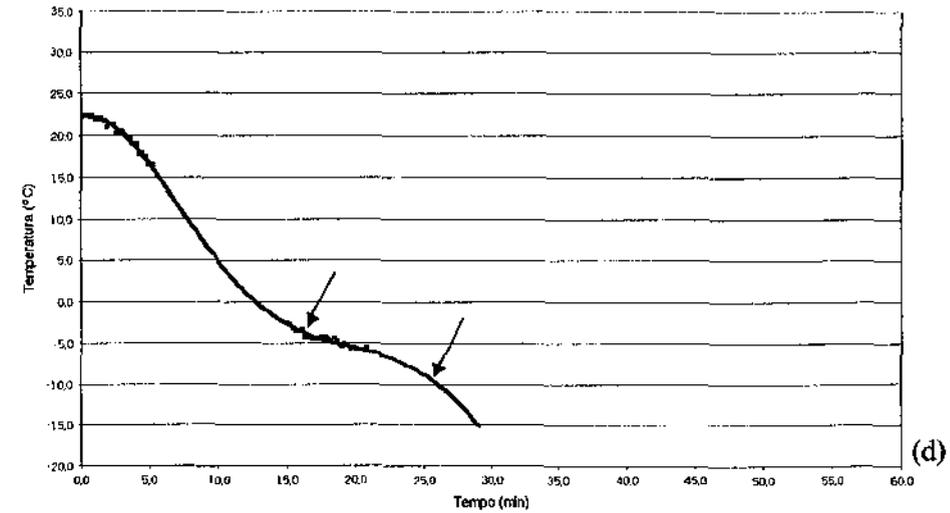
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.3 - Indicação das temperaturas e tempos para determinação das três fases dos congelamentos criogênicos:

(a) Congelamento criogênico C5; (b) Congelamento criogênico C6; (c) Congelamento criogênico C7; e (d) Congelamento criogênico C8.

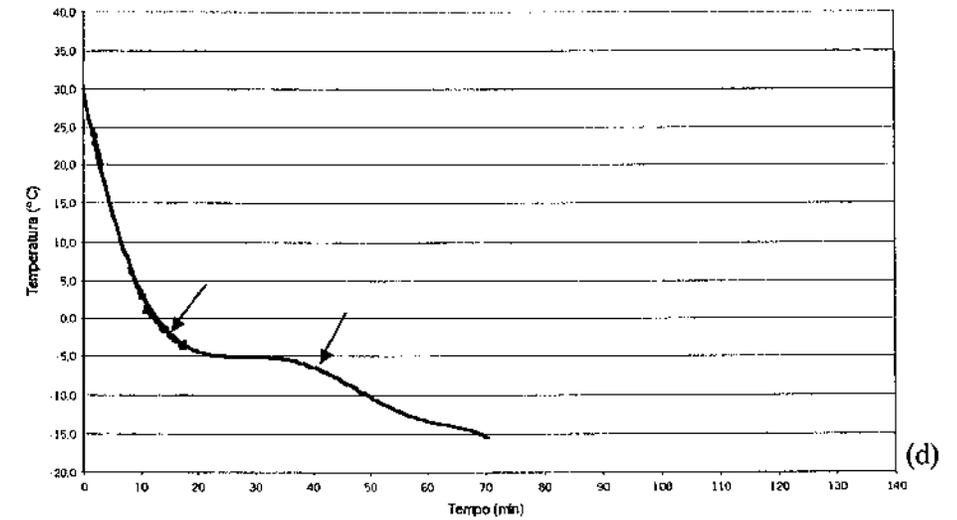
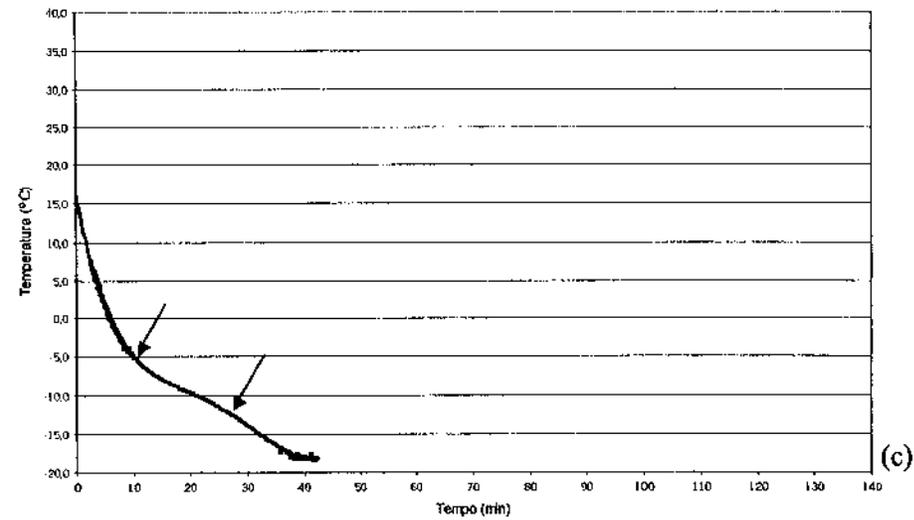
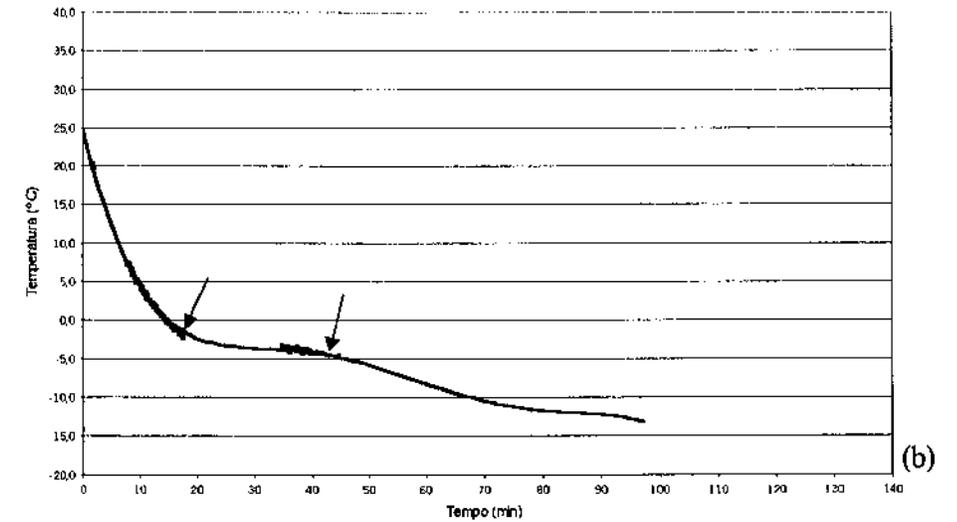
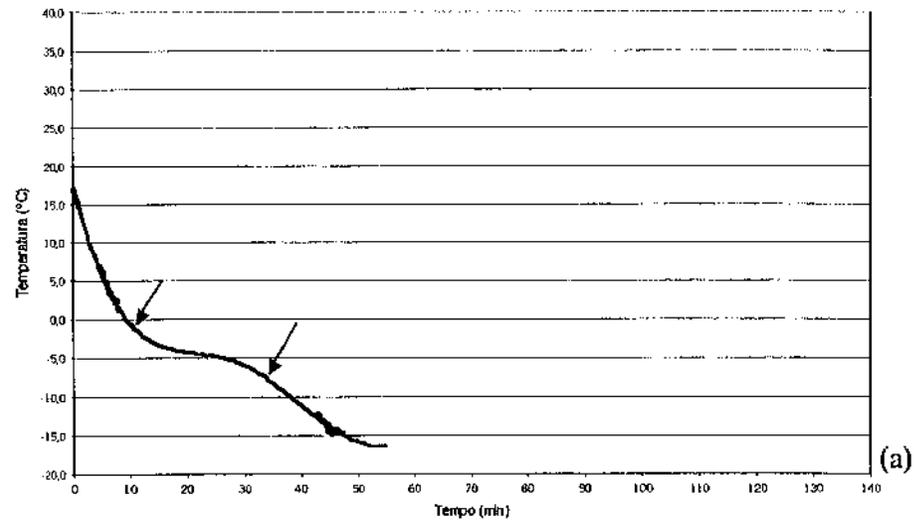


Figura 5.4 - Indicação das temperaturas e tempos para determinação das três fases dos congelamentos em túnel:
 (a) Congelamento em túnel T1; (b) Congelamento em túnel T2; (c) Congelamento em túnel T3; e (d) Congelamento em túnel T4.

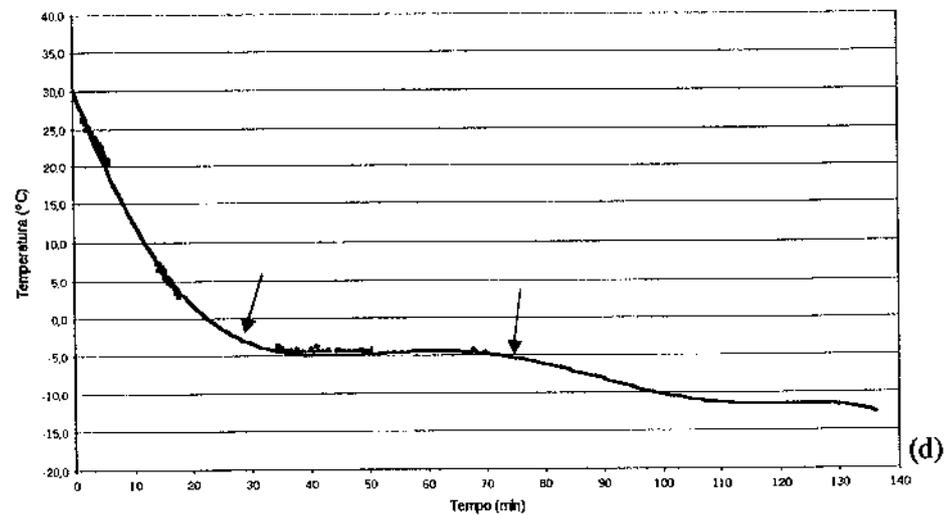
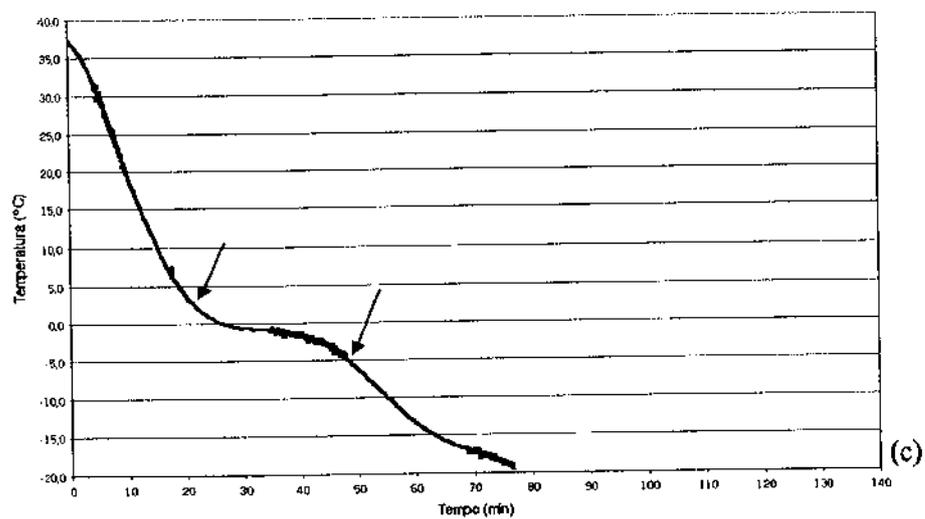
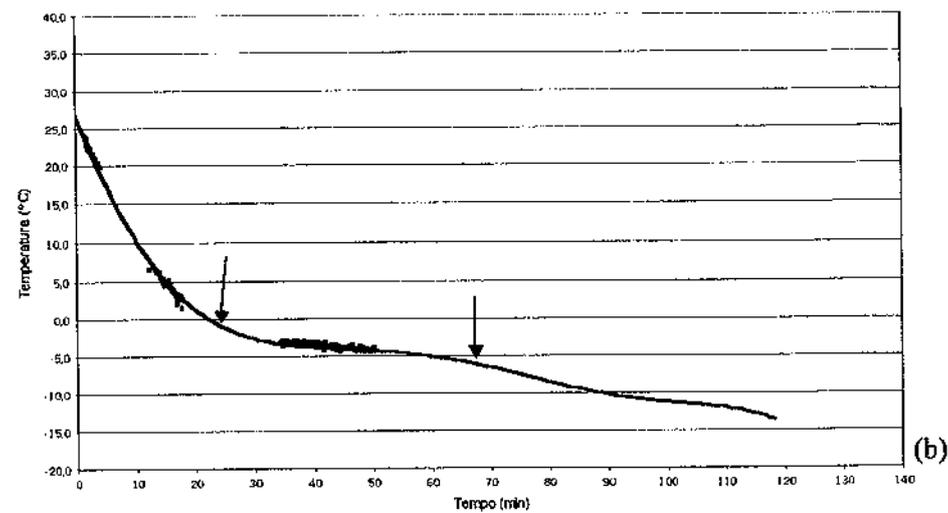
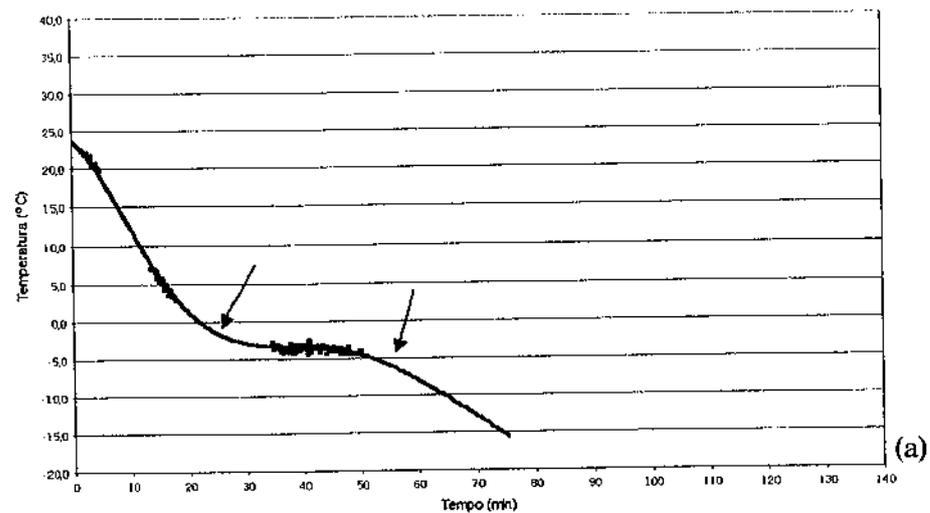


Figura 5.5 - Indicação das temperaturas e tempos para determinação das três fases dos congelamentos em túnel:

(a) Congelamento em túnel T5; (b) Congelamento em túnel T6; (c) Congelamento em túnel T7; e (d) Congelamento em túnel T8.

5.3.2. Determinação do período de congelamento

O cálculo do período de congelamento foi feito a partir dos valores apresentados na Tabela 5.3, onde se registra a temperatura inicial e final do patamar de congelamento e os respectivos tempos, apresentando-se na última coluna os valores deste índice.

Tabela 5.3. Valores dos tempos e temperaturas iniciais e finais do patamar da mudança de fase dos congelamentos criogênicos e em túnel de ar forçado.

Congelamento	Tempo inicial do patamar (min)	Tempo final do patamar (min)	Período de congelamento (min)
C1	22,60	39,60	17,00
C2	27,12	51,70	24,58
C3	13,98	20,97	6,99
C4	18,55	37,13	18,58
C5	13,98	27,97	13,99
C6	18,52	39,38	20,86
C7	9,32	13,97	4,65
C8	16,28	25,58	9,30
T1	11,00	34,47	23,47
T2	17,87	42,30	24,43
T3	10,50	27,55	17,05
T4	14,98	40,92	25,94
T5	25,75	55,00	29,25
T6	24,47	67,22	42,75
T7	22,92	49,05	26,13
T8	27,63	74,60	46,97

A Figura 5.6 apresenta os valores dos períodos do patamar dos congelamentos criogênicos em túnel.

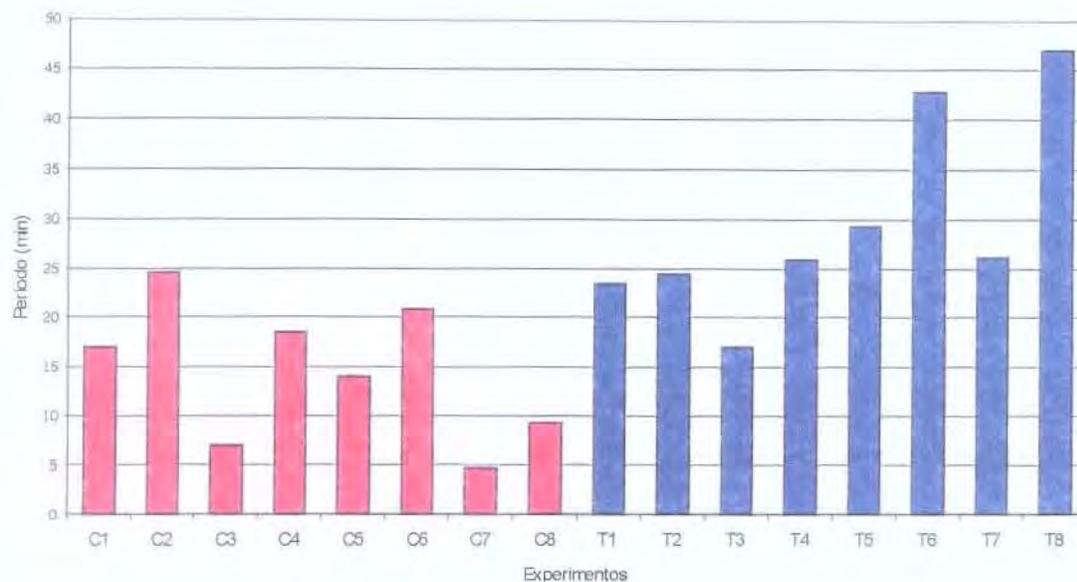


Figura 5.6. Períodos do patamar dos congelamentos criogênicos e em túnel

Observando a Tabela 5.3 e a Figura 5.6, onde são apresentados os valores do período de patamar dos congelamentos realizados neste estudo, constata-se que os congelamentos criogênicos em geral, apresentaram tempos menores que os congelamentos em túnel de ar forçado, exceto o congelamento C2, que apresentou um tempo de patamar superior aos congelamentos T3 e T1. Considerando os congelamentos criogênicos, verifica-se que os congelamentos C3, C7, C5 e C1, apresentaram patamares de menor duração que os congelamentos realizados sem ventilação, exceto o congelamento C8, que foi realizado a -50°C e com bisnaga de 80 g, constatando-se a influência da menor temperatura no tempo do patamar de congelamento. Considerando os congelamentos criogênicos sem ventilação, verifica-se que os realizados a uma temperatura de -50°C , C8 e C4, apresentaram tempos de período de patamares menores que os congelamentos realizados a -30°C , C6 e C2. Constatou-se também o efeito da temperatura e do peso da bisnaga em todos os ensaios, apresentando os congelamentos realizados a -50°C e com bisnagas de 80 g, os períodos de patamar menores. O congelamento C2 apresentou tempo de patamar maior entre os congelamentos criogênicos, valor coerente por ser um ensaio realizado a uma temperatura maior (-30°C) com a bisnaga maior (175 g) e na condição sem ventilação.

Os congelamentos em túnel apresentaram, em geral, períodos de patamar maiores quando comparados com os congelamentos criogênicos. O congelamento T3 foi o que

apresentou o tempo de patamar menor por ter sido realizado nas condições que propiciaram um menor tempo de congelamento que foram temperatura de -25°C com velocidade do ar de $5,14\text{ m/s}$ e com bisnagas de 80 g . Verificou-se também, no caso dos congelamentos em túnel, a influência da temperatura e do peso da bisnaga no período do patamar de congelamento. Os congelamentos T3 e T1, com temperaturas de -25°C e bisnagas de 80 g apresentaram os menores tempos, e os congelamentos T6 e T8, com temperaturas de -15°C e bisnagas de 175 g , os maiores tempos de patamar de congelamento. Ficaram numa posição intermediária os congelamentos realizados a -15°C com bisnaga de 80 g , T2 e T4, e os congelamentos realizados a -25°C e bisnagas de 175 g , T7 e T5, o que sugere uma compensação da maior temperatura com a bisnaga menor nos primeiros, e da maior temperatura com a bisnaga maior nos últimos.

5.3.3. Determinação das velocidades parciais e globais dos congelamentos criogênico e em túnel

Para determinação das velocidades parciais (V_{p1}) e globais (V_{p2}) foi preciso determinar através das curvas experimentais temperatura versus tempo, os tempos nos quais a temperatura da massa atingiu 0 , 15 e -12°C . Estes valores estão reunidos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Tempos iniciais e finais e velocidades parciais e globais dos congelamentos lineares criogênico e em túnel de ar forçado.

Congelamento	t_i 1 (min)	t_i 2 (min)	t_f (min)	Vp1 (°C/min)	Vp2 (°C/min)
C1	22,8	10,02	42,17	0,62	0,84
C2	27,0	14,12	54,25	0,44	0,67
C3	15,6	7,22	21,43	2,06	1,90
C4	20,2	9,27	40,40	0,59	0,87
C5	14,1	6,30	27,50	0,90	1,27
C6	18,2	8,57	41,25	0,52	0,83
C7	10,15	4,65	14,20	2,96	2,83
C8	16,0	5,58	27,22	1,07	1,25
T1	12,0	0,82	41,98	0,40	0,66
T2	13,3	3,90	81,88	0,17	0,35
T3	8,8	0,23	26,17	0,69	1,04
T4	15,0	4,60	55,28	0,30	0,53
T5	25,8	7,90	68,18	0,28	0,45
T6	24,3	7,02	105,83	0,15	0,27
T7	23,0	12,03	57,45	0,35	0,59
T8	27,8	8,78	136,25	0,11	0,21

Onde: t_i 1 = tempo correspondente à temperatura de 0° C; t_i 2 = tempo correspondente à temperatura de 15° C; t_f = tempo correspondente à temperatura de -12° C; Vp1 = velocidade parcial desde 0° C até -12° C; Vp2 = velocidade global desde 15° C até -12° C.

Com base nos resultados das velocidades parciais dos congelamentos apresentados na Tabela 5.4 e observando a Figura 5.7, que mostra os dois índices para cada congelamento, verifica-se que os ensaios realizados no sistema criogênico apresentaram velocidades maiores que os congelamentos realizados em túnel. As maiores velocidades foram conseguidas pelos congelamentos C7, C3, C8 e C5, que foram os ensaios que apresentaram tempos totais de congelamento também menores, como se observa nas curvas das Figuras 5.3 c, 5.2 c, 5.3 d e 5.3 a, respectivamente e com tempos menores de patamar de congelamento como mostrado na Figura 5.6.

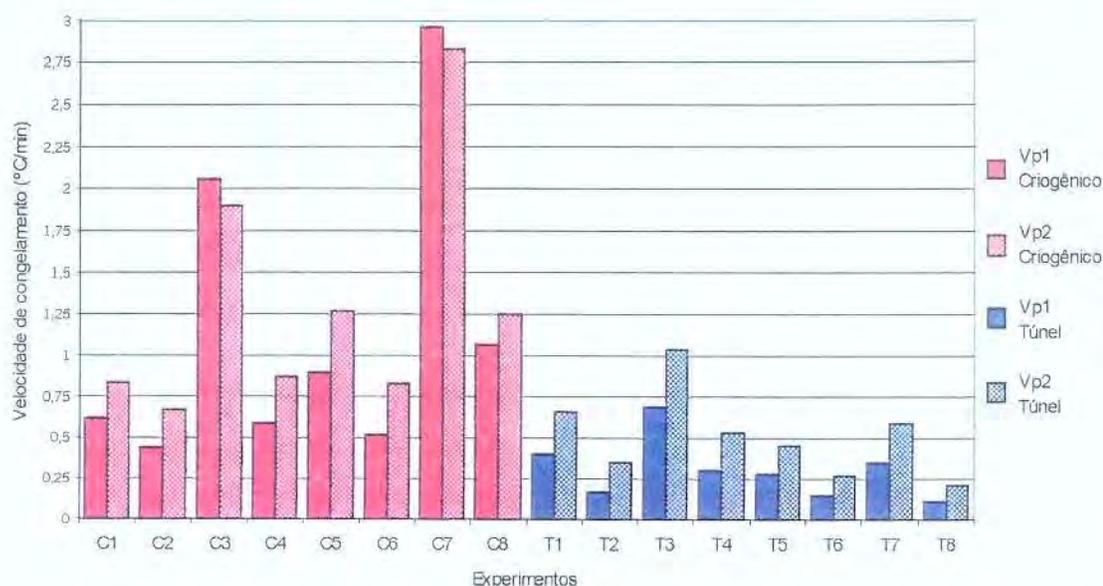


Figura 5.7. Velocidades parciais (Vp1) e globais (Vp2) dos congelamentos criogênicos e em túnel

Dos congelamentos em túnel, o congelamento T3 foi o que apresentou a maior velocidade seguidos pelos congelamentos T1 e T7, que apresentaram valores maiores quando comparados com o resto dos congelamentos realizados em túnel.

Estes resultados eram esperados devido a que, com o sistema criogênico consegue-se velocidades de troca de calor maiores que com o sistema mecânico de refrigeração. Por outro lado, verificou-se que, inclusive os congelamentos criogênicos realizados na condição sem ventilação (C2, C4, C6 e C8) apresentaram valores maiores que os congelamentos realizados em túnel.

Avaliando os valores de velocidade global apresentados na Tabela 5.4 e baseados na classificação de velocidade de congelamento segundo Brown (1991), os congelamentos C7, C3, C5, C8, T3, C4, C1 e C6 são considerados rápidos e os congelamentos C2, T1, T7, T4 e T5, T2, T6 e T8 são considerados comerciais. Para facilitar a comparação entre os processos criogênicos e em túnel mecânico se ordenaram os valores de velocidade em ordem decrescente como se mostra na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Classificação dos congelamentos em ordem decrescente de velocidade global de congelamento.

Cong.	Ventilação (m/s)	Temperatura do ar (°C)	Peso da bisnaga (g)	Velocidade congel. (°C/min)	Classificação
C7	Com	-50	80	2,83	Rápido
C3	Com	-50	175	1,90	Rápido
C5	Com	-30	80	1,27	Rápido
C8	Sem	-50	80	1,25	Rápido
T3	5,14	-25	80	1,04	Rápido
C4	Sem	-50	175	0,87	Rápido
C1	Com	-30	175	0,84	Rápido
C6	Sem	-30	80	0,83	Rápido
C2	Sem	-30	175	0,67	Comercial
T1	3,06	-25	80	0,66	Comercial
T7	5,14	-25	175	0,59	Comercial
T4	5,14	-15	80	0,53	Comercial
T5	3,06	-25	175	0,45	Comercial
T2	3,06	-15	80	0,35	Comercial
T6	3,06	-15	175	0,27	Comercial
T8	5,14	-15	175	0,21	Comercial

Observando a Tabela 5.5, verifica-se que houve um grupo grande de congelamentos que foram considerados na classificação comercial (de 0,167 a 0,83 °C/min) dos quais, só um ensaio correspondeu aos congelamentos criogênicos e sete ensaios aos congelamentos em túnel mecânico. Considerando os congelamentos rápidos e comparando os valores das velocidades de congelamento, verifica-se que o congelamento T3 foi, dos processos realizados no túnel, o que apresentou a maior velocidade, ficando numa posição intermediária entre os congelamentos criogênicos.

É necessário salientar que, pelos resultados do tratamento estatístico, de todas as respostas de qualidade da massa e do pão, o congelamento T3 seria escolhido como aquele

mais adequado considerando principalmente os modelos lineares obtidos na análise estatística.

Comparando os resultados deste trabalho com a literatura, encontra-se dificuldade por causa principalmente das diferenças da geometria das peças de massa congeladas. No trabalho de Neyreneuf e Delpuech (1993), trabalhando com peças de massa retangulares congeladas com velocidades criogênicas, chegaram à conclusão que valores na faixa de 0,797 a 0,918 °C/min não apresentaram influência negativa na qualidade do pão quando comparadas com a velocidade de 0,348 °C/min obtida em túnel de congelamento, considerada como padrão. A diferença principal entre esse trabalho e o aqui desenvolvido, se refere ao fato daqui ter-se trabalhado com cilindros de massa de diâmetro, em torno de 30 a 39 mm, muito diferentes à geometria de peças de massa retangulares com diferenças nas velocidades de transferência de calor e dos gradientes de temperatura entre a superfície e o centro da massa que, com certeza, influíram na qualidade da massa e do pão, porém, se considerarmos os resultados apresentados neste capítulo, estima-se que os congelamentos C5, C1, T3, T1 e T7 poderiam ser adequados ao desempenho da massa e do pão. Observa-se que estes congelamentos ficaram na faixa de 0,90 a 0,35 °C/min de velocidade parcial de congelamento (Tabela 5.4), semelhantes aos obtidos por Neyreneuf e Delpuech (1993).

Verifica-se também que estes resultados concordam com o trabalho de Sahlström *et al.* (1999), que conseguiram velocidades de 1 °C/min trabalhando com massas congeladas para pão. Já o trabalho de Le Bail *et al.* (1999) apresentou um valor de velocidade de congelamento muito baixo, de 0,19 °C/min, que pela classificação estaria no limite dos congelamentos lentos. É necessário indicar que esse trabalho foi diferente a este, devido a que eles trabalharam com temperatura de -20° C com velocidade de ar 1 m/s e com bisnagas de 200 g e 20 mm de diâmetro.

Baseados nos valores da velocidade global apresentados na Tabela 5.5, considera-se que os congelamentos adequados ficam na faixa de classificação rápida e comercial. Os congelamentos com velocidades muito altas (C7 e C3), classificados como rápidos, assim como os de velocidades muito baixas (T6 e T8) classificados como lentos dentro dos

comerciais, foram prejudiciais à qualidade da massa e do pão, como se mostrou nos capítulos III e IV, onde argumentou-se que as velocidades extremas de congelamento são prejudiciais à viabilidade e a atividade das células de levedura e as velocidades baixas prejudiciais à estrutura do glúten.

5.3.4. Determinação do tempo total de congelamento real e calculado

Com a finalidade de ter outro parâmetro de comparação dos congelamentos criogênicos e em túnel obtiveram-se os tempos totais de congelamento, a partir das curvas temperatura versus tempo experimentais. Para confirmar estes valores com a teoria de transferência de calor, calculou-se o “tempo de congelamento teórico” baseado nas características termofísicas da massa, na geometria e dimensões das bisnagas de massa congelada e nas temperaturas iniciais e finais de congelamento.

Na Tabela 5.6 registram-se os valores do tempo total real de congelamento e os valores dos tempos teóricos calculados a partir da equação simplificada de Pham (1986), utilizada para prever os tempos de congelamento de produtos alimentícios. Os dados utilizados para o cálculo dos tempos teóricos de congelamento são apresentados no Anexo 5.

Tabela 5.6. Tempos de congelamento real e teórico dos ensaios criogênicos e em túnel de ar forçado.

Congelamento	Tempo total de congelamento real (min)	Tempo total de congelamento teórico (min)	Erro relativo (%)
C1	44,5	44,43	-0,16
C2	58,42	112,37	92,35
C3	22,83	22,65	-0,79
C4	42,95	54,39	26,64
C5	32,15	33,80	5,13
C6	44,27	86,58	95,57
C7	15,37	15,84	3,06
C8	29,08	38,86	33,63
T1	55,10	58,04	5,34
T2	97,38	97,55	0,17
T3	41,93	47,21	12,59
T4	70,37	90,39	28,45
T5	75,42	77,97	3,38
T6	118,28	135,38	14,46
T7	76,57	70,06	-8,50
T8	136,25	117,93	-13,45

Com os dados da Tabela 5.6 elaborou-se a Figura 5.8 que mostra o tempo real e teórico para cada congelamento. Verifica-se observando a Figura 5.8 que há variações entre os tempos real e teórico, o que pode dever-se à dificuldade da escolha do valor do coeficiente de transferência de calor (h), principalmente nos congelamentos criogênicos sem ventilação (C2 e C6), que apresentaram os maiores valores de erro relativo, com relação ao valor real de tempo de congelamento. O critério para escolher os valores de h apresentados no item 5.2.2.4, foi primeiramente a consulta à literatura, onde se obtiveram valores de h na faixa de 5 a 25 W/m² K, para convecção livre e de 10 a 200 W/m² K, para convecção forçada (Singh e Heldman, 1993). Além desta informação, considerou-se a temperatura do ar, no caso dos congelamentos criogênicos, e a temperatura e velocidade do ar, no caso dos congelamentos realizados em túnel.

Considerando os congelamentos criogênicos por separado, aqueles realizados na condição com ventilação apresentaram pequenos desvios entre os valores de tempo de congelamento reais e teóricos. Os congelamentos criogênicos realizados na condição sem ventilação, contrariamente, apresentaram erros relativos maiores, confirmando a dificuldade de escolha de valores de h adequados, numa situação sem movimentação do meio refrigerante.

Os congelamentos criogênicos com ventilação e os congelamentos efetuados em túnel de ar forçado, apresentaram erros relativos baixos, mostrando que, no caso da utilização de convecção forçada, os valores de h escolhidos ajustaram-se melhor aos cálculos teóricos de tempos de congelamento.

Fica evidente a importância da movimentação do agente refrigerante no tempo total de congelamento quando se observam os ensaios realizados no sistema criogênico. Os congelamentos C1, C3, C5 e C7 (com ventilação) apresentaram tempos de congelamento menores que os congelamentos correspondentes C2, C4, C6 e C8 (sem ventilação), realizados nas mesmas condições diferenciando-se apenas na condição de ventilação.

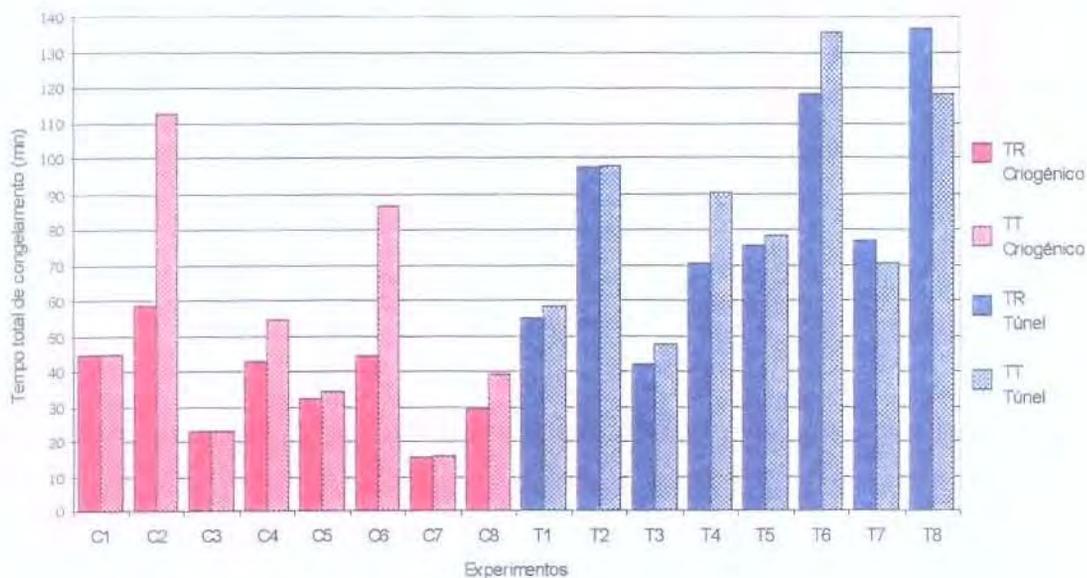


Figura 5.8 - Tempos totais reais e teóricos dos congelamentos criogênicos e em túnel

Considerando os congelamentos realizados em túnel de ar forçado, verifica-se que o congelamento T3 foi o de menor duração, seguido em ordem crescente pelos congelamentos T1, T5 e T7, todos realizados a uma temperatura de -25°C ; sendo os congelamentos T2, T6 e T8 os mais demorados, realizados a -15°C .

Avaliando em conjunto, os resultados apresentados neste capítulo, e as conclusões dos Capítulos III e IV, considerou-se interessante mostrar na Figura 5.9, os congelamentos mais promissórios dos sistemas criogênico e em túnel de ar forçado que foram os congelamentos C5 e C1, considerados intermediários entre os criogênicos, e os congelamentos T3, considerado rápido, e T1 e T7, considerados como comerciais entre os realizados no túnel.

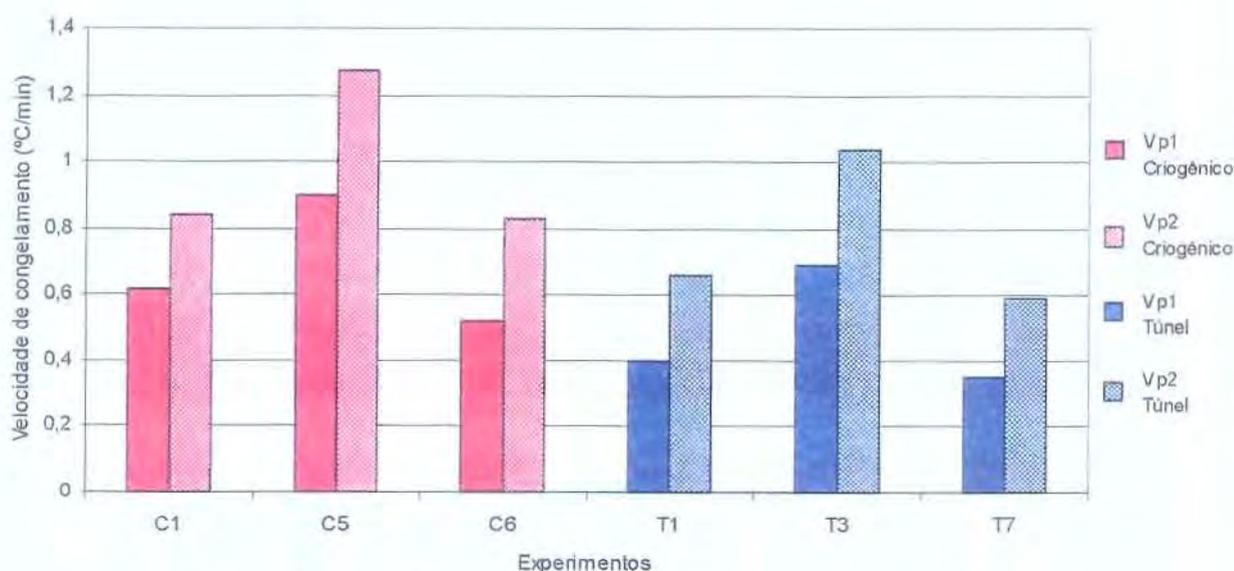


Figura 5.9 - Comparação das velocidades parciais dos congelamentos mais adequados
Vp1: velocidade parcial (0°C a -12°C); Vp2: velocidade parcial (15°C a -12°C)

Deve-se levar em conta que o congelamento C6, apesar de apresentar índices de velocidade e tempo de congelamento adequados, não é um processamento aconselhável, devido a ter sido realizado na condição sem ventilação, com gastos excessivos de agente refrigerante e que o congelamento C5, por apresentar a velocidade do ar maior deve ser realizado com um controle rígido da temperatura para evitar danos às células da levedura.

5.4. CONCLUSÕES

A análise dos tempos e velocidades de congelamento, conjuntamente com os resultados obtidos nos Capítulos III e IV, permitem concluir que as velocidades de congelamento intermediárias são mais benéficas para o congelamento de massas para pão.

O congelamento C1, com um período de patamar de congelamento de 17 minutos, uma velocidade parcial de congelamento de 0,62 °C/min, uma velocidade global de congelamento de 0,84 °C/min e tempos totais de congelamento real de 44,5 minutos e teórico de 44,43 minutos, apresentou-se, dentro dos congelamentos realizados no sistema criogênico, como o menos prejudicial às características da massa e do pão.

O congelamento T3, com um período de patamar de congelamento de 17,05 minutos, uma velocidade parcial de congelamento de 0,69 °C/min, uma velocidade global de congelamento de 1,04 °C/min e tempos totais de congelamento real de 41,93 minutos e teórico de 47,21 minutos, apresentou-se, dentro dos congelamentos realizados no sistema em túnel, como o menos prejudicial às características da massa e do pão.

Concluiu-se então, baseado nos índices de tempo e velocidade de congelamento, que os processos que podem ser sugeridos como adequados à estabilidade da qualidade panificável das massas foram os congelamentos criogênicos C1 e C5, e os congelamentos em túnel de ar forçado T1, T3 e T7.

5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANON. **Recommendations for the Processing Handling of Frozen Foods**. International Institute of Refrigeration. IIR, Paris. 1972.
- ASHRAE. **Thermal Properties of Foods**. Chapter 8. In: **Refrigeration Handbook**. 1998.
- BAKAL, A. e HAYAKAWA, K. Heat transfer during freezing and thawing of foods. **Advances in Food Research**, 20: 217-256. 1973

- BERLAND, S. **Etude rheologique et calorimétrique de l'influence de traitements de congélation-decongélation sur les propriétés de pâtes de farine de blé. Répercussion en technologie boulangère.** Thèse de Doctorat Université Paris 11, France: ENSIA-Massy. 1993.
- BIGG, E. K. **The super cooling of water.** Proc. Phis. Soc., B66: 688. 1963.
- BRENNAN, J. G.; BUTTERS, J. R.; COWELL, N. D.; LILLY, A. E. V. **Las operaciones de la ingeniería de los alimentos.** Acribia, Zaragoza. 1980.
- BROWN, M. H. Microbial aspects of frozen foods. Cap. 2. In: **Food freezing: Today and tomorrow.** Editado por Bald, W. B. Springer Verlag. 1991.
- BUSHUK, W. Distribution of water in dough and bread. **Baker's Digest**, 40: 36-40. 1966.
- EARLE, R.L. **Ingeniería de los Alimentos.** Acribia, Zaragoza, p. 49. 1988.
- FEENEY, R. E. Penguin egg white and polar fish blood serum proteins. **Int. J. Peptide Protein Research**, 19: 215. 1982.
- HAVET, M.; MANKAI, M.; Le BAIL, A. Influence of the freezing condition on the baking performances of French frozen dough. **Journal of Food Engineering**, 45: 139-145. 2000.
- HELDMAN, D. R., SINGH, R. P. **Food processing Engineering.** AVI, Westport. 1981.
- HSU, K. H.; HOSENEY, R. C.; SEIB, P.A. Frozen dough, I- Factors affecting stability of yeasted doughs. **Cereal Chemistry**, 56: 419-424. 1979a.
- HSU, K. H.; HOSENEY, R. C.; SEIB, P.A. Frozen dough, II- Effects of freezing and storing conditions on the stability of yeasted doughs. **Cereal Chemistry**, 56: 424-426. 1979b.
- KULP, K. Biochemical and biophysical principles of freezing. In: **Frozen and refrigerated doughs and batters.** Ed. Kulp, K.; Lorenz, K.; Brümmer, J. AACC Inc., 1995.

- LANGHAM, E. J.; MASON, B. C. The heterogeneous and homogeneous nucleation of super cooled water. **Proc. R. Soc., A247**: 493. 1958.
- Le BAIL, A.; GRINAND, C.; Le CLEACH, S.; MARTINEZ, S; QUILIN, E. Influence of storage conditions on frozen French bread dough. **Journal of Food Engineering**, **39**: 289-291. 1999.
- Le BAIL, A.; PASCO, M.; MÉRIC, L.; CAHAGNIER, B. Influence of the freezing rate on yeast activity in frozen bread dough. In: **Proceedings of The 10th International Cereal and Bread Congress**. Porto Carras, Greece. 9-12 june. 1996.
- MÉRIC, L.; LAMBERT-GUILOIS, S.; NEYRENEUF, O.; RICHARD-MOLARD, D. Cryoresistance of baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* in frozen dough: Contribution of cellular trehalose. **Cereal Chemistry**, **72** (6): 609-615.1997.
- MERYMAN, H. T. Measurement of freezing parameters, Cap. 7. In: **Cryobiology**. Academic Press, 1960.
- NEYRENEUF, O.; DELPUECH, B. Freezing experiments on yeasted dough slabs. Effects of cryogenic temperatures on the baking performance. **Cereal Chemistry**, **70** (1): 109-111, 1993.
- PHAM, Q. T. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. **Journal of Food Technology**, **21**: 209-219. 1986.
- RASK. C. Thermal properties of dough and bakery products. A review of published data. **Journal of Food Engineering**, **9**: 167-193. 1989.
- REID, D. S. Fundamental physicochemical aspects of freezing. **Food Technology**, **37** (4): 110-115. 1983.
- REID, D. S. Optimizing the quality of frozen foods. **Food Technology**, **44** (7): 78-82. 1990.

SALSTRÖM, S.; NIELSEN, A. O.; FAERGESTAD, E. M.; LEA, P.; PARK, W. J.; ELLEKJAER, M. R. Effect of dough processing conditions and DATEM on Norwegian Hearth bread prepared from frozen dough. **Cereal Chemistry**, 76 (1): 38-44. 1999.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. Food freezing. Cap. 8. In: **Introduction of Food Engineering**. 1993.

CONCLUSÕES GERAIS

Do efeito da formulação da massa

1. A formulação da massa influenciou significativamente no volume específico e na dureza do miolo do pão. O glúten adicionado, o tipo de fermento e a trealose mostraram uma influência significativa nas características da massa e do pão.

2. As formulações com altos teores de glúten foram as que apresentaram o melhor desempenho, com relação às características tecnológicas do pão.

3. As massas elaboradas com fermento para massa doce apresentaram taxas de sobrevivência celular das leveduras, maiores que as elaboradas com fermento para massa salgada.

4. Os pães feitos com a levedura instantânea para massa doce apresentaram um volume específico médio maior que os pães feitos com a levedura instantânea para massa salgada.

5. As taxas de sobrevivência celular das leveduras nas massas preparadas com os dois tipos de fermento, foram superiores a 90%, na presença de 10% de trealose, demonstrando o efeito benéfico deste dissacarídeo na estabilidade das leveduras.

Do tipo de congelamento

Do estudo com sistema criogênico

1. O sistema criogênico pode ser utilizado para congelar massas destinadas à elaboração do pão, sendo necessário um controle das temperaturas de congelamento, pelo seu efeito prejudicial à massa e o pão.

2. A condição de trabalho no congelador criogênico sem ventilação não é adequada, devido à má distribuição de gás dentro do equipamento, com conseqüências deletérias à massa e o pão e pelo gasto excessivo de refrigerante.

3. A temperatura de -30°C apresentou-se mais favorável às características da massa e do pão, quando comparada à temperatura de -50°C .

4. A bisnaga de massa de 80 gramas apresentou-se mais benéfica para o desempenho em panificação na condição com ventilação, que a bisnaga de 175 gramas.

5. O congelamento C1, realizado com ventilação a -30°C e com bisnaga de 175 gramas, apresentou-se como o mais estável para as características reológicas da massas e de viabilidade e produção de CO_2 pelas leveduras e para as características tecnológicas do pão, ao longo do armazenamento de 50 dias.

Do estudo com o túnel de ar forçado

1. O túnel de congelamento mecânico com ar forçado, pode ser utilizado para congelar massas destinadas à elaboração do pão.

2. As condições de temperatura e velocidade do ar e tamanho de bisnaga de massa escolhidas neste estudo permitiram verificar que houve uma influência significativa das variáveis nas características da massa e do pão, o que permitiu analisar a influência dos efeitos principais e dos modelos.

3. O estudo dos efeitos mostrou que as variáveis resposta da massa e do pão foram menos prejudicadas quando se trabalhou com temperaturas de ar de -25°C , com velocidades de ar de 5,14 m/s e com bisnagas de 80 gramas, condições que correspondem ao congelamento T3.

4. O estudo dos modelos permitiu verificar que o modelo linear ajustou-se melhor às condições de trabalho deste estudo. Esta análise permitiu concluir que as características da qualidade da massa e do pão ficaram mais estáveis quando se trabalhou com temperaturas do ar na faixa de -20 a -25°C , com velocidades do ar do túnel na faixa de $4,2$ a $5,14$ m/s e com bisnagas de massa na faixa de 80 a 120 gramas.

Do estudo do tempo de armazenamento

O tempo de armazenamento sob congelamento teve uma influência negativa em todas as características de qualidade da massa e do pão, quando os valores de estas características foram comparados com a massa não congelada como padrão.

Do estudo das velocidades e dos tempos de congelamento

1. Os cálculos de tempos e velocidades de congelamento dos ensaios criogênicos e em túnel permitiram concluir que as velocidades de congelamento intermediárias, na faixa de $0,59$ a $1,27^{\circ}\text{C}/\text{min}$, mostraram-se adequadas a processos de congelamento de massas, sendo que, no caso dos valores extremos deve haver um controle rígido de temperatura e tempos de congelamento para não prejudicar as células de levedura e a estrutura do glúten.

2. Os congelamentos determinados como os melhores, no caso do sistema criogênico, seria o congelamento C1 e, no caso do sistema em túnel de ar forçado, seria o congelamento T3, porém poderiam indicar-se também os congelamentos C5, T1 e T7 como aptos a este tipo de operação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Estudar o efeito do congelamento sobre o amido, que por ser um componente importante, pela alta concentração na massa, deve influir na sua reologia.
2. Estudar a inclusão de enzimas na formulação, para diminuir o efeito de retrogradação do amido, que influi na dureza do miolo do pão.
3. Aprofundar o estudo do efeito das baixas temperaturas nas células de levedura, tentando estabelecer uma relação entre viabilidade das células e capacidade de produção de CO₂.

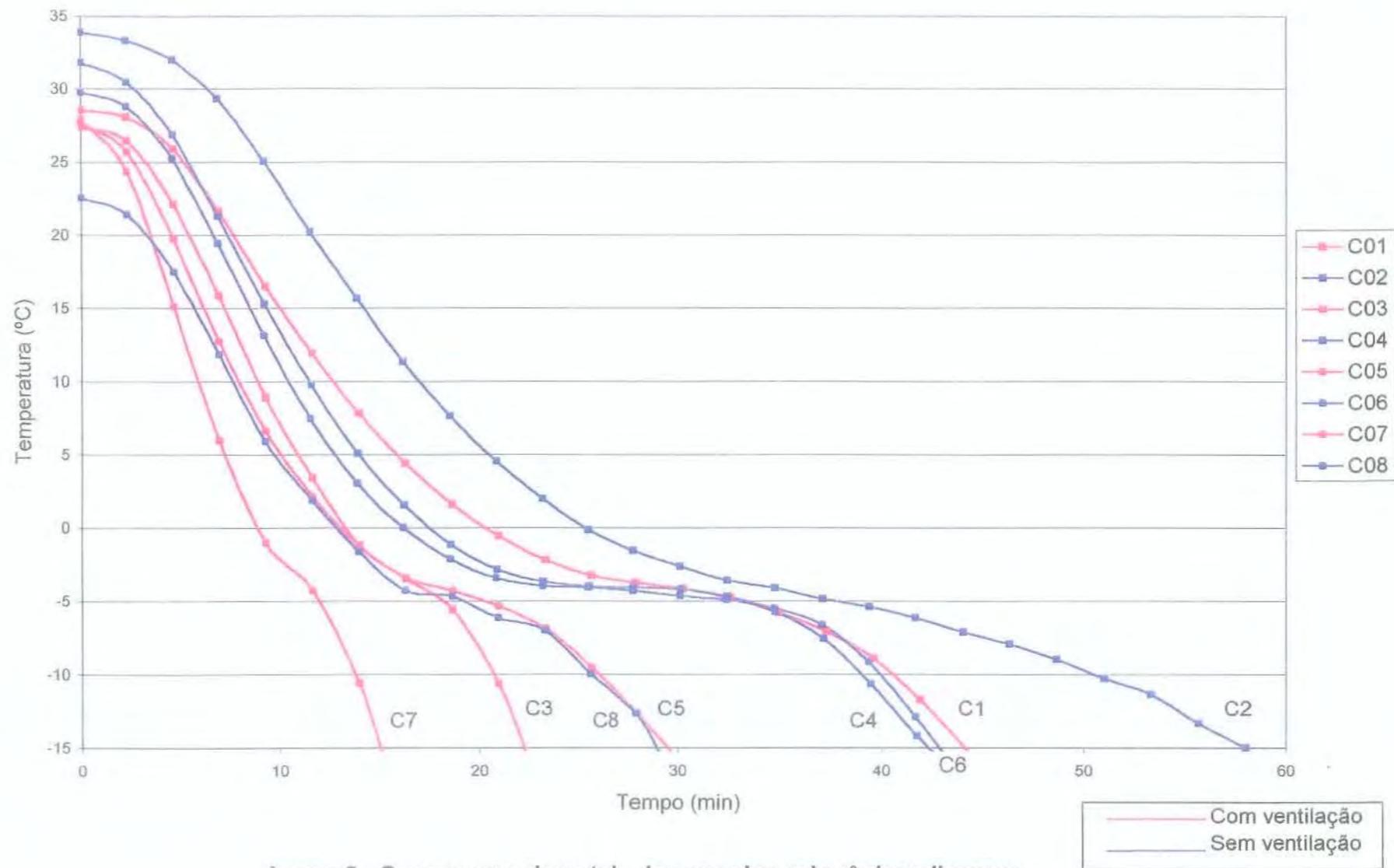
Anexo 1. Avaliação da qualidade do pão

• Características externas:

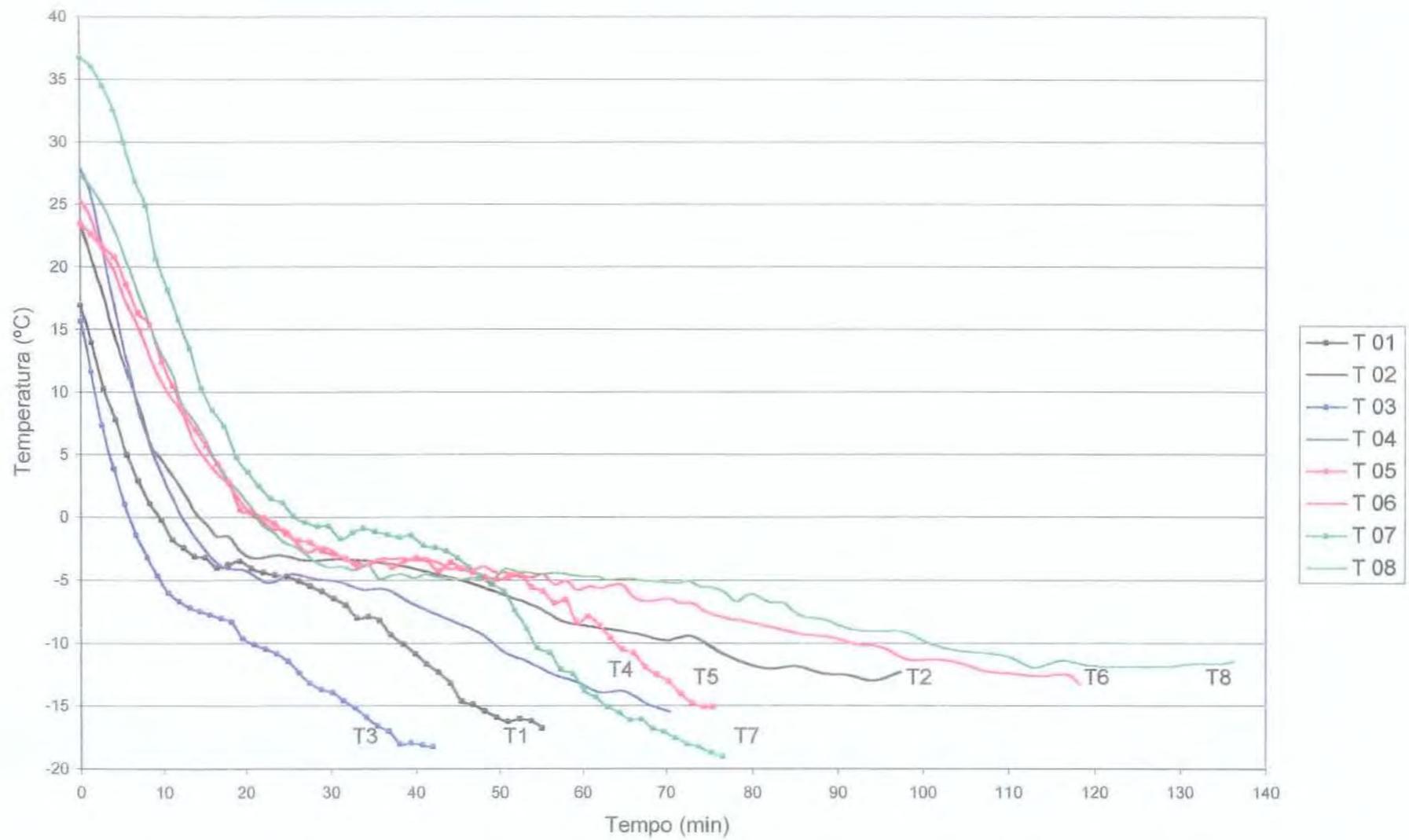
	Valor máximo
→ Cor da crosta: (Fatores indesejáveis: não uniforme, opaca, muito clara ou muito escura)	10
→ Quebra: (Fatores indesejáveis: muito pequena, áspera, desigual)	5
→ Simetria: (Fatores indesejáveis: laterais, pontas e parte superior desiguais)	5
TOTAL	40

• Características internas:

→ Características da crosta: (Fatores indesejáveis: borrachenta, quebradiça, dura, muito grossa, muito fina)	5
→ Cor do miolo: (Fatores indesejáveis: cinza, opaca, desigual, escura)	10
→ Estrutura da célula do miolo: (Fatores indesejáveis: falta de uniformidade, presença de buracos, muito aberta ou compacta)	10
→ Textura do miolo: (Fatores indesejáveis: falta de uniformidade, desigualdade, áspera, compacta, seca)	10
TOTAL	35



Anexo 2 - Curvas experimentais dos ensaios criogênicos lineares



Anexo 3 - Curvas experimentais dos ensaios em túnel lineares

Anexo 4 - Valores das características de qualidade da massa e do pão dos congelamentos realizados em túnel de ar forçado: (a) 30 dias de armazenamento; (b) 60 dias de armazenamento.

Cong.	T (°C)	V (m/s)	P (g)	F (gf/mm)	H (mm)	E	V (cc/g)	D (gf)	L (UFC/g)	CO ₂ (mL)
T1	-25,0	3,06	80,0	1517	78,9	79,5	2,90	364,0	65	1200
T2	-15,0	3,06	80,0	1224	74,6	82,5	3,40	384,0	87	1018
T3	-25,0	5,14	80,0	1215	74,7	87,5	4,85	209,0	180	1472
T4	-15,0	5,14	80,0	1571	78,0	83,5	3,65	275,0	120	1209
T5	-25,0	3,06	175,0	1479	80,1	72,5	2,10	741,0	53	1124
T6	-15,0	3,06	175,0	1128	79,8	76,0	2,40	616,0	59	1185
T7	-25,0	5,14	175,0	1497	75,4	85,5	4,90	271,0	103	1410
T8	-15,0	5,14	175,0	1390	79,1	81,5	3,20	328,0	53	1287
T9	-20,0	4,14	127,5	1321	75,1	85,5	4,25	341,0	91	1311
T10	-20,0	4,14	127,5	1299	77,9	82,0	3,40	322,0	103	1306
T11	-20,0	4,14	127,5	1285	79,1	78,0	2,90	442,0	99	1237
T12	-28,4	4,14	127,5	1276	76,7	79,5	4,95	213,0	146	1257
T13	-11,6	4,14	127,5	1072	75,6	82,5	3,85	217,0	61	1282
T14	-20,0	1,28	127,5	1055	79,0	78,5	2,40	633,0	73	1187
T15	-20,0	6,41	127,5	1134	78,3	79,5	3,00	512,0	28	1393
T16	-20,0	4,14	47,7	1530	76,1	84,5	4,45	308,0	121	1274
T17	-20,0	4,14	207,0	1250	72,7	87,5	4,20	293,0	95	1305

(a)

Cong.	T (°C)	V (m/s)	P (g)	F (gf/mm)	H (mm)	E	V (cc/g)	D (gf)	L (UFC/g)	CO ₂ (mL)
T1	-25,0	3,06	80,0	1025	78,1	78,5	2,90	401,7	65	1063
T2	-15,0	3,06	80,0	1202	76,8	79,5	3,40	570,7	75	998
T3	-25,0	5,14	80,0	1088	73,3	87,5	4,40	273,2	110	1443
T4	-15,0	5,14	80,0	1188	77,7	79,5	2,90	441,7	120	1192
T5	-25,0	3,06	175,0	1197	70,1	69,0	1,60	1099,2	58	958
T6	-15,0	3,06	175,0	1021	78,6	71,0	2,30	546,9	58	1052
T7	-25,0	5,14	175,0	1383	72,9	80,0	3,80	276,7	103	1417
T8	-15,0	5,14	175,0	1190	77,9	77,5	2,70	577,6	53	1041
T9	-20,0	4,14	127,5	1093	77,5	74,0	2,50	409,8	94	1224
T10	-20,0	4,14	127,5	1103	78,3	81,5	3,40	403,1	108	1236
T11	-20,0	4,14	127,5	1118	77,3	77,0	2,90	467,3	89	1065
T12	-28,4	4,14	127,5	830	73,5	86,5	3,20	288,3	144	1374
T13	-11,6	4,14	127,5	1153	76,5	83,0	3,50	282,0	79	1257
T14	-20,0	1,28	127,5	1418	68,9	77,0	2,40	649,0	45	999
T15	-20,0	6,41	127,5	1325	78,1	76,5	2,70	514,4	30	1260
T16	-20,0	4,14	47,7	1175	73,8	83,5	3,80	244,2	68	1379
T17	-20,0	4,14	207,0	1009	75,2	75,0	1,40	386,7	95	1257

(b)

Anexo 5 - Dados necessários para o cálculo dos tempos teóricos de congelamento, conforme Pham, 1986

	D	Ab	L	V	A	h	Bi S	Ti	Tc	Ta	Tfm	$\Delta H1$	$\Delta H2$	$\Delta T1$	$\Delta T2$	t	t (min)
C1	0,039	0,0012	0,110	0,00013	0,016	57	2,340	28,55	-15,52	-30,00	-5,43	95488746	227965891	41,56	24,57	2666,00	44,43
C2	0,039	0,0012	0,110	0,00013	0,016	17	0,698	33,92	-15,55	-30,00	-5,44	110600617	228007458	44,24	24,56	6742,15	112,37
C3	0,039	0,0012	0,110	0,00013	0,016	77	3,161	27,38	-17,30	-50,00	-8,00	99417519	226484188	59,69	42,00	1359,06	22,65
C4	0,039	0,0012	0,110	0,00013	0,016	22	0,903	31,83	-15,73	-50,00	-7,59	110761742	224308859	62,12	42,41	3263,19	54,39
C5	0,030	0,0007	0,098	0,00007	0,011	57	1,800	27,64	-19,37	-30,00	-6,44	95776911	233300297	40,60	23,56	2027,76	33,80
C6	0,030	0,0007	0,098	0,00007	0,011	17	0,537	29,79	-17,44	-30,00	-5,94	100392083	230626166	41,93	24,06	5194,75	86,58
C7	0,030	0,0007	0,098	0,00007	0,011	77	2,432	27,97	-16,40	-50,00	-7,76	100410292	225237184	60,10	42,24	950,57	15,84
C8	0,030	0,0007	0,098	0,00007	0,011	22	0,695	22,57	-15,26	-50,00	-7,46	84393798	223657646	57,55	42,54	2331,81	38,86
T1	0,030	0,0007	0,098	0,00007	0,011	32	1,011	16,90	-16,76	-25,00	-5,23	62193393	230670986	30,83	19,77	3482,40	58,04
T2	0,030	0,0007	0,098	0,00007	0,011	30	0,947	23,45	-12,31	-15,00	-3,01	74359709	226479244	25,22	11,99	5853,16	97,55
T3	0,030	0,0007	0,098	0,00007	0,011	43	1,358	15,68	-18,19	-25,00	-5,61	59822006	232652336	30,04	19,39	2832,60	47,21
T4	0,030	0,0007	0,098	0,00007	0,011	34	1,074	27,93	-12,84	-15,00	-3,15	87340195	227213590	27,39	11,85	5423,61	90,39
T5	0,039	0,0012	0,110	0,00013	0,016	32	1,314	23,46	-15,06	-25,00	-4,79	79370642	228315534	34,34	20,21	4677,93	77,97
T6	0,039	0,0012	0,110	0,00013	0,016	30	1,232	25,42	-13,26	-15,00	-3,26	80597488	227795526	26,08	11,74	8123,06	135,38
T7	0,039	0,0012	0,110	0,00013	0,016	43	1,765	36,79	-18,98	-25,00	-5,82	119724939	233746929	40,49	19,18	4203,43	70,06
T8	0,039	0,0012	0,110	0,00013	0,016	34	1,396	27,36	-11,42	-15,00	-2,78	84689073	225246095	27,29	12,22	7075,51	117,93
ks	0,95	W/m·K															
cu	2,81E+06	J/m ³ ·K															
es	1,88E+06	J/m ³ ·K															
L	2,09E+08	J/m ³															