



CNE/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

FABRICAÇÃO DE LUVAS CIRÚRGICAS COM LÁTEX DE BORRACHA NATURAL VULCANIZADO COM RAIOS GAMA

HUGO DAVID CHIRINOS COLLANTES

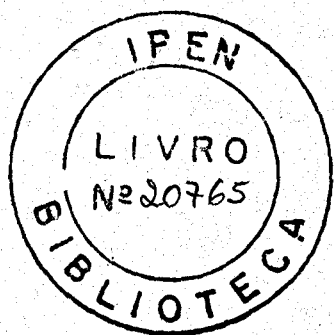
Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear.

Orientador:
Dra. Selma Matheus Loureiro Guedes

**São Paulo
1995**

**FABRICAÇÃO DE LUVAS CIRÚRGICAS COM LÁTEX DE
BORRACHA NATURAL VULCANIZADO
COM RAIOS GAMA**

HUGO DAVID CHIRINOS COLLANTES



**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear.**

Orientadora: Dra. Selma Matheus Loureiro Guedes

1995

Minha homenagem para a Dra. Selma
pela sua orientação e dedicação.

A meus pais Victor e Julia

Sinceros agradecimentos para COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, pela concessão de bolsa de mestrado.

AGRADECIMENTOS

- IPEN, pela oportunidade da realização deste trabalho.
- Ao sr. Youssef Michel Antônio Issa, pelo empréstimo das instalações da fábrica, “Elias Fausto Com. Ind. LTDA”, utilizada para desenvolvimento da parte experimental.
- Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos, pelo empréstimo do higrógrafo.
- Fábrica de Látex de São Roque, pela doação do látex.
- Johnson & Johnson, pela doação do látex.
- Ciquine S. A. pela doação do acrilato n-butila.
- Itatex, pela doação do talco industrial.
- Parabor, pela doação do antioxidante, wingstay-L.
- EMBRARAD, pela irradiação do látex e das luvas cirúrgicas.
- Cristiane Márcia Ferreira, pela ajuda prestada nas técnicas de laboratório.
- CPD/IPEN, pela orientação na digitação e nas ilustrações.
- Eng^o. Carlos Silveira e Eng^a. Elizabeth Ribeiro, pela irradiação do látex.

AGRADECIMENTOS

- IPEN, pela oportunidade da realização deste trabalho.
- Ao sr. Youssef Michel Antônio Issa, pelo empréstimo das instalações da fábrica, “Elias Fausto Com. Ind. LTDA”, utilizada para desenvolvimento da parte experimental.
- Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos, pelo empréstimo do higrógrafo.
- Fábrica de Látex de São Roque, pela doação do látex.
- Johnson & Johnson, pela doação do látex.
- Ciquine S. A. pela doação do acrilato n-butila.
- Itatex, pela doação do talco industrial.
- Parabor, pela doação do antioxidante, wingstay-L.
- EMBRARAD, pela irradiação do látex e das luvas cirúrgicas.
- Cristiane Márcia Ferreira, pela ajuda prestada nas técnicas de laboratório.
- CPD/IPEN, pela orientação na digitação e nas ilustrações.
- Eng^o. Carlos Silveira e Eng^a. Elizabeth Ribeiro, pela irradiação do látex.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xv
1 INTRODUÇÃO	1
2 ASPECTOS GERAIS	5
2.1 LÁTEX DE BORRACHA NATURAL.....	5
2.2 VULCANIZAÇÃO INDUZIDA COM RADIAÇÃO IONIZANTE.....	11
2.3 PROCESSO DE IMERSÃO.....	23
2.4 TEORIA DE SECAGEM.....	25
3 FABRICAÇÃO DE LUVAS CIRÚRGICAS	31
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1.1 VULCANIZAÇÃO.....	32
3.1.1.1 Reagentes.....	32
3.1.1.2 Formulação.....	33
3.1.1.3 Irradiação.....	34
3.1.2 MÉTODO ESTATÍSTICO.....	35
3.1.2.1 Introdução.....	35
3.1.2.2 Planejamento fatorial.....	38
3.1.3 FABRICAÇÃO.....	45
3.1.3.1 Método de imersão com coagulante.....	46
3.1.3.2 Parâmetros de processo.....	50

3.1.3.3 Propriedades.....	54
3.1.4 ESTERILIZAÇÃO.....	56
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
3.2.1 PARÂMETROS DE PROCESSO.....	57
3.2.1.1 Na espessura.....	57
3.2.1.2 Na secagem.....	65
3.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS E ESTERILIZAÇÃO.....	72
3.3 CONCLUSÕES.....	74
4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	77
4.1 ASPECTOS TEÓRICOS.....	78
4.1.1 FONTE DE IRRADIAÇÃO.....	79
4.1.2 TEORIA ECONÔMICA.....	81
4.2 CÁLCULOS E DISCUSSÃO.....	86
4.2.1 CAPACIDADE DE IRRADIAÇÃO E ATIVIDADE DA FONTE.....	87
4.2.2 INVESTIMENTO DE CAPITAL.....	88
4.2.3 CUSTOS DE IRRADIAÇÃO.....	90
4.2.4 CUSTOS DE FABRICAÇÃO.....	92
4.2.5 OPÇÕES COMERCIAIS.....	95
5 CONCLUSÕES.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

FABRICAÇÃO DE LUVAS CIRÚRGICAS COM LÁTEX DE BORRACHA NATURAL VULCANIZADO COM RAIOS GAMA

HUGO DAVID CHIRINOS COLLANTES

RESUMO

Foram fabricadas luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante, a partir do látex de borracha natural vulcanizado com raios gama, com uma dose de 10 kGy na presença de ar, à temperatura ambiente, utilizando o seguinte sistema de radiosensibilizador: 3 phr de An-B / 0,2 phr de KOH. A influência dos parâmetros de fabricação na espessura das luvas cirúrgicas estudada através da técnica de desenho fatorial fracionado, se resume em uma correlação linear empírica: $y = 0,213 + 0,025 [\text{CaCl}_2] + 0,019 t$. A concentração da solução coagulante e o tempo de saída do molde do látex irradiado, dominam o processo de deposição das partículas de borracha sobre a superfície do molde. As luvas cirúrgicas fabricadas alcançaram espessuras menores que 0,2 mm. Os ensaios de secagem do filme de borracha coagulada com látex irradiado, foram realizados com convecção livre e com convecção forçada. Nas condições experimentais a umidade crítica da borracha foi de 0,161, para espessuras menores que 0,2 mm. Também observou-se que existe pouca umidade superficial na borracha. A convecção forçada favorece a secagem no período ante-crítico. Porém, no período pós-crítico, a velocidade do ar não representa um parâmetro importante. Isto também se demonstra pelo valor da velocidade de evaporação, que no ponto crítico, foi de 0,3976 kg/h.m² para convecção forçada e 0,2583 kg/h.m² para convecção livre. Os ensaios mecânicos das luvas fabricadas, mostram uma ótima resistência à tração de 26,8 MPa demonstrando que atingem um grau ótimo de reticulação. Quando são envelhecidas decresce para 25,43 MPa indicando boa resistência térmica. Porém, quando as luvas são

demonstrando que a radiação induz degradação. A avaliação econômica desse processo, estabelece um alto custo de irradiação para a indústria brasileira, estimado em 0,42 US\$/kg, quando é comparado com os custos de outros países que já estão utilizando esse processo para vulcanizar o látex de borracha natural. Esses altos custos são influenciados principalmente pela baixa capacidade de irradiação, a nível de planta piloto e pelos custos de manutenção. Porém, quando o processo alternativo é comparado com o processo convencional na fabricação de luvas cirúrgicas, se torna econômico, porque o consumo de energia é menor. As opções comerciais estudadas neste trabalho, mostram que é mais atraente para um investidor montar uma usina de beneficiamento de látex com raios gama, do que investir em uma fábrica de luvas cirúrgicas com o irradiador.

SURGICAL GLOVES MANUFACTURE FROM THE VULCANIZED NATURAL RUBBER LATEX BY GAMMA RAYS

HUGO DAVID CHIRINOS COLLANTES

ABSTRACT

Surgical gloves were manufactured by immersion coagulant method from vulcanized natural rubber latex by gamma rays at dose of 10 kGy in the air, at room temperature, using the following sensitizer vulcanization An-B 3 phr / KOH 0.2 phr. The influence of the parameter in the thickness of the surgical gloves manufacture, studied through fractional factorial designs technic, can be resumed by empirical linear correlation: $y = 0.213 + 0.025 [\text{CaCl}_2] + 0.019 t$. The coagulant solution concentration and outlet time of irradiated latex mold dominates the deposition process of rubber particles on the molde surfaces. The manufactured surgical gloves got thickness less than 0.2 mm. The drying tests of rubber coagulated films from irradiated latex were made with free convection and forced convection. In the experimental conditions the rubber critical humidity was 0.161 for thickness less than 0.2 mm. It was also observed that it hat few superficial humidity on the rubber. The forced convection favours drying in the anti-critic period. However the air velocity is not an important parameter in the pos-critic period. This can also be seen by evaporation velocity value, of the 0.3976 kg/h.m^2 in forced convection and 0.2583 kg/h.m^2 in free convection in the critical point. Mechanical tests in the manufactured gloves show great tensile strenght of the 26.8 MPa proving they achieved the optimal crosslinking degree. When they are aging it decrease to 25.43 MPa indicating the good thermal resistance. However when the gloves are radiosterilized they don't support the total irradiation dose of 20 kGy showing the

radiation induces degradation. The economical evaluation for this process establishes the high irradiation cost for brazilian industry which is stimated in 0.42 US\$/kg when it is compared the costs of the other countries that are using this process to vulcanize the natural rubber latex. these high costs are mainly influenced by low irradiation capacity in the pilot plant and the maintenance costs. Nevertheless, when the alternative process is compared to convencional process, surgical gloves manufacturing becomes economic because the energy consumption is minor. The commercial options studied in this work show that it is more atractive for investor to build the irradiation latex facility by gamma rays than to build the surgical gloves factory containing the irradiation.

LISTA DE ABREVIATURAS

A : Área de secagem, cm^2 .

An-B : Acrilato de normal butila.

AR : Alongamento na ruptura.

ASTM : Association Standard Technical Measure.

BS : Borracha seca.

CCl_4 : Tetracloreto de carbono.

CP : Corpos de prova.

Col : Comprimento inicial, mm.

CoF : Comprimento final, mm.

COM : Representa o valor da propriedade mecânica com envelhecimento.

CT : Custos totais, US\$.

CV : Custos variáveis, US\$.

CF : Custos fixos, US\$.

DP : Deformação permanente, %.

DV : Dose de vulcanização, kGy.

DE : Dose de esterilização, kGy

$dX/d\theta$: taxa de evaporação, minutos^{-1} .

EMBRARAD : Empresa Brasileira de Radiações S. A.

E : Espessura do corpo de prova, mm.

ET : Entradas totais, US\$.

F : Fator de eficiência da fonte.

f : Força necessária para romper o corpo de prova, kgf.

G_{radical} : Número de radicais formados por 100 eV de energia absorvida.

HPt-B : Hidroperóxido de t-butila.

I : Identidade do planejamento fatorial fracionado.

IAEA : International Atomic Energy Agency.

IPT : Instituto de pesquisas tecnológicas.

IC : Investimento de capital, US\$.

JAERI : Japan Atomic Energy Research Institute.

k : número de fatores ou variáveis.

L : Lucro, US\$.

LS : Largura da seção do corpo de prova, mm.

M : Módulo a 500%, MPa.

m : Coeficiente angular.

N : Número total de ensaios.

phr : Per hundred rubber.

PE : Ponto de equilíbrio, toneladas.

P : Custo anual, US\$.

p : Número de geradores independentes.

Q_i : Capacidade de irradiação, kg/h.

RT : Resistência à tração na ruptura, MPa.

RS : Radiosensibilizador.

RA : Rasgo angular, kgf/cm^2 .

S : Peso seco do filme de borracha.

ST : Sólidos totais.

SEM : Representa o valor da propriedade mecânica sem envelhecimento.

TRC : Tempo de retorno do capital.

T : Horas anuais.

TD : Taxa de dose, kGy/h.

w : Velocidade de evaporação da água, kg/h.m^2 .

w_m : Média logarítmica das velocidades de evaporação.

W_{60C0} : Atividade da fonte, Ci.

w_1 : Velocidade de evaporação no ponto inicial, kg/h.m².

w_2 : Velocidade de evaporação no ponto final, kg/h.m².

X : Umidade da borracha, kg de água/kg de materia seca.

X_1 : Umidade no ponto inicial, kg de água/kg de materia seca.

X_2 : Umidade no ponto final, kg de água/kg de materia seca.

X^* : Umidade de equilíbrio da borracha, kg de água/kg de materia seca.

X_c : Umidade crítica, kg de água/kg de materia seca.

y : Valores da espessura, mm.

\bar{y} : Média da espessura, mm.

\hat{y} : Valor estimado da espessura, mm.

θ : Tempo de secagem, minutos.

LISTA DE FIGURAS

1	Seção diagramática da centrífuga laval.....	10
2	Fabricação de artefatos pelo método de imersão, a partir de látex vulcanizado com enxofre.....	16
3	Fabricação de artefatos pelo método de imersão, a partir de látex vulcanizado com radiação ionizante.....	16
4	Planta piloto: esquema do sistema de vulcanização do látex induzida com raios gama.....	18
5	Coeficiente de atenuação atômica para água.....	21
6	Sistema mecânico de imersão.....	47
7	Gráfico de probabilidade normal dos efeitos estimados ($\sigma = 0,035$).....	62
8	Variação da espessura.....	66
9	Curvas de umidade-tempo para o filme de borracha.....	67
10	Taxa de evaporação da umidade da borracha.....	70
11	Representação mono-logarítmica da secagem no período pós-crítico...	72
12	Arranjo típico de uma fonte de ^{60}Co	79
13	Ponto de equilíbrio para as opções comerciais A e C.....	99

LISTA DE TABELAS

1	Consumo mundial de látex concentrado, em 1992.....	2
2	Consumo mundial da indústria de artefatos fabricados pelo processo de imersão, em 1992.....	3
3	Composição do látex.....	7
4	Propriedades físicas do látex concentrado.....	11
5	Velocidades de evaporação da água sobre diversos materiais a condições constantes.....	27
6	Formulação do látex.....	33
7	Composição da emulsão do An-B.....	34
8	Desenho do planejamento fatorial fracionado, 2^{5-1} , apresentados na ordem padrão.....	41
9	Exemplo de interações equivalentes no planejamento 2^{5-1}	43
10	Esquema de interações equivalentes para o desenho fatorial fracionado 2^{5-1} onde a relação de definição é: I = ABCDE.....	44
11	Faixa de variação dos parâmetros.....	51
12	Espessura das luvas cirúrgicas. Experimentos executados em ordem aleatória.....	59
13	O planejamento fatorial fracionado, 2^{5-1}_V	60
14	Matrix para obtenção dos efeitos no planejamento fatorial fracionado, 2^{5-1}_V	61
15	Estimativa dos efeitos.....	61
16	Coeficientes de regressão para um modelo linear.....	64
17	Dados de umidade-tempo para convecção livre.....	68
18	Dados de umidade-tempo para convecção forçada.....	69
19	Propriedades mecânicas das luvas esterilizadas.....	73
20	Propriedades mecânicas das luvas esterilizadas e envelhecidas.....	74

21	Estimativa de investimento de capital da fábrica de luvas que utiliza o processo alternativo de vulcanização (US\$).....	89
22	Custo de irradiação do látex com raios gama (US\$/ano).....	91
23	Custos de irradiação do látex de borracha natural a nível mundial (US\$/kg).....	92
24	Consumo anual dos reagentes químicos.....	93
25	Custos de fabricação de luvas cirúrgicas pelo processo alternativo de vulcanização (US\$/ano).....	94
26	Custos de fabricação de luvas cirúrgicas pelo processo térmico convencional (US\$/ano).....	94
27	Comparação dos custos de fabricação de luvas cirúrgicas entre os dois processos de vulcanização (US\$/dia).....	95
28	Resumo do Investimento de capital para cada opção (US\$).....	96
29	Estimativa dos CF e CV para todas as opções comerciais estudadas (US\$/ano).....	97
30	Receita das opções comerciais.....	98
31	Comparação das opções comerciais estudadas.....	102

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Há apenas um único tipo de borracha, obtida de fontes naturais e renováveis, disponível em quantidades comerciais. É a borracha natural, produzida por seringueiras do gênero *Hevea* e da espécie *brasiliensis*. A borracha natural é um elastômero, cujo termo foi criado por Fisher e é definida pela norma ASTM D 7566-78 como: "Um material capaz de recuperar-se rápida e energeticamente de grandes deformações..". É caracterizada como um macropolímero unidimensional do isopreno, 1,4 cis-poliisopreno, com 100% de configuração cis [19]. Forma com as resinas e as substâncias protéicas da árvore uma dispersão coloidal, cuja fase contínua líquida é a água (65-70%) e a fase descontínua sólida é a borracha (30-35%) [36].

Após a sua extração, o látex pode ser coagulado e transformado em borracha seca, ou pode ser concentrado para fabricar principalmente luvas. O mercado internacional de borrachas, tem atualmente, cerca de 50 qualidades de borracha seca, que são divididas em dois grupos principais [4], de acordo com o sistema utilizado para a sua preparação. Pelos processos convencionais de coagulação obtém-se as folhas defumadas e crepes. Pelos novos processos de granulação obtém-se outros tipos de borracha seca, onde se pode aproveitar os coágulos das plantações. Cada um desses grupos é subdividido em vários tipos, conforme o tratamento a que foram submetidas as respectivas borrachas, a sua procedência e, cada tipo apresenta várias gradações, de acordo com a sua qualidade. Dentro do mercado nacional existem onze tipos, distribuídos em cinco classes diferenciadas segundo os processos de produção utilizados no beneficiamento [4]. As fábricas de pneus são os maiores consumidores de borracha seca natural.

Tanto no mercado nacional como no internacional existem 4 tipos de látices concentrados, a 60% de borracha seca, que estão diferenciados de acordo com o seu processo de concentração e sistema de preservação [4]. Há o

látex centrifugado ou cremado, que pode ser preservado com alto ou baixo teor de amônia. Os países asiáticos são os maiores produtores de látex. Produzem cerca de 3,5 milhões de toneladas por ano de látex, que representa aproximadamente 92% da produção mundial [32]. Em 1990, o Brasil produziu apenas 30.826 toneladas de látex (peso seco), entretanto o consumo foi de 124.134 toneladas [6]. 26% do consumo brasileiro é proveniente das seringueiras da Bahia, 17% de seringais do Acre [6], e 57% são provenientes de outros Estados e da Malásia. No Brasil, 83,1% do látex é transformado em pneus e o restante é consumido pela indústria de artefatos leves [6].

O látex concentrado e vulcanizado pode ser transformado em artefatos de interesse por 5 processos diferentes: imersão, derrame, revestimento, extrusão e espumante. O processo de imersão é o mais empregado. 70% da produção mundial de látex concentrado é transformado em artefatos obtidos por imersão (Tabela 1).

Tabela 1 - Consumo mundial de látex concentrado, em 1992 [33]

Produtos	Consumo	
	Toneladas	Porcentagem
Artefatos por imersão	417.000	70%
Adesivos	65.000	11%
Fios	57.000	9%
Tapetes	26.000	4%
Espuma	35.000	6%
Total	600.000	100%

Luvras (85%) e balões (10%) são os artefatos mais fabricados pelo processo de imersão (Tabela 2), que é empregado na fabricação de peças ocas.

Os artefatos fabricados a partir de látex concentrado, vulcanizado pelo processo convencional na presença de enxofre, quando incinerados, liberam gases tóxicos (SO_x , NO_x) e cinzas poluentes (ZnO), além de causarem irritações na pele quando em contato, porque o enxofre é citotóxico [26, 31]. Por isso, os pesquisadores asiáticos, liderados pelo Japão e sob a coordenação da

International Atomic Energy Agency (IAEA), estão desenvolvendo um processo alternativo de vulcanização do látex, induzido com radiação ionizante [43], na ausência de enxofre e calor, desde a década de 80. Este processo alternativo também consiste em promover a rede tridimensional entre as moléculas da borracha, através de radicais formados na interação da radiação ionizante com o látex [26]. Portanto, os artefatos fabricados não apresentam problemas de citotoxicidade e quando incinerados não causam problemas ambientais, além de melhorar as propriedades óticas, e a maciez. As propriedades mecânicas são semelhantes às dos fabricados pelo processo convencional [26].

Tabela 2 - Consumo mundial da indústria de artefatos fabricados pelo processo de imersão, em 1992 [33]

Artefato	Consumo	
	Toneladas	Porcentagem
Luvras para exame	177.000	42,0%
Luvras domésticas	140.000	34,0%
Luvras cirúrgicas	41.000	10,0%
Balões	41.000	10,0%
Preservativos	13.000	3,0%
Bexigas	1.800	0,4%
Cateteres	1.600	0,4%
Outros	2.000	0,5%
Total	417.000	100,0%

A dose de vulcanização (DV) é a dose de irradiação que corresponde a máxima resistência à tração na ruptura (RT). A DV para o látex é cerca de 200 kGy, o que torna o processo alternativo economicamente caro. Entretanto DV menores que 10 kGy torna este processo economicamente atrativo, quando a vulcanização é induzida com raios gama [17]. No Japão, por esse processo alternativo de vulcanização foram fabricadas luvas cirúrgicas e outros artefatos de uso médico, em plantas piloto.

Uma equipe de pesquisadores do IPEN/GE já investigou o melhor sistema de radiosensibilizador e a participação de cada componente na

vulcanização [39], a estabilidade do látex irradiado [8] e a vulcanização induzida tanto com raios gama [8, 39] como com feixe de elétrons [1]. Todos esses estudos em laboratório foram realizados em função das propriedades mecânicas de placas obtidas pelo método do derrame. A proposta deste trabalho, que é continuação desta linha de pesquisa, visa desenvolver a aplicação industrial desse processo alternativo, que apresenta vantagens sobre o convencional, relativas às propriedades dos artefatos, com repercussão na ecologia e na medicina e, relativas ao consumo energético.

Assim este trabalho se propõe a fabricar luvas cirúrgicas, a partir do látex de borracha natural vulcanizado com raios gama, pelo método de imersão com coagulante. Por isso o látex foi vulcanizado nas condições definidas pelos pesquisadores citados acima, mas a irradiação foi feita em uma fonte comercial, disponível na Empresa Brasileira de Radiações S.A. (EMBRARAD), que está instalada em Cotia / SP. Os parâmetros de processo que afetam a espessura da luva foram estudados e avaliados os respectivos graus de influência. As propriedades mecânicas das luvas, esterilizadas e não esterilizadas, envelhecidas e não envelhecidas foram comparadas com as luvas fabricadas pelo processo térmico convencional. As luvas não foram obtidas em laboratório, mas foram fabricadas nas instalações da fábrica Elias Fausto S.A., distante 60 km da cidade de Campinas / SP. Os custos de fabricação das luvas cirúrgicas para ambos os processos foram calculados considerando uma produção diária de 11.000 pares de luvas, que corresponde à produção real de uma das fábricas de médio porte, instalada no Estado de São Paulo.

Também foram realizadas as avaliações econômicas do processo alternativo para a fabricação de luvas cirúrgicas, considerando 4 opções comerciais, e os custos de fabricação foram comparados com os do processo convencional.

Espera-se com este trabalho proporcionar um outro processo alternativo de vulcanização do látex, que a indústria brasileira pode utilizar para produzir artefatos com melhores propriedades, principalmente os utilizados na área médica.

CAPÍTULO 2

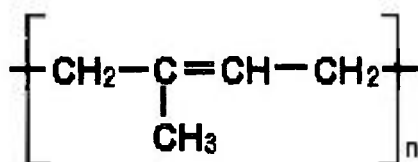
ASPECTOS GERAIS

Neste Capítulo se darão algumas noções sobre o látex que é a matéria prima deste trabalho; sobre a vulcanização do látex convencional e a induzida com radiação ionizante; sobre o processo de imersão, descrevendo os três tipos de imersão utilizados na indústria e quando são empregados.

2.1 - LÁTEX DE BORRACHA NATURAL

O látex de borracha natural é uma dispersão coloidal estável em um meio essencialmente aquoso. A fase descontínua (30 - 35%) é formada por partículas de borracha, que se encontram emaranhadas, constituídas essencialmente pelas cadeias poliméricas da molécula da borracha, que é o 1,4 cis-poliisopreno, conjuntamente com proteínas, resinas, lipídios, sais, etc. As partículas de borracha são de forma aproximadamente esférica e tamanho médio de 0,02 à 0,5 μ .

A molécula de borracha natural não é produzida na natureza pela polimerização do isopreno, mas sim, pela polimerização enzimática do isopentilpirofosfato [36]. A fórmula química molecular da borracha é:



1,4 cis-poliisopreno

onde $n = 1.500$.

A produção da borracha natural começa a partir da coleta do látex fresco, que é a metodologia utilizada para extraí-lo da árvore. Consiste da incisão no tronco da árvore e da sangria. O látex se encontra entre a casca, que é a camada protetora constituída de células de cortiça, e o cambio que é o responsável pela expansão radial do tronco. A sangria tem uma duração de 2 a 5 horas e deve ser feita, preferencialmente, de madrugada. O látex sangrado é recolhido em tigelinhas, e imediatamente é misturado com um agente preservante. Isto porque, o látex está sujeito à ação de bactérias, que encontram no soro do látex o elemento propício para sua multiplicação, provocando a sua desestabilização coloidal. Para evitar essa desestabilização ou a coacervação do látex, após a coleta, utiliza-se álcalis e bactericidas, como por exemplo: amônia (1,6% de NH_3 na fase líquida) ou KOH e, pentaclorofórmio de sódio (0,2%), respectivamente.

A estabilidade coloidal do látex está regida por quatro mecanismos que podem ser: eletrostático, estérico, solvatação e por exclusão. Nem sempre é possível identificar qual desses mecanismos são mais predominantes, embora os estudos realizados por W. Ostwald [48] demonstrem que a estabilidade coloidal do látex é influenciada principalmente pela estrutura eletrostática do meio. A coacervação do látex ocorre facilmente na presença de um eletrólito. Neste caso a coacervação dependerá basicamente do coeficiente de atividade do íon gerado pelo eletrólito e independerá do tipo do eletrólito.

A partícula de borracha está envolvida por uma película protéica de natureza anfotérica, conferindo-lhe cargas elétricas negativas quando o meio é alcalino ou levemente ácido e, cargas elétricas positivas quando o meio é ácido. A região interfacial de um látex, portanto, pode ser modificada, distinguindo-se 4 tipos de látex [4], que estão em concordância com o pH do soro e a carga elétrica da partícula.

T1 - Fase aquosa alcalina, e carga das partículas negativa: que é o látex preservado a álcali.

T2 - Fase aquosa alcalina, e carga das partículas positiva (positex): preparado pela adição de um excesso considerável de substância catiônica de amônio quaternário, a um látex do tipo T1.

T3 - Fase aquosa ácida, e carga das partículas positiva: preparado pela acidificação rápida de um látex do tipo T1, estabilizado por uma proteína.

T4 - Fase aquosa ácida, e carga de partícula negativa (negatex): obtido pela acidificação rápida de um látex do tipo T1, estabilizado por substância aniônica.

O látex tal como é obtido da árvore *Hevea brasilienses*, varia em composição, de acordo a idade da árvore, a estação do ano em que se realiza a colheita e a característica do solo. A Tabela 3 mostra as quantidades aproximadas de alguns constituintes:

Tabela 3 - Composição do látex [16]

Componentes	Porcentagens
Água	60,0%
Sólidos totais	40,0%
Acidos graxos e ésteres	01,0%
Quebracitol	1,6%
Sais inorgânicos	2,4%
Borracha seca	35,0%

Após a preservação o látex fresco é estocado em recipientes adequados com teor de sólidos totais entre 35 e 40% e concentrado, para valores acima de 60%. As razões da sua concentração são: é conveniente para a aplicação industrial, e diminui os custos de transporte.

Os processos de concentração conhecidos e que alguns ainda estão em utilização são os seguintes: evaporação, cremagem, centrifugação e eletrodecantação [4].

O processo de evaporação, pouco utilizado na indústria do látex concentrado, consiste na adição de sabões e álcalis, com a finalidade de evitar a aglomeração das partículas de borracha. Após este tratamento o látex é aquecido para evaporar substancialmente a fase aquosa. O processo exige agitação

mecânica, a fim de evitar a formação de uma película de borracha e da secagem do látex junto às paredes do recipiente. Existem vários tipos de evaporadores que se caracterizam pelo fundamento teórico em razão dos quais são desenhados. Pode-se fazer menção: dos evaporadores de tubos concêntricos verticais, dos evaporadores de tambor horizontal giratório e, dos evaporadores de pulverização do látex. O processo de evaporação apresenta a desvantagem de reter, no látex concentrado, todos os constituintes não borracha dissolvidos ou suspensos na fase aquosa do látex fresco, além dos estabilizadores não-voláteis adicionados, para evitar a coacervação irreversível durante a evaporação. Por isso, os látices concentrados pelo processo de evaporação são de uso bastante restrito.

Outro processo de concentração do látex é a cremagem cujo fundamento teórico se baseia na separação gravitacional das partículas de borracha, promovida por agentes de cremagem. Uma partícula de borracha suspensa no soro, está sujeita a ação de duas forças verticais opostas, uma é a de empuxo e a outra força é o próprio peso da partícula, cuja resultante é geralmente menor do que a força de repulsão entre as partículas. Esta força de repulsão está associada ao movimento Browniano, o que impede a separação das fases. O agente de cremagem envolve a partícula de borracha em uma bolha de ar, provocando uma diminuição do peso específico efetivo da partícula de borracha e, favorecendo o seu empuxo. O processo de cremagem é bastante seletivo, produzindo por sucessivas concentrações, um concentrado bastante puro, livre dos constituintes não-borracha do soro. Porém, no transporte e armazenamento, devido à presença de parte do agente de cremagem utilizado, o látex concentrado sofre uma pós-cremagem, que constitui uma das desvantagens deste processo. Também a cremagem é um processo lento, embora a velocidade de cremagem varie conforme as condições de processo.

O processo de centrifugação é o mais importante método de concentração, utilizado na indústria do látex concentrado. 88% da produção da Malásia, o que representa 500.000 toneladas de látex, são centrifugadas cada ano, por esse processo. Os 12% restantes são concentrados pelos processos de evaporação e por cremagem, em igual quantidade. O fundamento teórico da centrifugação é o mesmo que o do processo de cremagem, mas ao invés do campo gravitacional do processo de cremagem, é utilizado um campo centrífugo,

obtido através de uma centrífuga de alta rotação. Por isso, o processo de centrifugação é considerado um processo acelerado de cremagem. Na centrífuga laval (Figura 1), que é o tipo mais comumente usado, o látex é introduzido no cilindro giratório da centrífuga, de aproximadamente 70 cm de diâmetro e 120 cm de altura, e é submetido a forças centrífugas geradas pela velocidade de rotação que excede a 700 revoluções por minuto [11]. Desta forma separa-se o látex concentrado a 60% de borracha seca, do látex desnatado, que contém ainda 6% de borracha seca. O látex concentrado por este processo é mais puro do que o cremado. Só pelo processo de centrifugação, parte dos constituintes não borracha, que atuam como inibidores no processo de vulcanização induzido com radiação ionizante, são removidos, melhorando desta forma as propriedades mecânicas dos artefatos fabricados a partir dele. Mas foi observado também que, aumentando o número de vezes em que o látex passa pelo processo de centrifugação, decresce as propriedades mecânicas. Isto sugere que o látex não centrifugado possui em sua composição substâncias inibidoras e aceleradoras [29].

Victor Henri em 1907 descobriu que as partículas de borracha carregam cargas elétricas negativas e que submetido a um campo elétrico elas migram para o ânodo [24]. Isto foi o ponto de partida para o processo de eletro-decantação. O eletro-decantador consiste de uma cuba com dois eletrodos providos de duas membranas semipermeáveis, que confinam o látex. Quando uma corrente elétrica passa através do látex, gerada por uma diferença de potencial aplicada entre os eletrodos, as partículas de borracha migram em direção ao ânodo, produzindo uma camada concentrada na parte superior da cuba. A intervalos determinados, reverte-se a corrente para remover as partículas aderidas às membranas. O látex concentrado por este processo tem pureza comparável à do látex concentrado pelo processo de centrifugação.

Dependendo do processo utilizado para concentrar o látex obtem-se 4 tipos de látex (Tabela 4) [4], que estão em concordância com as normas ABNT EB-226-68 e ASTM D 1076-77, que são:

A1 - Látex centrifugado preservado com amônia, ou formaldeído seguido de amônia;

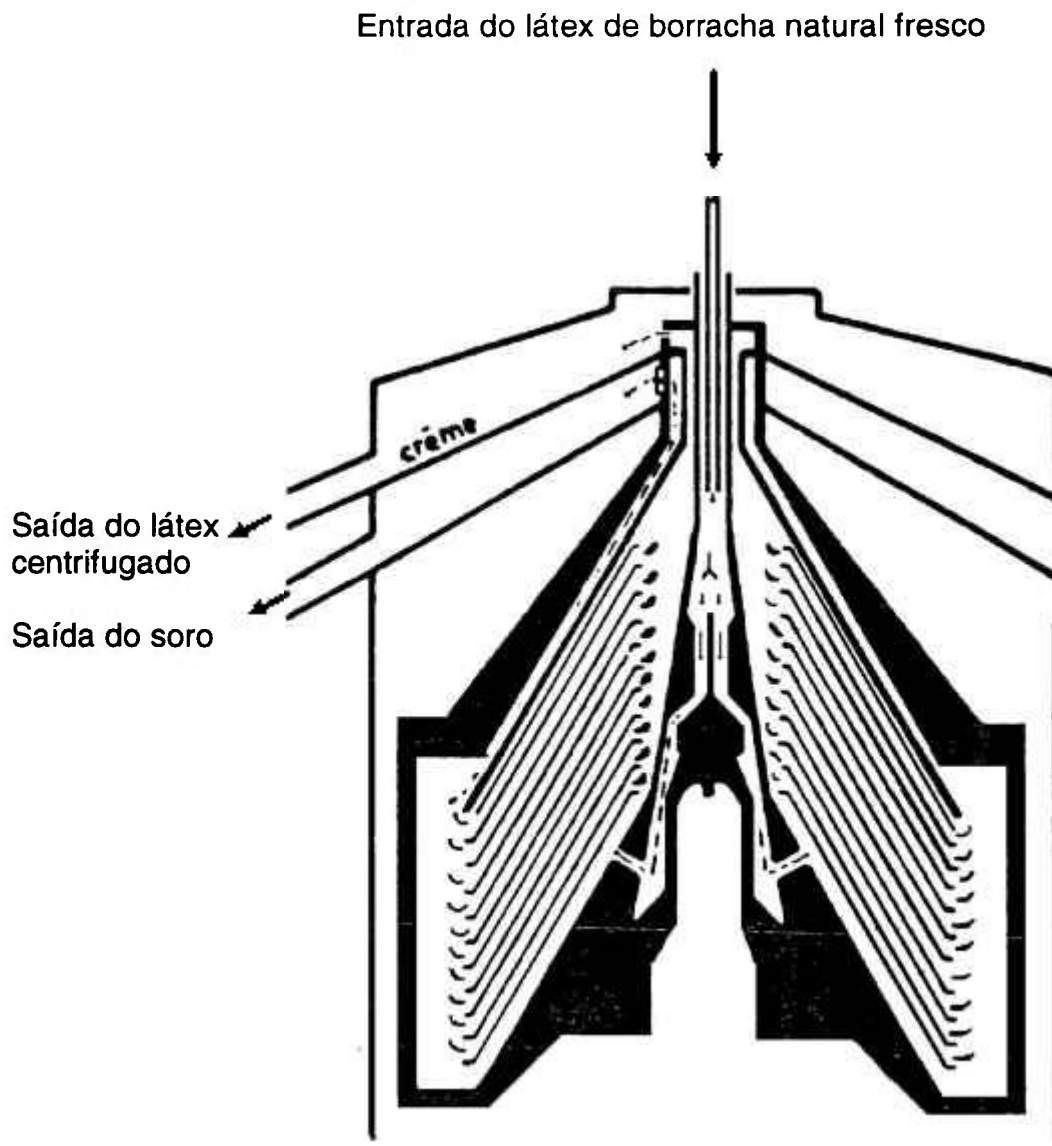


Figura 1 - Seção diagramática da centrífuga laval

A2 - Látex cremado preservado com amônia, ou formaldeído seguido de amônia;

A3 - Látex centrifugado preservado com baixo teor de amônia e outros preservativos necessários;

A4 - Látex cremado preservado com baixo teor de amônia e outros preservativos necessários.

Com o látex comercial, concentrado a 60%, pode-se fabricar artefatos como luvas, balões, bexigas, preservativos, cateteres, brinquedos, etc, somente se o látex for vulcanizado, o que permite a obtenção de qualidades indispensáveis na borracha natural.

Tabela 4 - Propriedades físicas do látex concentrado [4]

Propriedades		Tipo de látex			
		A1	A2	A3	A4
Sólidos totais (ST), %	máx ¹	61,5	61,5	64	64
Borracha seca (BS), %	mín ²	60	60	62	62
Diferença entre ST e BS, %	máx	2	2	2	2
Borra, %	máx	0,10	0,10	0,10	0,10
Coágulo, %	máx	0,05	0,05	0,05	0,05
Viscosidade, cps	mín/máx	60/180	60/180	60/180	60/180
Estabilidade mecânica, s	mín	540	540	540	540
Estabilidade mecânica, s	máx	1600	1600	1600	1600
Alcalinidade em % NH ₃ na fase aquosa, mín		1,6	-	1,6	-
Índice de KOH,	máx	0,80	0,80	0,80	0,80
Índices de ácidos gordurosos voláteis, máx		0,03	0,03	0,03	0,03
Cobre, %	máx/ST	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Manganês, %	máx/ST	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008

¹ Máximo

² Mínimo

2.2 - VULCANIZAÇÃO DO LÁTEX DE BORRACHA NATURAL

Para a obtenção de artefatos de borracha com propriedades que encontrem aplicações industriais, é necessário transformar as propriedades

plásticas da borracha em elásticas. O processo que promove esta transformação é denominada de vulcanização porque exige calor. O processo de vulcanização, de uma maneira genérica, é um processo que consiste em promover ligações intermoleculares, ou seja, ligações cruzadas entre as moléculas poliméricas, de forma tridimensional. Esse processo permite grandes transformações nas propriedades do produto acabado como: diminuição da solubilidade, aumento da resistência à tração na ruptura, maior resistência a ácidos e álcalis, diminuição da elongação, etc. [4, 7, 42]. É mundialmente empregada e conhecida como: "processo térmico de vulcanização". Essa vulcanização convencional que ocorre na presença de calor e enxofre, foi descoberta por Charles Goodyear em 1839 [4].

A vulcanização se faz aquecendo a borracha entre 130 - 150^oC, misturada com 7-10% de enxofre [48]. A reação que acontece durante a vulcanização traz como consequência a fixação do enxofre nas duplas ligações das cadeias poliisoprênicas, formando pontes de enxofre que comunicam à borracha uma estrutura tridimensional [4, 7].

Na indústria da borracha, a vulcanização é realizada pelo calor na presença de agentes de vulcanização [4], que são substâncias que promovem a reticulação entre as cadeias com maior eficiência. O enxofre na forma rômica é o agente de vulcanização mais empregado na vulcanização de elastômeros insaturados, por ser o mais barato. Quando se quer melhorar a resistência ao envelhecimento, utiliza-se compostos sulfurados, conhecidos também como agentes de vulcanização doadores de enxofre, os quais ao se decomporem em determinadas temperaturas, liberam o enxofre que promove a reticulação, através de pontes de átomos de enxofre.

A reação de vulcanização com enxofre é uma reação muito lenta. Foi Oenslager, em 1904, quem diminuiu drasticamente esse tempo de vulcanização, utilizando aminas orgânicas como catalizadores ou aceleradores [36]. Também são utilizados outros agentes auxiliares de vulcanização, com funções específicas no processo e com o objetivo de proporcionar qualidades desejáveis ao produto acabado, como antioxidantes, pigmentos, odorantes, desmoldantes, agentes igníficos, etc.

Atualmente a fabricação de artefatos de borracha natural é feita a partir de látex e de borracha seca vulcanizados pelo processo térmico convencional, único até agora empregado mundialmente. Embora sejam utilizados no processamento, tanto para o látex quanto para a borracha seca, os mesmos reagentes de vulcanização e, os produtos elaborados apresentam as mesmas propriedades elásticas desejáveis, os processos tecnológicos envolvidos na fabricação requerem operações unitárias diferentes, na qual estão incluídas as seguintes operações básicas: moagem, mistura, transferência de massa e calor. Isto porque, o látex é uma mistura de um sólido (partículas de borracha) com um líquido (soro, composto em sua maioria por água), chamado de dispersão. A fase descontínua é sólida e a fase contínua é líquida. Portanto, o látex na sua composição tem duas fases de estado. Assim, por exemplo, para misturar os reagentes de vulcanização ao látex, os de natureza sólida são previamente pulverizados em um moinho de bolas e adicionados na forma de dispersão. Os de natureza oleosa sob a forma de emulsão, seguido de uma vigorosa agitação com agitadores mecânicos, cuja velocidade é superior a 80 rpm, porque assim requer o estado predominante do látex. Entretanto, a borracha seca tem uma única fase sólida. A operação de mistura da borracha seca é de sólido-sólido necessitando de maquinária pesada para sua execução. A operação de mistura na borracha seca é chamada de mastigação. Foi descoberta por Hancock em 1819 e consiste de uma máquina, de grande volume, composta de cilindros de aço chamada de "bambury" [7], por onde passam as mantas de borracha seca, que são misturadas com os agentes de vulcanização na forma de pó.

Na fabricação de artefatos a partir de látex e da borracha seca, pode-se destacar o seguinte: para processar o látex não se requer de maquinária pesada quando comparada com a maquinária pesada que se requer para processar a borracha seca. Essa maquinária pesada é de alto custo e requer grandes quantidades de energia. Estudos demonstram que a etapa de mastigação da borracha prejudica a sua resistência ao envelhecimento, o que não ocorre com os artefatos fabricados a partir do látex, que apresentam maior qualidade. Por outro lado, há dificuldade em secar os artefatos fabricados a partir do látex, devido à baixa condutividade térmica da borracha e a elevada quantidade de

água a ser removida. Limita-se o seu uso para a produção de artefatos de menor espessura, até cerca de 1 mm.

Os artefatos obtidos a partir da borracha seca apresentam espessuras maiores que 1 cm, dentre os quais, destacam-se: pneus, copos de borracha para freios hidráulicos, retentores, anéis de vedação, correias de transmissão, correias transportadoras e mangueiras [4]. Dos artefatos produzidos a partir do látex destacam-se: luvas para examinar, luvas cirúrgicas, luvas domésticas, balões, preservativos, bexigas e cateteres [25].

Embora o processo térmico convencional de vulcanização do látex na presença de enxofre é mais utilizado na indústria, traz sérios problemas ambientais e toxicológicos. Por isso, desde a década de 80 um processo alternativo de vulcanização, com vantagens econômicas e produzindo artefatos com melhores qualidades, vem sendo desenvolvido. Esse processo alternativo é a reticulação do látex induzida com radiação ionizante, que ocorre à temperatura ambiente [25].

Na década de 60 muitas pesquisas de laboratório, que envolviam a reticulação do látex de borracha natural e da borracha seca foram realizadas na Inglaterra, na antiga Rússia e em outros países [43]. Entretanto na década de 70 o interesse por esse processo decresceu significativamente devido a inviabilidade econômica e a baixa qualidade dos artefatos obtidos. Em 1982, foi implantado pela IAEA um projeto de cooperação técnica para o desenvolvimento desse processo, a vulcanização do látex induzida com radiação ionizante, na Ásia, com a liderança do Japão. O Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), localizado na cidade de Takasaki recebeu cientistas da China, da Indonésia, da Malásia, de Sri Lanka, e da Tailândia para tornar esse processo competitivo com o convencional. Esses países desenvolveram esse projeto em três aspectos básicos [25]:

- a. melhorar a qualidade dos artefatos;
- b. desenvolver irradiadores mais baratos;
- c. desenvolver radiosensibilizadores ou agentes de vulcanização que promovam a diminuição da dose de vulcanização.

Esse processo alternativo apresenta vantagens do ponto de vista de propriedades, de produção e econômicas. Os artefatos fabricados apresentam as seguintes vantagens relacionadas com os aspectos ambientais, toxicológicos e médicos [26]:

- a. não contém S, ZnO e nitrosaminas, portanto, quando incinerados não produzem poluentes atmosféricos;
- b. baixa citotoxicidade. Por isso encontram aplicações na fabricação de suprimentos médicos, artefatos que estarão em contato com alimentos e, brinquedos que poderão ser levados à boca;
- c. maior transparência (98% contra 75% pelo processo convencional);
- d. maior maciez.

Por isso encontram muitas aplicações médicas, como balões óticos a laser, drenos, luvas, cateteres, etc.

Do ponto de vista de produção as vantagens são as seguintes: o látex irradiado apresenta maior estabilidade química, menor consumo de produtos químicos durante o processo de vulcanização, o processo é mais simples e por isso oferece melhores condições de controle. Enquanto no processo alternativo a vulcanização ocorre em uma única etapa à temperatura ambiente, no processo convencional há duas etapas de vulcanização: a pré-vulcanização e a pós-vulcanização, que se apresentam durante a técnica de fabricação dos artefatos, as quais envolvem maior consumo de energia. Portanto, o processo alternativo é mais simples e consome menos energia do que o processo térmico convencional. As Figuras 2 e 3 mostram os diagramas de bloco para os dois processos, de fabricação de artefatos pelo método de imersão.

O objetivo de tornar esse processo competitivo com o convencional foi atingido, porque se diminuiu a DV de 200 kGy [17] para 8 kGy [2], com a adição de radiosensibilizadores (RS) adequados, os quais aumentam a densidade de radicais, devido ao alto valor de G_{radical} (número de radicais formados por 100 eV de energia absorvida). Também o RS mantém a estabilidade coloidal do látex e as propriedades dos artefatos [2, 49].

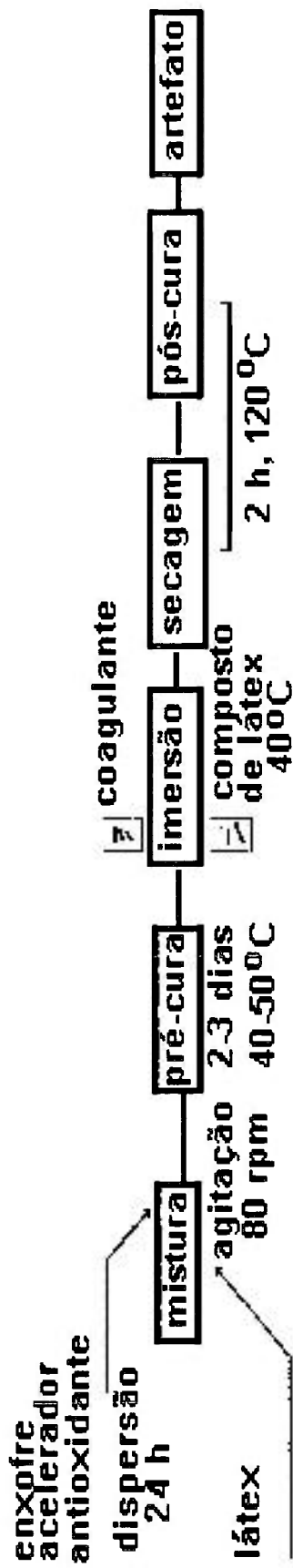


Figura 2 - Fabricação de artefatos pelo método de imersão, a partir de látex vulcanizado com enxofre

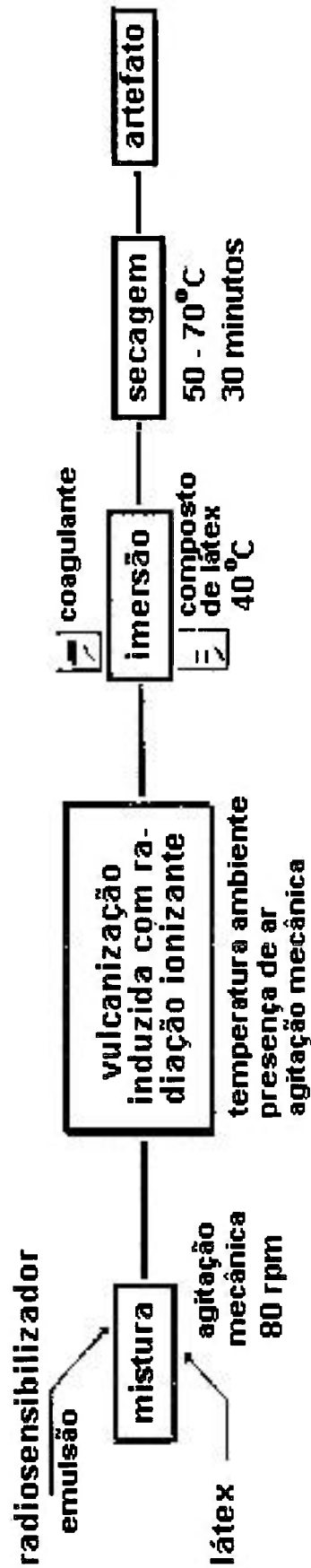
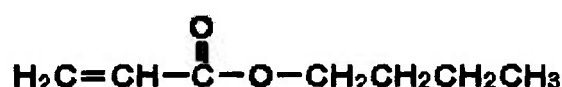


Figura 3 - Fabricação de artefatos pelo método de imersão, a partir de látex vulcanizado com radiação ionizante

Um dos primeiros RS estudados por Devendra e Makuuchi [17] foi o tetracloreto de carbono (CCl_4), porque o G_{radical} é igual a 70, enquanto que para o clorofórmio é 59,5, para o 1,2 dicloreto de etano é 41 e para a borracha natural seca é 0,5 [46]. A DV foi reduzida para 40 kGy. Os monômeros acrílicos monofuncionais, recomendados para a utilização em artefatos de borracha, reduziu a DV para cerca de 10 kGy. Dentre os monômeros acrílicos estudados, o que apresentou maior eficiência na reticulação do látex foi o acrilato de normal butila (An-B) [49], cuja fórmula molecular é:



acrilato de n-butila

Como o An-B afeta a estabilidade coloidal do látex há necessidade da presença do KOH, que hidrolisa os lipídios formando micelas protetoras [39].

A adição de 3 phr (per hundred rubber) de An-B e 0,2 phr de KOH ao látex reduz a DV para 10 kGy com um ligeiro aumento da RT máxima [46]. Aroonvisoot e Makuuchi [2] reduziram a DV para 8 kGy adicionando apenas 0,1 phr de hidroperóxido de t-butila (HPt-B) ao An-B / KOH.

Em 1983, uma planta piloto para vulcanizar o látex de borracha natural com radiação gama, foi instalada no Centro de Aplicações de Isótopos e Radiação, em Jakarta / Indonésia [38]. A Figura 4 mostra os principais componentes que constituem o sistema de irradiação do látex, os quais serão descritos em seguida.

Na unidade de emulsificação (1) o RS que forma o sistema óleo / água, (O/A) é emulsionado com uma forte agitação mecânica, promovida por um agitador elétrico. A emulsão que sai de (1) e o látex, são transferidos para a unidade de mistura (2), onde a mistura é agitada lentamente por algumas horas. A mistura, amadurecida, é transferida para o reator de vulcanização (3), localizado na sala de irradiação (4), através de ar comprimido obtido do compressor (C2). A mistura é irradiada com raios gama proveniente de uma fonte

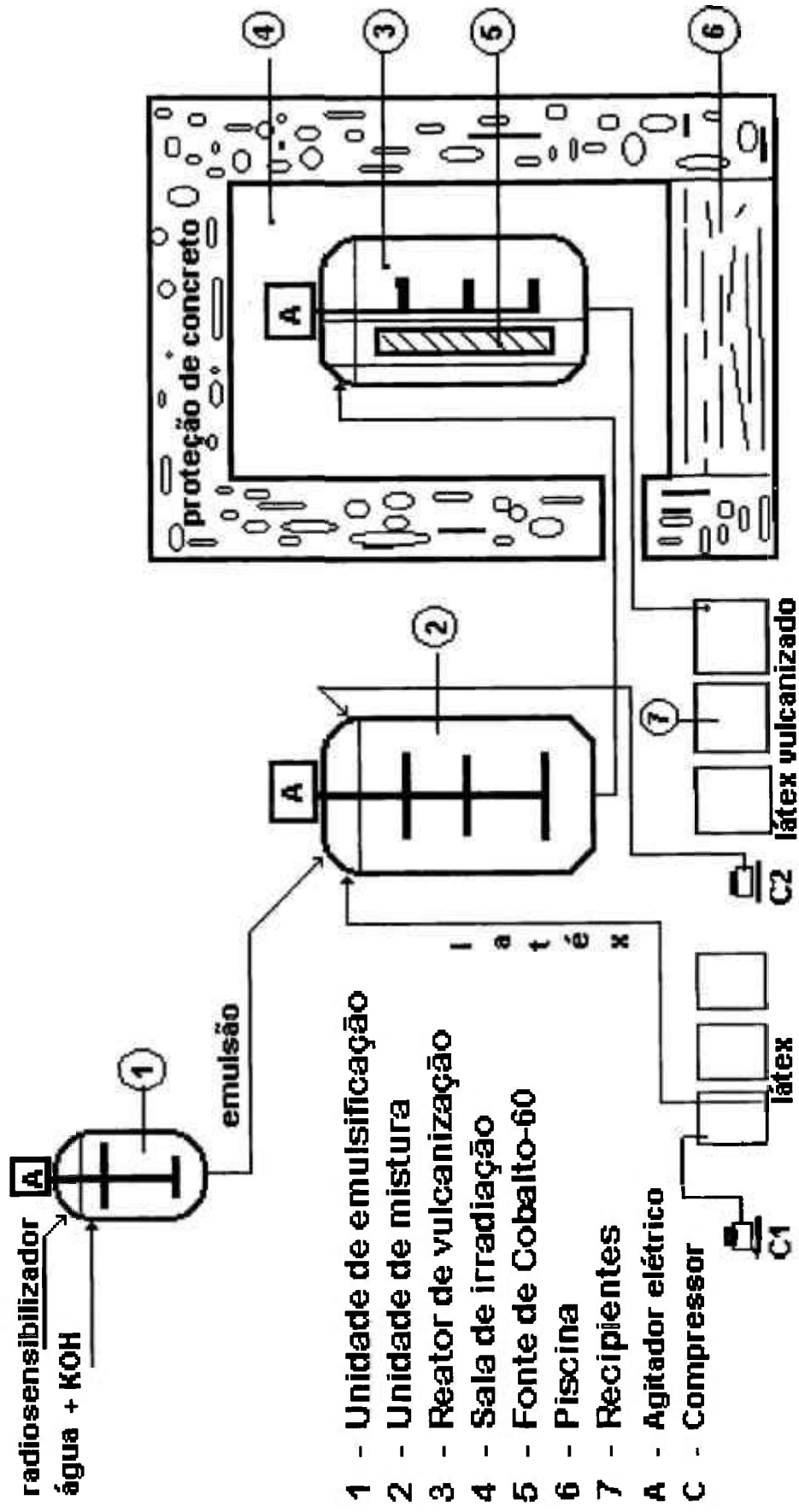
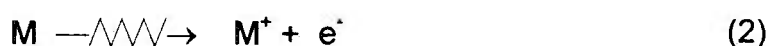


Figura 4 - Planta piloto: esquema do sistema de vulcanização do látex induzida com raios gama [38]

de ^{60}Co (5), que é acionada do fundo da piscina (6) por controles externos à sala de irradiação (4). O tempo de vulcanização requerido é de várias horas e depende de vários fatores, tais como: dose de irradiação, taxa de dose e, concentração e tipo do RS. Para se obter homogeneidade na dose absorvida, a mistura de látex é agitada lentamente durante a irradiação. Após o término da etapa de irradiação, a fonte de ^{60}Co é transferida para o fundo da piscina (6) e o látex irradiado é transferido, por gravidade, para recipientes adequados (7).

Entretanto o processo alternativo de vulcanização induzido com radiação ionizante só pode ser utilizado industrialmente para o látex, porque o G_{radical} da borracha seca é muito pequeno (0,5). Também não se conhece nenhum RS capaz de migrar pela estrutura da borracha sólida e formar radicais suficientes para diminuir a DV e tornar o processo econômico. Estes fatos tornam a radiação ionizante um agente pouco eficiente na vulcanização da borracha seca. No látex irradiado, embora as espécies radiolíticas provenientes da água favorecem a reticulação, há necessidade de se adicionar RS que tornam a radiação ionizante um agente de vulcanização tão eficiente como o enxofre [21].

Algumas reações químicas acontecem quando se fornece energia na forma de calor ou de diferença de pressão. A radiação quando interage com a matéria, transfere a energia que transporta, de forma parcial ou total, promovendo condições físico-químicas que favorecem o desenvolvimento de uma reação química. Existem dois processos importantes que são consequentes da transferência de energia da radiação para o meio. Um é a ionização, onde uma molécula ou átomo eletricamente neutro, converte-se em um par de íons de cargas contrárias, onde o ânion é sempre o elétron. Outro processo é a excitação, na qual o elétron absorve a energia e passa para um estado energético mais elevado, segundo as leis quânticas. Diz-se então, que a molécula poderá estar eletronicamente excitada, ou seja, se encontra em um estado intermediário entre o fundamental e o de ionização. As equações que representam as reações de excitação (1) e ionização (2) de uma molécula M são:



A primeira característica observada da radiação de alta energia foi a formação de íons, por isso foi denominada de radiação ionizante.

As radiações ionizantes podem ser classificadas, conforme suas propriedades de carga e massa, da seguinte forma:

1- **Com massa:**

- a. partículas carregadas pesadas (α , d , p , t) e leves (β^- , e^-).
- b. Partículas sem carga (n).
- c. Fragmentos de fissão.

2- **Sem massa, Radiações eletromagnéticas (γ , X).**

As partículas com carga interagem com a eletrosfera do átomo através de interações coulombicas, provocando ionização e excitação, conforme é a partícula incidente. As colisões com os elétrons podem ser inelástica ou elástica.

As partículas sem carga como os nêutrons, provenientes de um reator nuclear, não ionizam a matéria diretamente porque não possuem cargas. São os produtos dessa interação que promovem a ionização. Os neutrons interagem com os núcleos dos átomos provocando reações nucleares que são responsáveis pela emissão de partículas e radiações, tornando a matéria radioativa. Isso ocorre segundo as leis de conservação de massa e de energia. Os três tipos principais de interação são: captura, espalhamento elástico e inelástico. A energia do nêutron é o fator que determina o tipo de interação que ocorrerá.

As radiações eletromagnéticas, raios gama e raios X, transportam energia através dos fótons. Quando os fótons interagem com a matéria perdem a energia por 3 processos principais conforme a sua energia (Figura 5): o efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton e a produção de pares. No efeito fotoelétrico, o fóton incidente de baixa energia ($E < 0,5$ MeV) colide com um elétron e transfere toda a sua energia. O elétron é ejetado do átomo, com uma energia igual à diferença da energia do fóton e a energia do elétron no átomo. O espalhamento Compton, ocorre quando um fóton interage com um elétron, de forma que o elétron adquire energia e é criado um outro fóton com energia menor que o incidente. A trajetória desse fóton também é diferente da do incidente. Esta interação predomina entre 1 e 5 MeV. A produção de pares, envolve a absorção

completa de um fóton na vizinhança de um núcleo atômico, com a formação de duas partículas, o elétron e o pósitron. A energia necessária para a formação dessas partículas é de 1,02 MeV. Por isso esse efeito ocorre somente com fótons cuja energia é maior que 1,02 MeV. O par, elétron e pósitron, adquire maior ou menor energia cinética conforme é a diferença entre a energia do fóton e 1,02 MeV.

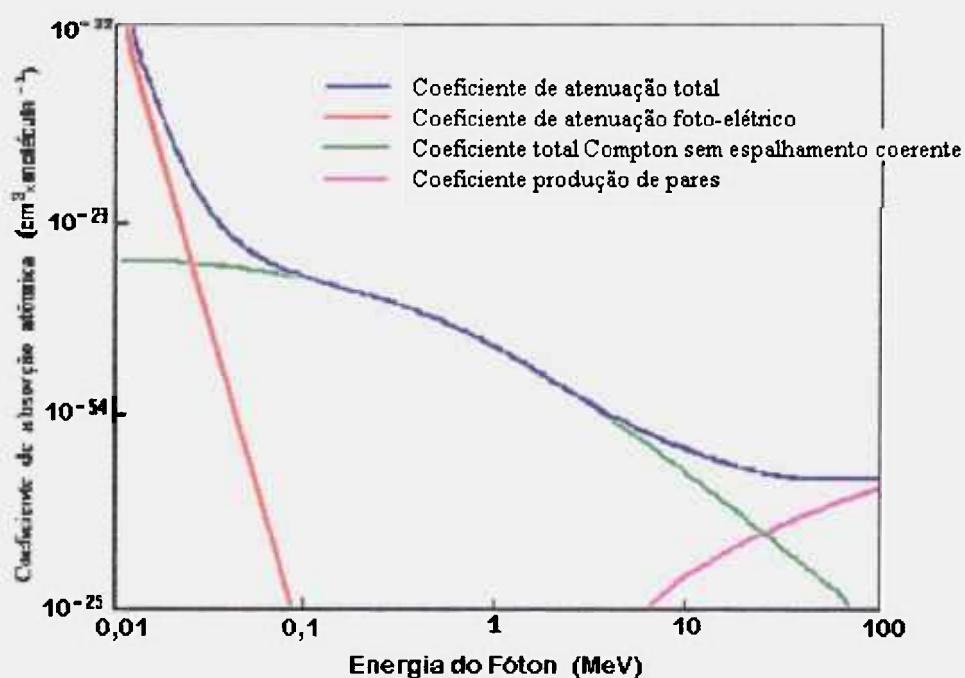
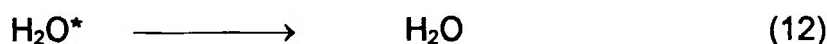
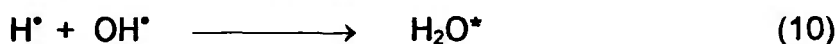
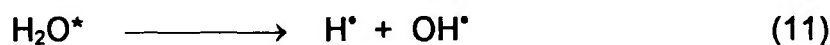
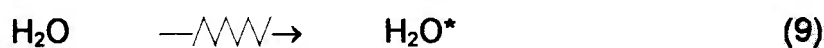


Figura 5 - Coeficiente de atenuação atômica para água [40]

Nem todos os fótons interagem com a matéria. O coeficiente de atenuação indica a fração dos fótons incidentes, liberados pela fonte de energia, que são absorvidos por unidade de espessura do material. Esse coeficiente é constante para um determinado material e para um determinado valor de energia da radiação. O coeficiente de atenuação total é a somatória dos coeficientes de atenuação para cada tipo de interação ou atenuação. A Figura 5 mostra a variação do coeficiente de atenuação atômico parcial e total, em função da energia do fóton, para a água [40]. Materiais com densidades em torno de 1 g/cm^3 apresentam o mesmo comportamento, como por exemplo o látex de borracha natural cuja densidade é em torno de $0,95 \text{ g/cm}^3$.



Os radicais são formados dentro da partícula de borracha dispersa na água, provenientes de moléculas orgânicas (reações 4 e 5), ou são formadas na fase dispersa, como consequência da radiólise da água (reação 8 e 11) [42].



Fótons e elétrons provenientes da radiação ionizante, podem arrancar um elétron da molécula de água, ionizando-a (reação 8). As moléculas excitadas de água, $\text{H}_2\text{O}^{\bullet}$, formadas pela interação direta da radiação ionizante (reação 9) ou pela recombinação de radicais com alta energia (reação 10), podem perder o excesso de energia através de mecanismos vibracionais internos, transferindo-o para outras moléculas (reação 12). Podem também sofrer cisões homolíticas (reação 11) com a formação de radicais. Esses radicais possuem energia cinética suficiente para migrar, penetrar na partícula de borracha, colidir e arrancar outros átomos de H formando radicais poliméricos (reação 6) [20].

Durante a radiólise do látex a cadeia carbônica das moléculas poliméricas são rompidas (reação 5) mas, a reticulação (reações 13-15) ocorre em maior grau transformando as propriedades plásticas em elásticas.



2.3 - PROCESSO DE IMERSÃO

Dentre os cinco processos de fabricação de artefatos, a partir do látex concentrado e vulcanizado, o de imersão é o mais empregado.

O processo de imersão é industrialmente empregado na fabricação de peças ocas e é considerado um processo simples e prático. Requer poucos componentes para operar: moldes, recipientes para conter os compostos e um forno de secagem, com circulação interna de ar. Os moldes podem ser de porcelana não esmaltada, vidro ou alumínio. Os moldes são imersos no látex irradiado, retirados encharcado com látex e, após a secagem, forma-se uma fina película de borracha vulcanizada que toma o formato do molde. Na indústria da borracha há três processos de imersão utilizados: o processo de imersão contínuo, o processo de imersão com coagulante e o processo imersão a quente [46].

No processo de imersão contínuo, um molde limpo e seco é imerso no látex e após um certo tempo é retirado lentamente. O filme de borracha pode ser seco ou pode-se aumentar a espessura do filme, com uma segunda imersão no látex, após uma secagem parcial do primeiro filme de borracha formado. O primeiro depósito de borracha não deve estar muito seco, o que facilita a união entre os dois depósitos. Este processo pode repetir-se um certo número de vezes até dar ao filme a espessura desejada. A espessura do filme de borracha, obtida de contínuas imersões, depende do conteúdo de sólidos totais e da viscosidade do látex irradiado [46]. Em geral, são fabricados por este processo artefatos pouco espessos, da ordem de 0,05 mm, como por exemplo preservativos.

Entretanto, o processo de imersão com coagulante, permite obter artefatos mais espessos, 0,2 - 0,8 mm, em uma única imersão. Um molde limpo e seco é imerso em uma solução coagulante com o tempo de imersão controlado. A solução coagulante é constituída de álcool e um sal de um cátion di ou trivalente, como $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ e CaCl_2 , de compostos orgânicos como ácido fórmico, acetona, etc. Após a retirada do molde da solução coagulante e seco totalmente, formando um filme uniforme de coagulante depositado sobre a sua superfície. Em seguida é imerso no composto do látex irradiado, controlando-se também o tempo de

imersão. O depósito de gel ou borracha coagulada formado é seco à temperatura e tempo controlados. A espessura do filme pode ser aumentada da mesma forma que no processo de imersão contínuo, através da secagem parcial do primeiro depósito de borracha, seguida da nova imersão na solução coagulante e no látex vulcanizado. A espessura do depósito obtido depende da natureza e da concentração da solução coagulante, do tempo de imersão, do conteúdo de sólidos totais no composto de látex e, em menor importância da sua viscosidade [46]. Luvas cirúrgicas, para exame e domésticas, e bexigas são exemplos de artefatos fabricados por esse processo.

O processo de imersão a quente é utilizado para fabricar artefatos espessos com apenas uma única imersão. O molde é aquecido a uma temperatura de 50 °C e imerso por um determinado tempo no látex irradiado. Este processo apresenta uma desvantagem que é a de aquecer o látex, como consequência de inúmeras introduções dos moldes quentes em uma linha de produção contínua em grande escala. Neste caso é preciso refrigerar o tanque de látex para impedir sua coagulação.

Dentre esse três processos de imersão descritos, o de imersão com coagulante, apresenta um melhor desempenho, porque os artefatos têm uma maior RT, devido a uma maior adesão das partículas de borracha e não do aumento da densidade de reticulação [46].

2.4 - TEORIA DE SECAGEM

No processo alternativo de vulcanização do látex por radiação ionizante, o látex após irradiado à temperatura ambiente, está já vulcanizado [25]. Uma característica importante desse processo, é que, o látex após a vulcanização não muda sua condição de estado líquido, sendo utilizado diretamente para a fabricação de artefatos pelo método de imersão. A partir destes fatos sugere-se então secar os artefatos de borracha fabricados pelo método de imersão com coagulante. Para determinar o tempo de secagem é necessário efetuar os ensaios de velocidade de secagem da borracha coagulada sobre a superfície do molde [23]. Esses ensaios se realizam em condições

constantes de secagem: as condições do ar, utilizado como meio de secagem, como a temperatura, umidade e velocidade, permaneceram constantes em função do tempo e variarão muito pouco na entrada e saída da estufa onde vão ser realizados os ensaios. A intervalos regulares de tempo determina-se por pesagem a umidade da borracha: a partir dos dados umidade-tempo deduz-se a curva de velocidade de secagem do material. Para que os dados obtidos tenham uma boa validade é necessário ter em conta uma série de cuidados encaminhados a lograr uma maior semelhança com as condições a escala industrial. Os cuidados mais importantes são os seguintes:

- O sistema de suporte na secagem deve ser o mesmo que o utilizado na indústria.
- Manter a mesma relação entre superfície exterior exposta e superfície não exposta a secagem.
- Manter as mesmas condições de fornecimento de calor.
- É conveniente fazer ensaios com amostras de diferentes espessuras.

Em muitos ensaios de secagem podem ser identificados dois períodos importantes, que são: um com velocidade constante e outro com velocidade de secagem decrescente. Neste último período, onde a velocidade de secagem decresce, ela pode variar linearmente com a umidade do material [23].

Durante a secagem é necessário distinguir tanto a umidade que existe sobre a superfície do material quanto a umidade do interior dela. Quando a umidade total é suficientemente grande, a evaporação da água transcorre sobre a superfície totalmente molhada, o líquido renova-se continuamente por difusão rápida desde o interior até a superfície. Tem-se assim, um período onde a velocidade de secagem é constante, até um ponto onde ocorre uma significativa queda. Diz-se, então, que a velocidade de secagem atingiu o seu ponto crítico. A partir desse momento a velocidade de secagem decresce até atingir praticamente o valor zero, isto é, quando a umidade livre é nula, ou seja, quando as umidades, tanto do material quanto do ar, atingem o equilíbrio. Então a velocidade de secagem atingiu o ponto de equilíbrio que corresponde à umidade de equilíbrio (X^*) com o meio.

Em relação a esse ponto crítico, que corresponde também à umidade crítica (X_c) do material, pode-se explicar o mecanismo de secagem, em função de dois períodos. O período ante-crítico e o período pós-crítico. No período ante-crítico a velocidade é constante e permanecerá assim se a temperatura na superfície do material permanecerá constante e próxima do bulbo úmido do ar. Isto ocorre, se o material não recebe calor por outros meios. A literatura [34, 44] mostra os resultados dos estudos de secagem realizados em condições constantes, para diversos materiais, no período ante-crítico (Tabela 5). Pode-se observar que existe pouca diferença entre os valores de velocidade ante-crítico para esses materiais, e a velocidade de evaporação da água sobre uma superfície livre, que é de $2,7 \text{ kg/h.m}^2$.

Quando a umidade média do material é inferior a X_c , o mecanismo de difusão interna não consegue suprir líquido suficiente para a superfície. Portanto, a velocidade de evaporação diminui, e aparecem zonas secas sobre a superfície do material, cada vez em maior proporção. Transcorre então o primeiro período pós-crítico. Como não está saturada a superfície do material, a temperatura aumenta, e tende a aproximar-se da temperatura do bulbo seco do ar. Esse primeiro período pós-crítico pode variar linearmente com a umidade do material, dependendo das condições de secagem. Termina quando a superfície do sólido fica livre de líquido.

Tabela 5 - Velocidades de evaporação da água sobre diversos materiais a condições constantes [34, 44]

Materiais	w (kg/h.m ²)
Água	2,7
Pigmento branco	2,1
Limalhas de latão	2,4
Areia fina	2,0-2,4
Argilas	2,3-2,7

Durante o segundo período pós-crítico a velocidade de secagem continua diminuindo. Em alguns casos a evaporação ocorre em planos inferiores, que se afastam da superfície do sólido à medida que acontece a secagem. Neste

período, ocorre o transporte do líquido do interior do material para o plano de evaporação. Em seguida, ocorre a difusão do vapor deste plano para a superfície do material, e por último para o ar. Em outros casos a evaporação ocorre somente na superfície do material, e o líquido se transporta do interior pelos mecanismos de difusão normal, difusão capilar ou outros mecanismos mais complexos.

A determinação de X_c é que define a existência desses dois períodos, ante-crítico e pós-crítico. É característica de um determinado material, varia com as condições de secagem e também com a espessura do material. Aumenta ligeiramente com a temperatura e com a velocidade do ar. Aumenta também em maior ou menor proporção com a espessura do material.

A intervalos regulares de tempo determina-se por pesagem a umidade do material. A partir dos dados umidade-tempo obtém-se a velocidade de secagem, que é a perda de umidade (ΔX) na unidade de tempo ($\Delta \theta$), mais exatamente, pelo quociente diferencial ($dX/d\theta$). Define-se quantitativamente a velocidade de secagem como sendo a unidade de área de superfície de secagem, que é expressa assim [34, 44]:

$$w = \frac{S}{A} \left(- \frac{dX}{d\theta} \right) \quad (16)$$

onde, w é a velocidade de secagem, kg/h.m^2 ; S é o peso do sólido seco, kg ; A , é a área de superfície exposta, m^2 . Essas duas últimas grandezas permanecem constantes durante o ensaio de secagem.

A duração da secagem (θ) pode ser deduzida facilmente a partir da velocidade de secagem. Separando as variáveis da equação 16 e integrando entre as umidades inicial (X_1) e final (X_2), tem-se:

$$\theta = \frac{S}{A} \int_{X_2}^{X_1} dX / w \quad (17)$$

Para calcular a integral da equação 17 há necessidade de se considerar o período ante-crítico e os dois períodos pós-críticos. No período ante-crítico se w é constante, a equação 17 transforma-se em:

$$\theta = S (X_1 - X_2) / Aw_c \quad (18)$$

onde w_c representa a velocidade de secagem nesse período, kg/h.m^2 .

Porém, no período pós-crítico, para muitos casos de secagem, não se conhece a relação analítica simples entre w e X . A integração da equação 17 pode ser feita, então, pelo método gráfico. Quando a velocidade de secagem varia linearmente com a umidade é possível encontrar uma relação aproximada entre w e X . Assim, a integração da equação 17 nos leva a esta outra equação:

$$\theta = \frac{S (X_1 - X_2)}{A (w_1 - w_2)} \ln \frac{w_1}{w_2} = S (X_1 - X_2) / Aw_m \quad (19)$$

onde w_1 representa a velocidade de secagem para a umidade inicial X_1 ; w_2 representa a velocidade de secagem para a umidade final X_2 e w_m é a média logarítmica das duas velocidades.

A velocidade de secagem durante o período ante-crítico pode ser avaliada em função das condições de difusão e transmissão de calor na camada limite do ar. Admite-se que neste período a superfície do sólido está inteiramente recoberta por uma camada de líquido. Então, a evaporação depende somente da velocidade de difusão do vapor, ou da intensidade da transferência de calor através da camada limite do ar.

Durante o primeiro período pós-crítico a velocidade de secagem está regida pela evaporação da água sobre uma parte da superfície útil total. Esta fração diminui à medida que acontece a secagem, em concordância com o mecanismo padrão de difusão do líquido até a superfície. De qualquer forma, como já visto, pode-se assumir, que a velocidade de secagem varia linearmente com a umidade durante esse período.

Durante o segundo período pos-crítico a superfície está totalmente seca, de modo que a velocidade de secagem somente pode ser avaliada em função do processo de transporte da umidade, do interior do material até a superfície. Esse processo pode efetuar-se por diferentes mecanismos: difusão, fluxo capilar, fluxo devido a contrações, etc [34, 44].

O mecanismo de difusão do líquido é o responsável pelo transporte da umidade através dos materiais de estrutura contínua, tais como, sabão, cola, gelatina, argila, madeira, etc. As equações de difusão de líquidos através dos materiais de estrutura homogênea são análogos às de transmissão de calor com fluxo variável.

A difusão capilar ocorre em materiais de estrutura granular e porosa. O líquido desloca-se através dos interstícios em virtude de forças capilares, relacionadas com a tensão superficial. O fluxo capilar pode ser determinado quando se conhece a forma e as dimensões do capilar.

Em alguns casos ocorre o mecanismo de difusão do vapor. A umidade evapora em um plano inferior e difunde através dos interstícios. Particularmente ocorre quando o material é aquecido indiretamente, de modo que a superfície que recebe o calor está afastada daquela em que ocorre a evaporação.

Muitos dos materiais submetidos à secagem sofrem uma contração superficial quando são secos e, por isso, seus poros tendem a fechar. Esta contração, que em alguns casos impede a saída do líquido, pode provocar uma outra forma de expulsão do líquido para a superfície. As leis de transporte da umidade por esse mecanismo são desconhecidas.

CAPÍTULO 3

FABRICAÇÃO DE LUVAS CIRÚRGICAS

Neste Capítulo se abordarão os aspectos relacionados com a fabricação de luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante, a partir de látex de borracha natural vulcanizado com raios gama, na presença de 3 phr de An-B e 0,2 phr de KOH, com dose de 10 kGy. Em Materiais e Métodos serão descritos a parte experimental envolvida na vulcanização do látex, desde reagentes até a irradiação, a fabricação e a esterilização das luvas cirúrgicas, desde o método estatístico utilizado no planejamento dos ensaios, até as propriedades das luvas esterilizadas. Em Resultados e Discussão serão apresentados os resultados experimentais obtidos no estudo dos parâmetros de processo que influenciam a espessura da luva, o mecanismo de secagem e as propriedades das luvas esterilizadas e não esterilizadas, envelhecidas e não envelhecidas. Essas propriedades são comparadas com as das luvas cirúrgicas obtidas pelo processo térmico convencional, na Fábrica de Artefatos de Elias Fausto.

3.1 - MATERIAIS E MÉTODOS

A fabricação de luvas cirúrgicas envolve cerca de 200 L de látex formulado. A irradiação em fontes de ^{60}Co para pesquisa e o processamento em laboratório dessa quantidade é muito difícil. Por isso as irradiações foram realizadas em uma fonte comercial instalada na EMBRARAD, localizada em Cotia / SP e, a fabricação foi feita nas instalações da fábrica de luvas cirúrgicas Elias Fausto Ind. Com. LTDA, localizada na cidade de Elias Fausto / SP, distante 60 km da cidade de Campinas. Alguns ensaios foram realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), localizado na Cidade Universitária da USP/SP.

Neste item serão apresentadas as matérias primas e os métodos utilizados na etapa da vulcanização do látex com raios gama, da fabricação das luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante, da esterilização com raios gama, do envelhecimento e da avaliação das propriedades mecânicas.

3.1.1 - VULCANIZAÇÃO

A etapa de vulcanização do látex envolve uma formulação adequada e irradiação com raios gama.

Há parâmetros muito importantes nesta etapa os quais devem ser definidos, o RS, a concentração de cada componente do RS, a DV, para que a estabilidade coloidal não seja afetada e as propriedades das luvas cirúrgicas sejam as melhores. Todos esses parâmetros já foram definidos por pesquisadores internacionais [25] e brasileiros [1, 8, 39], os quais serão utilizados neste trabalho, a nível industrial.

3.1.1.1 - Reagentes

O látex de borracha natural, de grau comercial, foi uma mistura de látex, de diferentes procedências, da Win e da Johnson & Johnson, adquiridos em diferentes épocas, o qual foi homogeneizado por agitação mecânica, com um agitador provido de hélice, tipo turbina, de 30 cm de diâmetro. O látex resultante da mistura foi caracterizado conforme recomendado pela norma ASTM D 1076-09.01. Contém, 60,97% de sólidos totais e 58,97% em teor de borracha seca, sendo o pH de 10,08 medido à temperatura ambiente e a densidade da mistura foi de 0,98 g/cm³, determinada conforme recomenda a norma ASTM 1076-09.01.

O KOH, da Carlo Erba, de grau analítico, foi utilizado na forma de solução a 10% para estabilizar o látex. O An-B, doado pela Ciquine, de grau analítico, foi utilizado como radiosensibilizador, na forma de emulsão a 50%. O Irganox 1520, de grau analítico, doado pela Ciba Geiger, utilizado na forma de emulsão a 50% e o Wingstay L, também de grau analítico, doado pela Parabor, utilizado na forma de dispersão a 50%, foram utilizados como antioxidante. O

Emulwin doado pela Bayer, foi utilizado como emulsificante do tipo covalente para o preparo das emulsões de óleo em água (O/A). O nitrato de cálcio da Cetus, também de grau analítico, foi utilizado como agente coagulante para o látex. O talco de tamis 625, doado pela Itatex e o álcool a 98^o, de grau comercial, da Fraskum, foram utilizados para a formulação da solução coagulante com nitrato de cálcio. O cloreto de cálcio, utilizado também como agente coagulante, foi obtido industrialmente, fazendo reagir HCl, a 37%, da firma Del Nero Produtos Químicos Ltda, com CaCO₃ da Oxical, na forma de pó. Esses dois reagentes são de grau industrial.

3.1.1.2 - Formulação

Para ter uma quantidade total de 150 kg de látex formulado foi necessário utilizar um tambor de 200 L de capacidade e um agitador mecânico provido de hélice, tipo turbina, com 30 cm de diâmetro. Durante a formulação, o látex foi mantido sob agitação branda de 40 rpm para uma completa homogeneização, à temperatura ambiente.

Tabela 6 - Formulação do látex

Componentes	Peso (kg)
Látex	123,78
An-B (3 phr)	2,19
KOH a 10% (0,2 phr)	0,15
H ₂ O (50% de sólidos totais)	23,88
Látex formulado	150,00

Na formulação do látex, foi utilizado o seguinte sistema de vulcanização: 3 phr An-B / 0,2 phr KOH, que foi estudado por Souza [39], para vulcanizar o látex com raios gama. As quantidades dos componentes utilizados são apresentados na Tabela 6.

A metodologia seguida foi a desenvolvida por Canavel [8]. Segundo a prática recomendada por essa metodologia, o conteúdo de sólidos totais foi reduzido para 50%. Foi adicionado, 2/3 da solução de KOH a 10% ao látex, para aumentar a sua estabilidade química. Após 5 minutos foi adicionado o An-B na forma de emulsão. Essa emulsão (Tabela 7) contém 1% de emulsificante e 1/3 da solução residual de KOH a 10%, para preservar a estabilidade química do látex [46].

Tabela 7 - Composição da emulsão do An-B

Componentes	Peso (kg)
EMULWIN	00,10
H ₂ O deionizada	20,00
An-B	02,15
1/3 da solução de KOH a 10%	00,05
Emulsão	22,30

Em seguida, o látex ficou em repouso durante 1 hora à temperatura ambiente. Foi estocado em três bombonas de plástico durante 4 horas antes de ser irradiado.

3.1.1.3 - Irradiação

O látex formulado foi irradiado com raios gama, proveniente de uma fonte de ⁶⁰Co, industrial, tipo esteira, cuja taxa de dose (TD) é de 4,5 kGy/h. Essa fonte está instalada na EMBRARAD, localizada em Cotia / SP. As bombonas de plástico contendo o látex formulado, foram colocadas em fileira e submetidas a uma dose de 10 kGy, à temperatura ambiente e sem nenhuma agitação. Não foram feitas as medidas de dosimetria, especificamente para essa bombonas, mas a dose foi determinada pelos critérios dosimétricos da Empresa. O látex irradiado foi deixado em repouso durante 10 dias. Adicionou-se 1 phr de antioxidante (Irganox 1520 e Winstay-L) na forma de emulsão e deixou-se amadurecer durante 1 dia.

3.1.2 - MÉTODO ESTATÍSTICO DE DESENHO FATORIAL FRACIONADO

Neste item será introduzido alguns conceitos básicos do método estatístico, utilizado para o planejamento dos experimentos necessários para estudar os parâmetros de processo, que influenciam a fabricação de luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante, utilizando o látex de borracha natural vulcanizado com raios gama. Se destaca alguns aspectos importantes desse método empregado, os efeitos principais de cada um dos parâmetros estudados, como também as interações possíveis que existem entre eles. Se introduzirá a teoria dos planejamentos fatoriais de dois níveis e, também, a utilização dos planejamentos fracionados quando o número de fatores envolvidos no processo são numerosos.

3.1.2.1 - Introdução

A estratégia comumente utilizada em muitas pesquisas experimentais é estudar o efeito de uma variável de cada vez. Consiste na investigação dos efeitos de diversas variáveis de processo tornando todas constantes, exceto uma, que é pesquisada em diversos níveis dentro da faixa de interesse, até que o valor ótimo seja encontrado. A próxima sequência de experimentos consiste em manter essa variável constante nesse valor ótimo, e pesquisar uma segunda variável até que seu valor ótimo também seja encontrado. Mantendo as duas primeiras variáveis constantes em seus supostos valores ótimos, os experimentos prosseguem de modo similar, até que todas as variáveis de interesse sejam estudadas, sempre variando uma de cada vez. A condição ótima final é a combinação dos valores ótimos de cada variável. O conceito implícito nesse procedimento é a hipótese de que os efeitos de cada variável são independentes dos valores de todas as outras, isto é, não há interação entre as variáveis. Nos experimentos reais, raramente essa hipótese é válida e a combinação encontrada com esse procedimento experimental, não é necessariamente, o valor ótimo global.

Até os dias de hoje, a abordagem de experimentos que englobam muitas variáveis consistem em variar apenas uma delas de cada vez, em vários níveis. Entretanto R. A. Fisher [3], no início da década de 20, teve a idéia, de uma outra estratégia diferente que foi a de variar todas elas (fatores) simultaneamente. Ele denominou essa estratégia de planejamento fatorial que apresenta as seguintes vantagens básicas:

- Nos processos onde os efeitos das variáveis são aditivos há maior precisão.
- Nos processos onde os efeitos das variáveis não são aditivos, detecta e estima as interações entre os efeitos principais.

É interessante mostrar uma outra vantagem desse planejamento estatístico fatorial. Considerando que 5 fatores devem ser estudados no método experimental tradicional, que investiga cada fator por vez em pelo menos 8 níveis, fixando as condições dos demais fatores, há necessidade de se realizar 128 experimentos para obter uma boa precisão na estimativa dos efeitos principais. No método estatístico de desenho fatorial fracionado em 2 níveis com apenas 16 experimentos, é possível se detectar os efeitos principais e as interações entre elas. Portanto é possível com um número menor de ensaios obter maiores informações.

O método estatístico de desenho fatorial fracionado em dois níveis [3] foi utilizado neste trabalho, no planejamento experimental para estudar a influência dos parâmetros de processo na espessura de luvas cirúrgicas, fabricadas pelo método de imersão com coagulante, com a finalidade de otimizá-lo. Portanto, o objetivo de planejar estatisticamente os experimentos que conduzirão ao estudo dos parâmetros que afetam a espessura da luva, foi para descobrir quais variáveis têm um efeito significativo e importante na espessura, além de descrever como as variáveis de processo, mais importantes, afetam a espessura, dentro da região de interesse, ou seja, na região ótima.

Como esse método estatístico ainda não é bem difundido entre os pesquisadores nacionais pretende-se, neste item, apresentar alguns conceitos básicos e dar alguma noção sobre o planejamento fatorial fracionado, lembrando

que a fonte de consulta utilizada foi a referência 3, onde uma maior abrangência e detalhes podem ser encontrados.

Antes de se discutir o planejamento fatorial é interessante apresentar algumas idéias sobre as variáveis inerentes aos experimentos.

Uma pesquisa experimental consiste em um ensaio ou em uma série de ensaios, envolvendo mudanças deliberadas nas variáveis de processo, para observar e identificar mudanças correspondentes na variável de resposta. A metodologia adequada para desenvolver uma pesquisa experimental, depende do grau de conhecimento existente sobre a natureza da relação entre variável resposta e variáveis de processo.

Os valores de uma variável são denominados de níveis reais e, um experimento composto de uma combinação de variáveis, cada uma em um nível, é denominada de condição experimental.

As variáveis de processo podem ser divididas em duas categorias: as variáveis independentes que serão investigadas no experimento, e as variáveis dependentes que são as variáveis resposta.

Além das variáveis de processo existem outras variáveis, denominadas variáveis de ruído ou erro experimental, que podem ser conhecidas ou desconhecidas. Elas são responsáveis pela obtenção de resultados diferentes quando as experiências são repetidas. Portanto afetam a variável resposta, não são controláveis e têm um efeito desprezível. Além dos erros, de amostragem e de análise, a temperatura ambiente, a atenção do experimentador, a idade e a pureza dos reagentes, a eficiência e as condições dos equipamentos, etc, são exemplos de variáveis de ruído.

Este tipo de erro experimental deve ser considerado no planejamento estatístico para ser eliminado ou identificado. O efeito do erro experimental pode ser balanceado ou distribuído entre as condições experimentais, quando se utiliza um critério aleatório para ordenação dos ensaios. Desta forma se obtém estimativas não-tendenciosas dos efeitos dos fatores, operando com independência estatística.

Para exemplificar, na fabricação de luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante, a espessura da luva, definida estatisticamente como variável de resposta ou variável dependente, é controlada por muitos fatores ou variáveis que controlam o processo. São definidas estatisticamente como variáveis independentes ou variáveis de processo. Uma delas é o tempo de imersão do molde. São escolhidas conforme se supõe, inicialmente, que influenciam intensamente os valores da espessura.

3.1.2.2 - Planejamento fatorial

Os planejamentos fatoriais são amplamente utilizados em experimentos onde há vários fatores de interesse com objetivo de realizar o menor número de experimentos que garantam a análise dos resultados com boa precisão. Obtem-se um planejamento fatorial com k fatores, escolhendo um número fixo de níveis reais para cada fator (n_1 níveis para o fator A, n_2 níveis para o fator B, ..., n_k níveis para o fator K) e então são realizados os experimentos com todas as combinações possíveis desses níveis. O número total de ensaios N é dado por:

$$N = (n_1)(n_2), \dots, (n_k) \quad (20)$$

A classe mais comum e mais simples de planejamento fatorial é aquela onde cada fator é pesquisado em apenas 2 níveis reais, um valor baixo e um valor alto. É designada genericamente por 2^k , onde k é o número de fatores ou variáveis. O número de condições experimentais é 2^k e se r testes ou réplicas são realizadas em cada condição experimental, o número total de ensaios é $N = r 2^k$. Para facilitar o estudo desses planejamentos, os níveis reais dos fatores são codificados com -1 (nível baixo) e +1 (nível alto), de tal forma que as condições experimentais são representadas por uma série de sinais - e +. Para fatores quantitativos a relação entre os níveis codificados e os níveis reais é dado pela equação 21.

$$\text{Nível codificado} = \frac{\text{nível real} - \text{média}}{\text{semi-amplitude}} \quad (21)$$

onde:

média = (menor valor + maior valor)/2

semi-amplitude = (maior valor - menor valor)/2

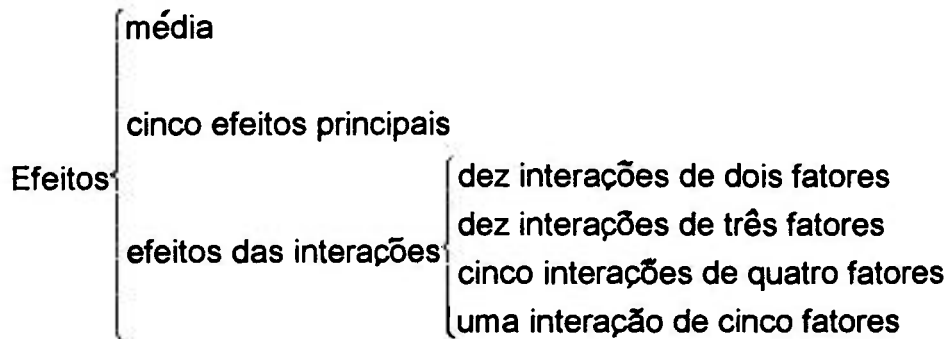
Tais planejamentos são importantes pelas seguintes razões [3]:

- a) Exigem relativamente poucos experimentos para cada variável estudada. Embora não permitam explorar plenamente uma ampla região de valores para cada variável, podem indicar as principais tendências e determinar assim uma direção promissora para uma experimentação posterior.
- b) Quando se deseja uma exploração local mais profunda, podem ser convenientemente ampliados de modo a formar os planejamentos compostos.
- c) São muito úteis nos estágios iniciais de uma pesquisa, quando é conveniente conduzir experimentos preliminares para observar, superficialmente, um grande número de fatores, ao invés de observar detalhadamente um pequeno número de fatores, que podem ou não incluir os mais importantes.
- d) Esses planejamentos e os fracionados correspondentes podem ser usados como construção em blocos, de modo que o planejamento final possa atender à sofisticação do problema.
- e) A interpretação das observações produzidas pelos planejamentos pode ser feita usando bom senso e matemática elementar. É claro que os pacotes estatísticos facilitam consideravelmente essa tarefa, principalmente quando o número de fatores é grande.

Planejamento fatorial fracionado, 2^{k-p}

Quando se tem um número grande de fatores maior ou igual a 5, torna-se inviável a realização de um experimento fatorial completo, devido ao número

excessivamente grande de ensaios que se torna necessário. Um experimento fatorial completo, com 5 variáveis, exige $2^5 = 32$ ensaios. Com base nesses 32 ensaios pode-se estimar o seguinte:



Considerando que muitas vezes as interações de mais de três variáveis apresentam efeitos desprezíveis na variável resposta, torna-se desnecessário as suas estimativas. Pode-se então, conseguir as informações desejadas, realizando apenas uma parte (fração) do planejamento fatorial completo. Esses planejamentos são denominados planejamentos fatoriais fracionados e são denotados por 2^{k-p} , onde $1/2^p$ é a fração do planejamento completo utilizada, e p é o número de geradores independentes, necessários para identificar as interações equivalentes.

Através do planejamento fatorial fracionado consegue-se diminuir, de forma adequada, o número de experimentos, sem perder informações sobre os efeitos das variáveis que podem ser significativas. Esta técnica é útil no início de uma pesquisa, quando frequentemente se tem um número muito grande de fatores e não se sabe realmente quais são significativos. Um começo eficiente para selecionar as variáveis importantes, é trabalhar com uma fração do planejamento fatorial completo, envolvendo todas as variáveis que podem afetar a variável resposta, até ser possível eliminar aquelas que não influenciam. Assim por exemplo, os 32 experimentos necessários no planejamento fatorial completo 2^5 , são reduzidos para 16, quando $p=1$ e a fração é $1/2$, porque o número de experimentos é de 2^{5-1} .

Quando se pretende utilizar o método estatístico fatorial fracionado para analisar os resultados de uma determinada investigação experimental, há necessidade de se planejar os experimentos, antes da execução, dentro de regras estabelecidas pela estatística, as quais permitem analisar efeitos e interações das variáveis de processo com a variável resposta. É o que se fará em seguida, para um planejamento fatorial fracionado.

No planejamento fatorial fracionado, as variáveis de processo podem ser representadas por letras (A, B, C) e os respectivos níveis codificados podem ser representados por uma série alfa-numérica (x_1, x_2, x_3). Portanto x_1 é o nível codificado da variável A, x_2 é o nível codificado da variável B, e assim por diante.

A Tabela 8 mostra o desenho desse planejamento, em dois níveis, os quais estão codificados como +1 ou -1, correspondendo ao valor maior e ao menor respectivamente, para cada uma das cinco variáveis de processo.

Tabela 8 - Desenho do planejamento fatorial fracionado, 2^{5-1} , apresentados na ordem padrão

Ordem	Níveis codificados					I
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1	+1	+1
5	-1	-1	+1	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	+1
7	-1	+1	+1	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1	-1	-1	+1
9	-1	-1	-1	+1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	+1	+1
11	-1	+1	-1	+1	+1	+1
12	+1	+1	-1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1	-1	+1
15	-1	+1	+1	+1	-1	+1
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Observe que os 16 experimentos estão apresentados em uma determinada ordem, conhecida como ordem de Yates. Listar as condições nesta

ordem, é mais conveniente do que a ordem aleatória, em que os experimentos foram executados, porque facilita a análise dos resultados. Essa ordem padrão é obtida escrevendo os sinais dos dois níveis codificados em forma alternada (-1, +1) na coluna x_1 , pares alternados (-1-1, +1+1) na coluna x_2 , quadruplos alternados (-1-1-1-1, +1+1+1+1) na coluna x_3 , e octuplos alternados (-1-1-1-1-1-1-1-1, +1+1+1+1+1+1+1+1) na coluna x_4 . A coluna x_5 foi planejada de forma que os níveis codificados da variável E, sejam iguais ao produto dos níveis codificados das variáveis A, B, C e D, para cada um dos 16 experimentos. Portanto $x_5 = (x_1)(x_2)(x_3)(x_4)$. Por exemplo, no experimento n^o1, $x_5 = (-1)(-1)(-1)(-1) = +1$ e no experimento n^o2, $x_5 = (+1)(-1)(-1)(-1) = -1$.

A partir da relação $x_5 = x_1 x_2 x_3 x_4$, que é chamada de geradora de planejamento e é uma condição imposta, obtém-se o planejamento fatorial fracionado. Também esta relação permite determinar as interações equivalentes que ocorrem entre as variáveis. É o que se apresentará em seguida.

Esquema de interações equivalentes no planejamento 2^{5-1}

Neste planejamento fatorial pode-se obter 10 interações duplas, 10 triplas, 5 quadruplas e 1 quintupla, entre as 5 variáveis, e estudá-las. Obtem-se também os efeitos principais e a média. O planejamento dessas interações é obtido multiplicando-se os respectivos níveis codificados das variáveis para cada um dos 16 experimentos. Por exemplo, para a interação entre as variáveis A e B multiplica-se x_1 por x_2 em cada experimento. Para o experimento n^o1 tem-se $x_1 x_2 = +1$, para o experimento n^o2 tem-se $x_1 x_2 = -1$, de forma que a coluna $x_1 x_2 = (+1)(-1)(-1)(+1)(+1)(-1)(-1)(+1)(-1)(-1)(+1)(+1)(-1)(-1)(+1)$. Desta forma pode-se obter interações cujas colunas são idênticas, como mostra a Tabela 9, para as interações $x_1 x_2 x_3$ e $x_4 x_5$. Diz-se que essas interações são equivalentes. Portanto pode-se apenas estimar a soma dos valores médios dos efeitos das interações entre a dupla de variáveis DE e a tripla de ABC. Utiliza-se neste caso, o símbolo $\epsilon \rightarrow DE + ABC$ para representar essas interações equivalentes. Todas as outras interações equivalentes podem ser obtidas a partir do gerador de planejamento fatorial, $E = ABCD$. Multiplicando-se ambos os membros por E, tem-se:

$$E \times E = ABCD \times E = I \quad (22)$$

I é chamado de identidade e a sua coluna, no planejamento fatorial fracionada será constituída de sinais + (Tabela 8). A relação $I = ABCDE$ é o gerador de planejamento para o desenho fatorial fracionado 2^{5-1} .

Tabela 9 - Exemplo de interações equivalentes no planejamento 2^{5-1}

Nº	Efeitos principais					Interações	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_4X_5	$X_1X_2X_3$
1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
9	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
10	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
11	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
12	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

A partir desta relação de definição do planejamento fica fácil determinar a equivalência entre os efeitos e as interações. Para descobrir quais os efeitos são equivalentes a um outro determinado efeito, basta multiplicá-lo pela relação de definição (equação 22). Por exemplo, é fácil determinar qual o efeito que é equivalente ao efeito principal A. Basta multiplicar a relação de definição por A: $A \times I = A^2BCDE$. Como $A^2 = I$, tem-se que $AI = IBCDE$ e portanto $A = BCDE$. A Tabela 10 mostra o esquema de interações equivalentes baseado neste raciocínio.

Resolução do planejamento fatorial fracionado, 2^{5-1}

A resolução de um planejamento fatorial indica o tipo de interação equivalente. Os planejamentos de resolução V: são aqueles onde não há equivalência entre efeitos principais e interações de dois ou três fatores, mas há equivalência entre interações de dois fatores e interações de três fatores. Os efeitos principais são equivalentes às interações de quatro fatores.

Percebe-se na Tabela 10 que os efeitos principais (A, B, C, D e E) são equivalentes com interações de quatro fatores (respectivamente: BCDE, ACDE, ABDE, ABCE e ABCD) e as interações de dois fatores (AB, AC, AD, ..., DE) com interações de três fatores (respectivamente: CDE, BDE, BCE, ..., ABC). Portanto, define-se que o planejamento fatorial fracionado utilizado tem resolução V e é utilizada a notação 2^{5-1}_V .

Tabela 10 - Esquema de interações equivalentes para o desenho fatorial fracionado 2^{5-1} onde a relação de definição é: I = ABCDE

Efeitos equivalentes	Esquema de equivalência
A = BCDE	$l_A \rightarrow A + BCDE$
B = ACDE	$l_B \rightarrow B + ACDE$
C = ABDE	$l_C \rightarrow C + ABDE$
D = ABCE	$l_D \rightarrow D + ABCE$
E = ABCD	$l_E \rightarrow E + ABCD$
AB = CDE	$l_{AB} \rightarrow AB + CDE$
AC = BDE	$l_{AC} \rightarrow AC + BDE$
BC = ADE	$l_{BC} \rightarrow BC + ADE$
AD = BCE	$l_{AD} \rightarrow AD + BCE$
BD = ACE	$l_{BD} \rightarrow BD + ACE$
CD = ABE	$l_{CD} \rightarrow CD + ABE$
AE = BCD	$l_{AE} \rightarrow AE + BCD$
BE = ACD	$l_{BE} \rightarrow BE + ACD$
CE = ABD	$l_{CE} \rightarrow CE + ABD$
DE = ABC	$l_{DE} \rightarrow DE + ABC$

O fundamento do planejamento fatorial 2^5 é que o efeito de uma variável está associada a quatro outras. Quando se fraciona, o número de

experimentos diminui segundo o fator de fracionamento. Neste trabalho o fracionamento foi $\frac{1}{2}$ e o número de experimentos diminuiu de 32 para 16. Neste planejamento de resolução V ocorrem interações equivalentes que podem ser previstas pela relação de definição $I = ABCDE$ e estimadas pelo valor médio entre ambas as interações. Ocorrem equivalências entre as interações de duas variáveis e interações de três variáveis.

Como este planejamento fatorial fracionado $2_{\frac{1}{2}}^{5-1}$ é simples e reduz satisfatoriamente o número de experimentos, foi utilizado na investigação das variáveis que influenciam a espessura, como será discutido no item 3.2.1.1, em "Resultados e Discussão" deste Capítulo.

3.1.3 - FABRICAÇÃO

O processo de imersão é industrialmente empregado na fabricação de peças ocas e é considerado um processo simples e prático. Na indústria da borracha há três processos de imersão muito utilizados, que dependem da espessura do artefato desejado, são: o processo de imersão contínua, o processo de imersão com coagulante, o processo de imersão a quente. Na fabricação de luvas cirúrgicas emprega-se o método de imersão com coagulante, porque a espessura desejada, que está dentro da faixa de 0,15 a 0,3 mm, pode ser obtida em uma única imersão. Neste trabalho dois tipos de eletrólitos coagulantes foram estudados com o objetivo de se atingir a espessura desejada, da forma mais econômica: nitrato de cálcio e cloreto de cálcio.

A fabricação de luvas cirúrgicas envolveu duas etapas experimentais: a avaliação da influência dos parâmetros na espessura da luva e a investigação do mecanismo de secagem.

3.1.3.1 - Método de imersão com coagulante

Este método exige o preparo de uma solução coagulante, um arranjo experimental para imersão, que inclui um sistema de aquecimento para a secagem, além do látex vulcanizado.

Arranjo experimental para fabricar luvas cirúrgicas

O arranjo experimental necessário para avaliar os efeitos dos parâmetros na fabricação da luva cirúrgica foi montado na fábrica em Elias Fausto. É constituído dos seguintes componentes principais:

- Moldes de porcelana, anatômicos, doados pela Johnson & Johnson.
- Recipientes mergulhadores de plástico, contendo látex e a solução coagulante.
- Sistema mecânico de imersão com controlador de velocidade.
- Um forno industrial, elétrico, de fabricação caseira, de patrimônio da fábrica.
- Cronômetro, para controlar a velocidade e o tempo de imersão.

O sistema mecânico de imersão com controlador de velocidade (Figura 6) foi projetado e confeccionado nas oficinas do IPEN-CNEN/SP.

Arranjo experimental para a obtenção de filmes

A obtenção dos filmes de borracha foi realizada nos laboratórios do IPEN-CNEN/SP. O arranjo experimental necessário foi o seguinte:

- Placas de vidro de 20 cm x 4,5 cm x 0,2 cm, que foram imersos no látex para a produção do filme,
- Cuba de vidro contendo látex vulcanizado,
- Cronômetro, para controlar o tempo de secagem,
- Estufa com circulação interna de ar da Etil LTDA.

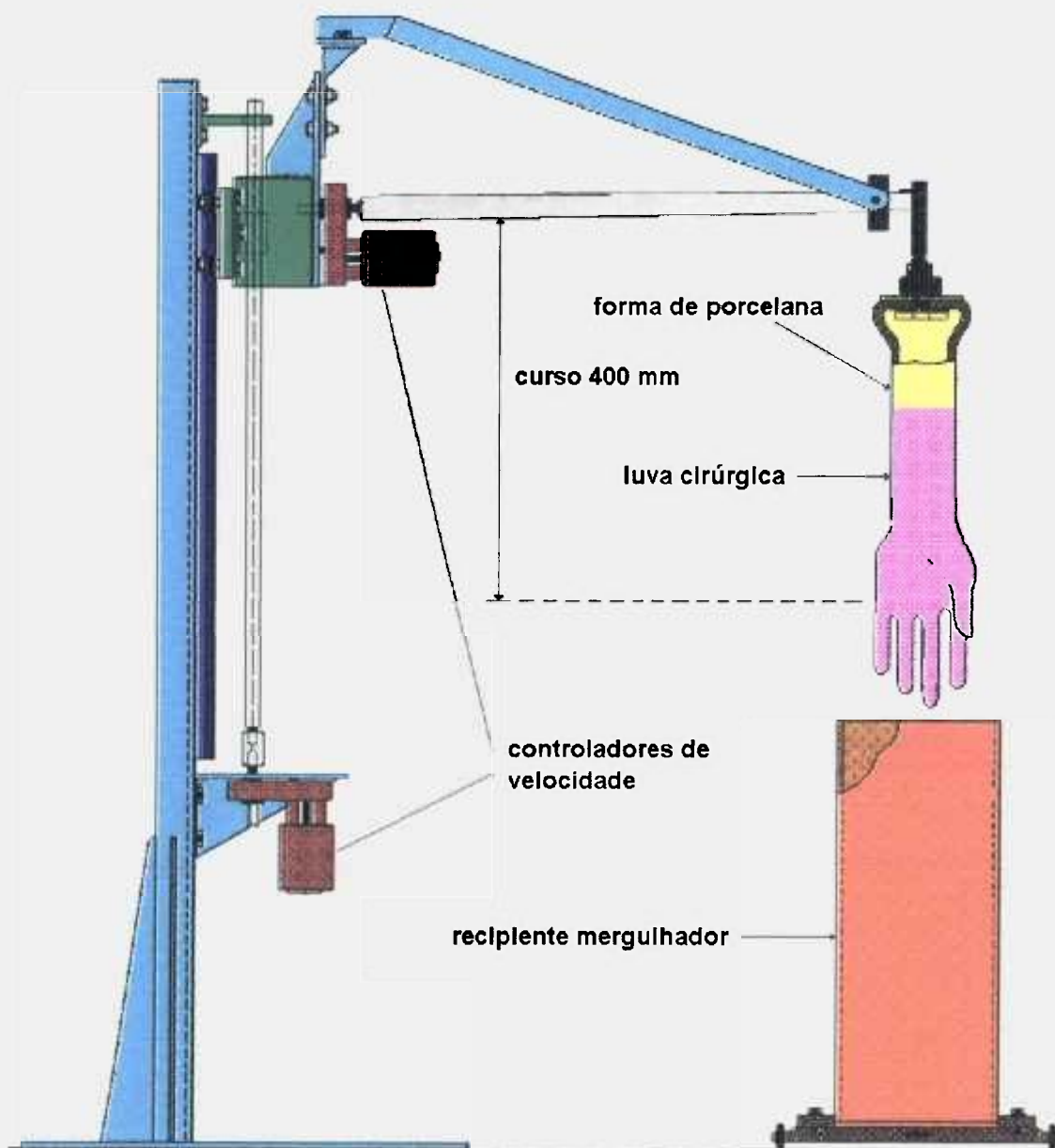


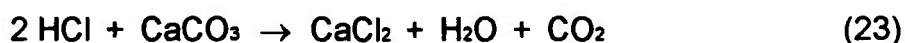
Figura 6 - Sistema mecânico de imersão

Formulação da solução coagulante

Será descrita a metodologia usada na formulação das duas soluções coagulantes e o desempenho dos coagulantes em função da uniformidade do filme de borracha coagulada.

A formulação da solução coagulante, contendo nitrato de cálcio, a 35% foi seguida mediante a metodologia de Utama [46]. Foi dissolvido o nitrato de cálcio em água deionizada e álcool, a uma proporção de 30% e foi adicionado talco a uma proporção de 5%. Esta solução ficou em constante agitação para evitar a precipitação do talco. O pH resultante foi de 5,52 medido à temperatura ambiente.

A solução coagulante, contendo cloreto de cálcio, a 20% foi preparada seguindo a prática industrial [22]. Se fez reagir 35 g de HCl a 37%, com CaCO_3 em proporção estequiométrica. O HCl foi colocado em um recipiente de plástico e, em pequenas quantidades, foi adicionado o CaCO_3 . A reação que ocorre (reação 23) é espontânea à temperatura ambiente, exotérmica e violenta. Portanto, é preciso ter cuidado ao colocar pequenas quantidades do CaCO_3 , porque, conforme acontece a reação, formam-se grandes quantidades de CO_2 , que provocam um intenso e constante borbulhamento. A reação termina, após ter atingido o equilíbrio. Isto ocorre quando o borbulhamento, diminui, indicando que não se forma mais CO_2 . O pH resultante desta solução foi de 6,26, medido também à temperatura ambiente.



Para obter um bom filme de borracha coagulada sobre a superfície do molde, em primeiro lugar deve-se verificar o desempenho do coagulante utilizado. O molde, foi limpo, seco e aquecido em um forno industrial a 80 °C durante 20 minutos. Em seguida foi imerso nas soluções coagulantes, as quais não foram aquecidas por falta de equipamento a nível de planta piloto. A finalidade de aquecer tanto o molde quanto a solução coagulante é ter um depósito de

coagulante, homogeneamente formado e seco. Quando isto ocorre, pode-se eliminar a etapa de secagem após a imersão.

Quando o molde foi imerso na solução coagulante contendo nitrato de cálcio, observou-se uma boa uniformidade do filme de coagulante depositado na superfície. Em seguida o molde foi colocado no forno e aquecido durante 45 minutos, a 80 °C, para a total secagem do filme. O nitrato de cálcio $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ é higroscópico, e dissolveu-se na água de cristalização a 42,7 °C [30].

Por outro lado, quando o molde foi imerso na solução coagulante de cloreto de cálcio, que dispensa o uso de talco, também observou-se uma boa uniformidade do filme de coagulante depositado na superfície. O tempo de secagem necessário foi somente de 15 minutos. O cloreto de cálcio $[\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ também é higroscópico, mas dissolveu-se na água de cristalização a 21 °C [30]. Portanto, o cloreto de cálcio mostrou melhor desempenho. Por isso as experiências que se seguem foram feitas com esse coagulante.

Fabricação das luvas cirúrgicas

As luvas cirúrgicas foram fabricadas usando moldes de porcelana, os quais foram lavados com solução de soda cáustica a 10% e com ácido clorídrico a 8% e, imersos em água circulante para retirar o ácido. Os moldes não devem ter traços de gordura ou resto de borracha na superfície, porque dificulta a boa formação do filme, após a imersão. Em seguida os moldes são secos e aquecidos na estufa a 80 °C, por 20 minutos. Após esse tratamento os moldes estão preparados para iniciar a fabricação das luvas. Para obter uma boa formação do filme de borracha, o látex não deve conter bolhas de ar, que podem ser eliminadas, adicionando antiespumante ao látex, sob constante agitação, ou deixando em repouso durante 24 horas. Também pode ser aquecido o látex a uma temperatura controlada de 40 °C o que garante uma espessura uniforme devido a rápida coagulação do látex, evitando a formação de gotas nos extremos dos dedos. Para evitar as bolhas o látex foi deixado em repouso durante 24 horas. Os moldes são, imersos na solução coagulante, controlando o tempo e a

velocidade de imersão. São deixados na posição vertical para escorrer o excesso de coagulante e são colocados na estufa por 15 minutos, para secar completamente o filme de coagulante depositado na superfície. Em seguida, é retirado da estufa e imerso no látex irradiado, com tempo e velocidade de imersão controlados. Após formado o filme de borracha na superfície do molde, faz-se a borda no punho da luva, enrolando a extremidade superior do filme por cerca de 1 a 2 cm. O molde é transferido para a estufa para secagem total do filme, controlando o tempo e a temperatura de secagem. A total transparência do filme de borracha depositado na superfície do molde, que inicialmente mostrou-se branco devido à incorporação de água, indica que a luva está totalmente seca. O molde imediatamente é retirado da estufa e colocado em posição vertical para desmoldar a luva formada. A etapa de desmoldagem se realiza pulverizando talco na superfície da luva, para evitar que grude.

3.1.3.2 - Parâmetros de processo

Os experimentos para estudar os parâmetros de processo foram divididos em dois grandes grupos: em primeiro lugar foram definidos os parâmetros em função da espessura da luva cirúrgica, porque, do ponto de vista econômico, espera-se minimizar o consumo de material utilizado. Para isto, é preciso otimizar o processo de fabricação de luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante. Essa otimização pode ser feita considerando as espessuras limites, que são de 0,1 mm como espessura mínima padronizada e de 0,15 a 0,3 mm, que são valores de espessura encontrados no mercado, obtidos por outros fabricantes. Em segundo lugar, foram definidos os parâmetros de processo em função da secagem da borracha, porque, o látex irradiado está já está vulcanizado, não necessitando de etapas de aquecimento para aumentar o grau de vulcanização, como acontece no processo térmico convencional (Figuras 2 e 3). Portanto, a luva formada deverá ser seca, controlando o tempo e a temperatura de secagem, para evitar o envelhecimento precoce, que ocorre quando a temperatura é maior que a que permite a difusão da água através da borracha. Para um bom controle do tempo e da temperatura de secagem, é preciso fazer ensaios de secagem e determinar a taxa de evaporação da água

através da borracha, em função do tempo e da espessura da luva, assim como, verificar o mecanismo de difusão que controla o processo de secagem.

Na espessura

Os experimentos necessários, para estudar a influência dos parâmetros de processo na espessura da luva cirúrgica, foram planejados conforme o método estatístico de desenho fatorial fracionado em dois níveis [3], descrito no item 3.1.2.

As variáveis de processo que influenciam a espessura da luva foram definidas em função da literatura [41] e da experiência dos fabricantes [15, 22].

As cinco variáveis selecionadas são as seguintes: concentração do coagulante, denotado por (A); temperatura do molde, quando ele é imerso no látex irradiado, denotado por (B); tempo de escoamento do coagulante da superfície do molde, quando o molde sai da solução coagulante, denotado por (C); tempo de permanência do molde imerso no látex irradiado, denotado por (D); e a velocidade de saída do molde do látex, denotado por (E). Cada uma delas foi investigada em apenas dois níveis, um máximo e um mínimo, que correspondem à sua faixa de variação (Tabela 11).

Tabela 11 - Faixa de variação dos parâmetros

Variáveis Notação, Unidades	Níveis codificados	
	Nível baixo (-1)	Nível alto (+1)
Concentração do CaCl_2 (A), %	8,0	19,7
Temperatura do molde (B), $^{\circ}\text{C}$	30,0	80,0
Tempo de escoamento (C), s.	3,0	10,0
Tempo de permanência do molde (D), s	3,0	12,0
Velocidade de saída (E), cm/s	2,5	10,0

O número total de ensaios realizados, determinado pelo planejamento fatorial fracionado em dois níveis, foi de 16. Cada ensaio foi realizado alterando simultaneamente os níveis das variáveis. A concentração máxima da solução

coagulante foi preparada usando a metodologia descrita no item 3.1.3.1. A concentração mínima, foi preparada através da diluição com água desionizada, até atingir uma concentração de 8%. As concentrações foram calculadas teóricamente em função do balanço estequiométrico da reação 23. Não foram realizados ensaios analíticos para determiná-las. As luvas cirúrgicas foram fabricadas pelo método de imersão com coagulante segundo a metodologia descrita no item 3.1.3.1. Os moldes de porcelana utilizados neste trabalho, foram limpos e secos, e em seguida foram fixados verticalmente no sistema mergulhador. Foram colocados 10 L da solução coagulante no recipiente mergulhador e outros 10 L de látex irradiado, preparado segundo a metodologia descrita no item 3.1.1.2, em um segundo recipiente mergulhador. Os motores que promovem os movimentos verticais de entrada e de saída do molde do recipiente mergulhador foram acionados. A mudança de sentido é feita invertendo o sentido de rotação do eixo do motor, quando os disjuntores de inversão do sentido da corrente elétrica entram em ação. Isto se faz no painel de controle, onde também se controla a velocidade de rotação do motor.

A temperatura do molde, no seu nível máximo (80 °C), foi obtida em um forno industrial, com circulação interna de ar, da própria fábrica, controlado com termopares. A temperatura do molde, no seu nível mínimo, foi considerada a temperatura ambiente, que em todos os ensaios foi em torno de 30 °C.

A temperatura do látex irradiado e da solução coagulante também foi a da ambiente. O forno industrial foi utilizado para secar o filme de coagulante depositado sobre o molde de porcelana e também para secar as luvas fabricadas. A temperatura de secagem para ambos os casos, de 80 °C, é uma variável fixa com uma variação de 5 °C. A etapa de secagem foi feita na linha de produção da fábrica de luvas cirúrgicas Elias Fausto Co. LTDA. As luvas foram secas no forno industrial, cuja capacidade é de 90 luvas por batelada. Após à etapa de secagem foram desmoldadas manualmente usando talco, e imediatamente foram codificadas. Foi fabricado um par de luvas para cada condição experimental. Os experimentos foram realizados sem réplicas e em ordem aleatória como mostra a Tabela 13. Em seguida foram medidas as espessuras das luvas nas regiões superior do punho, central da luva e na palma. Foram realizadas 6 medidas de

espessura para cada condição experimental, os resultados são mostrados na Tabela 12.

Na secagem

Os ensaios para estudar a velocidade de secagem foram realizados com um filme de borracha coagulado sobre uma placa de vidro, obtido pelo processo de imersão com coagulante. Não foram realizados com as luvas porque esses ensaios necessitam uma precisão na pesagem da ordem de 0,1 mg, obtidas com balanças analíticas, nas quais não se pode pesar o molde com a luva, porque o seu peso é de aproximadamente 2 kg.

Foram estudadas duas condições de processamento para a secagem do filme de borracha: a secagem com convecção livre e a secagem com convecção forçada. Em ambas as condições foi utilizada uma estufa, com circulação interna de ar, da ETIL, a qual foi calibrada com termopares. Na convecção livre as condições de aquecimento, que permaneceram constantes durante os ensaios foram as seguintes: a) a temperatura do ar atmosférico, utilizado como fluido de secagem, foi de 50 ± 2 °C; b) a umidade relativa média do ar foi de 75,97%, medido com um higrógrafo da marca Suess modelo H-109, do Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos. Na convecção forçada, onde pretende-se estudar o grau de influência da velocidade do ar na taxa de evaporação da umidade, a circulação interna do ar foi acionada na velocidade máxima a qual é desconhecida, as condições de aquecimento foram as mesmas utilizadas na convecção livre.

Nos ensaios de secagem da borracha os filmes foram fabricados pelo método de imersão com coagulante sobre uma placa de vidro, com as seguintes dimensões 20 cm x 4,5 cm x 0,2 cm. Foram imediatamente pesados (placa de vidro e filme de borracha) na balança analítica e transferidos para a estufa, para a secagem parcial do filme a 50 °C, por um intervalo de tempo pré-determinado. A superfície total exposta à secagem foi de 180 cm². Em seguida são resfriados em um dessecador, à temperatura ambiente, por 15 minutos e pesados na balança analítica. Repete-se essa operação tantas vezes quantos forem os

intervalos de tempo de secagem definidos. Antes de cada ensaio a estufa foi previamente aquecida à temperatura de 50 °C durante 1 h. A temperatura foi constante durante todo o ensaio, controlada com termopares e um registrador digital de temperatura acoplado à estufa. Os intervalos de tempo foram controlados com um cronômetro e cada ensaio foi dividido em 14 intervalos de tempo que vão de 0, 5, 10, 20 e 30 minutos, completando 144 minutos para convecção livre e 104 minutos para convecção forçada. Finalmente, quando não se observa a variação de peso do filme, o que significa que atingiu a umidade de equilíbrio, deixa-se o conjunto na estufa a 100 °C por 1 hora, para a retirada da água total. São transferidos novamente para o dessecador durante 15 minutos, pesados e medidas as respectivas espessuras, com um micrômetro vertical da Ozaki Seisakusho Co. Ltda, modelo Peacock-Upright Dial Gauge (0,001 x 2 mm).

Um primeiro ensaio foi feito com o motor do ventilador da estufa desligado simulando secagem com convecção livre. Para esse ensaio o filme de borracha registrou um peso de 2,2372 g e a espessura média do filme foi de $0,235 \pm 0,034$ mm.

Um segundo ensaio foi feito com o motor do ventilador ligado simulando secagem com convecção forçada, incidindo paralelamente o ar sobre as duas superfícies maiores da placa de vidro. Não foi possível determinar a velocidade do ar. Nesse ensaio o filme de borracha registrou um peso de 2,071 g e a espessura média do filme foi de $0,201 \pm 0,02$ mm.

3.1.3.3 - Propriedades

As propriedades mecânicas mais importantes que refletem as características das luvas cirúrgicas são: resistência à tração na ruptura (RT), alongamento na ruptura (AR), módulo a 500% (M), deformação permanente (DP), e rasgo angular (RA).

A RT e o M mostram o grau de reticulação da borracha, o AR e a DP mostram as propriedades plásticas da borracha a qual diminui com o aumento do grau de reticulação, o RA mostra a orientação das moléculas.

As propriedades mecânicas foram medidas usando um dinamômetro da INSTRON, tipo 3D pneumático-hidráulico, modelo 1130 com velocidade de travessão de 500 mm/minuto, instalado no IPT. Assim 8 corpos de prova (CP) foram cortados de cada luva, da região do punho, usando cunhos de corte, conforme as normas ASTM D 412-80 e ASTM D 624-91. Foram medidas as espessuras de cada CP. Para a RT as medidas da espessura foram feitas em três pontos da seção de prova de cada CP, segundo a, norma ASTM D 412-80, e calculada a média das três medidas com um coeficiente de variância máximo de 3,7%.

Os CP originais foram acondicionados a 23 ± 2 °C, conforme recomenda a norma ASTM D 1349-78. Os ensaios consistiram em submeter o CP a uma força de tração de 5 kg até à ruptura. Na determinação do AR, do M e da DP, primeiro foi marcado um comprimento de 25,4 mm (1 polegada) na seção de prova de cada CP. Com uma régua padronizada acompanhou-se o estiramento. Uma vez atingido o estiramento de 500% registra-se a força aplicada na carta, determinando assim o M a 500%. Continua-se o estiramento do CP, acompanhando com a régua, até ruptura. Determina-se assim o AR em %. A RT foi calculada segundo a equação 24,

$$RT = \frac{f}{E \times LS} \times 9,8 \quad (24)$$

onde:

f = força necessária para romper o CP, kgf

E = espessura do CP, mm.

LS = largura da seção do CP, que corresponde à largura do cunho de corte utilizado, 6,28 mm.

9,8 = fator de transformação de unidades.

Após a ruptura foram unidas as 2 partes, e imediatamente, foi medida a distância entre as duas marcas com um paquímetro, cuja precisão é de 0,05 mm. A DP, dada em %, foi calculada segundo a equação 25,

$$DP = \frac{CoF - Col}{Col} \times 100 \quad (25)$$

onde:

Col = comprimento inicial, mm.

CoF = comprimento final, mm.

De cada condição experimental foram escolhidas 3 luvas, aleatoriamente, e de cada luva foram cortados 8 CP. Os resultados das propriedades mecânicas são valores médios de 6 CP. Os CP restantes foram descartados porque estouravam os valores dos coeficientes de variância estabelecidos pela norma ASTM D 412-80.

Na determinação do RA foi realizada uma só medida da espessura no vértice do ângulo de 45° do CP. Este ensaio também consistiu em submeter o CP a uma força de tração de 5 kg até à ruptura. O RA foi calculado também segundo a equação 24.

Envelhecimento

Os CP originais, com suas espessuras medidas previamente, foram submetidos a teste de envelhecimento, segundo a norma ASTM D 573-78. Esse teste de envelhecimento consiste em submeter o CP original a um envelhecimento acelerado nas seguintes condições experimentais: temperatura de 70 ± 2 °C, por 166 ± 2 horas em uma estufa da Fanen Ltda, instalada no IPT, com ventilação forçada, tipo IIB, especificada pela norma ASTM D 145-68-81; na presença de ar e à pressão atmosférica. A finalidade destes testes de envelhecimento é de medir a resistência térmica e o grau de degradação da borracha, quando ela é submetida, a uma temperatura maior que a ambiente na presença do ar. Simula-se nestes testes, de envelhecimento acelerado, um longo tempo de estocagem. Esta resistência térmica é medida comparando-se as propriedades mecânicas dos CP, antes e após o envelhecimento.

O resultado do envelhecimento, expresso em porcentagem de alteração das propriedades mecânicas das luvas, é calculado segundo a equação 26.

$$\text{Porcentagem de envelhecimento} = [(COM - SEM) / SEM] \times 100 \quad (26)$$

onde:

SEM = valor da propriedade mecânica do CP sem envelhecimento.

COM = valor da propriedade mecânica do CP após o envelhecimento.

3.1.4 - ESTERILIZAÇÃO

As luvas cirúrgicas fabricadas foram embaladas com polietileno, herméticamente, na presença de ar, e esterilizadas com raios gama, na EMBRARAD. As doses foram de 10 kGy e 25 kGy.

3.2 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fabricação de luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante, a partir do látex vulcanizado com radiação ionizante, é um processo inédito no Brasil. Por isso é necessário investigar este processo, para conhecê-lo e otimizá-lo. Essa investigação foi dividida em 2 etapas, neste trabalho. Estudou-se os efeitos das variáveis de processo na espessura da luva e o mecanismo de secagem do filme de borracha, para otimizar esse processo industrial, de forma que atenda as exigências de qualidade estabelecidas pelas normas.

Um outro aspecto interessante para ser investigado é a possibilidade de esterilizar as luvas cirúrgicas com raios gama. Neste caso, além da dose de 10 kGy necessária para a vulcanização do látex, a luva foi esterilizada com 25 kGy. A dose total recebida pelas moléculas da borracha natural foi de 35 kGy. O efeito dessa dose foi estudado em função das propriedades mecânicas das luvas.

3.2.1 PARÂMETROS DE PROCESSO

Foram estudadas as variáveis de processo que influenciam a espessura da luva e a secagem da borracha coagulada. O objetivo foi selecionar

os fatores mais importantes que apresentam maior efeito sobre a espessura, avaliar a interação entre os fatores e correlacioná-los matematicamente. O mecanismo e os parâmetros de secagem foram definidos a partir de ensaios de secagem da borracha coagulada, depositada sobre a superfície de uma placa de vidro, pelo método de imersão com coagulante.

3.2.1.1 - Na espessura

Foram realizados um total de 16 ensaios planejados pela técnica estatística de desenho fatorial fracionado, em 2 níveis, com resolução V. Os resultados do planejamento fatorial serão analisados, explicando passo a passo os cálculos dos efeitos e avaliando a respectiva significância, através de métodos estatísticos diferentes.

Análise do planejamento fatorial

Na Tabela 12 são apresentados os 6 valores das medidas da espessura obtidas de duas luvas fabricadas em cada condição experimental, representadas por (y), medido em mm, e os valores médios para cada condição experimental representados por (\bar{y}), assim como a sequência aleatória de execução dos experimentos.

A Tabela 13 apresenta o desenho do planejamento fatorial fracionado 2^{5-1}_V , onde se observa o planejamento dos níveis codificados na ordem de Yates e a sequência aleatória em que os experimentos foram realizados. São apresentados também os dois níveis reais para as 5 variáveis de processo selecionadas. A variável A que é a concentração do coagulante, CaCl_2 , foi estudada em 2 níveis reais: 8 e 19,7%. A variável B, que é a temperatura do molde, foi estudada nos seguintes níveis reais: 30 e 80 °C. As variáveis C e D, respectivamente, tempo total de imersão do molde no coagulante e o tempo de permanência do molde no látex. Os respectivos níveis reais foram: 3 e 10 s e, 3 e 12 s. A última variável selecionada, E, foi a velocidade de saída do molde no

látex e os respectivos níveis foram 2,5 e 10 cm/s. A última coluna desta tabela mostra o valor médio da espessura para cada experimento.

Tabela 12 - Espessura das luvas cirúrgicas. Experimentos executados em ordem aleatória

Nº	Espessura (mm)						\bar{y}
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	
1	0,204	0,210	0,217	0,218	0,222	0,216	0,215 ± 0,004
2	0,242	0,236	0,222	0,245	0,234	0,216	0,233 ± 0,007
3	0,286	0,291	0,286	0,321	0,293	0,270	0,291 ± 0,010
4	0,274	0,259	0,236	0,268	0,251	0,234	0,254 ± 0,009
5	0,226	0,219	0,195	0,237	0,216	0,189	0,214 ± 0,011
6	0,257	0,260	0,240	0,256	0,250	0,239	0,250 ± 0,005
7	0,243	0,252	0,221	0,241	0,246	0,228	0,238 ± 0,007
8	0,226	0,216	0,180	0,235	0,210	0,178	0,207 ± 0,014
9	0,205	0,190	0,153	0,197	0,201	0,152	0,183 ± 0,014
10	0,193	0,175	0,160	0,199	0,177	0,145	0,175 ± 0,012
11	0,191	0,201	0,187	0,188	0,200	0,185	0,192 ± 0,004
12	0,266	0,214	0,181	0,255	0,235	0,188	0,223 ± 0,020
13	0,255	0,182	0,165	0,236	0,190	0,166	0,199 ± 0,022
14	0,196	0,175	0,132	0,195	0,166	0,128	0,165 ± 0,017
15	0,180	0,159	0,125	0,182	0,169	0,126	0,157 ± 0,015
16	0,212	0,220	0,177	0,220	0,223	0,178	0,205 ± 0,013

Com os resultados da espessura da luva para cada condição experimental, calcula-se os efeitos dos fatores e suas interações. Assim por exemplo, o efeito da concentração do coagulante (A), calcula-se como a diferença média dos resultados observados da espessura, quando a concentração se move do nível real baixo para o nível real alto. Generalizando, pode-se dizer que o efeito principal de uma variável de processo sobre a variável de resposta, que é a espessura da luva, é a diferença entre a média dos resultados obtidos no nível alto e a média dos resultados obtidos no nível baixo. Duas variáveis, interagem se o efeito de uma delas é diferente nos dois níveis da outra variável. A interação entre duas variáveis é, portanto, definida como a metade da diferença entre o efeito principal de uma no nível alto, e o efeito principal da outra no nível baixo.

Tabela 13 - O planejamento fatorial fracionado, 2^{5-1}_V

Ordem	Níveis reais ¹					Níveis codificados					(\bar{y})	
Y ²	AI ³	A	B	C	D	E	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	(mm)
1	14	8	30	3	3	10	-1	-1	-1	-1	+1	0,165
2	5	19,7	30	3	3	2,5	+1	-1	-1	-1	-1	0,214
3	9	8	80	3	3	2,5	-1	+1	-1	-1	-1	0,183
4	2	19,7	80	3	3	10	+1	+1	-1	-1	+1	0,233
5	15	8	30	10	3	2,5	-1	-1	+1	-1	-1	0,157
6	8	19,7	30	10	3	10	+1	-1	+1	-1	+1	0,207
7	10	8	80	10	3	10	-1	+1	+1	-1	+1	0,175
8	1	19,7	80	10	3	2,5	+1	+1	+1	-1	-1	0,215
9	16	8	30	3	12	2,5	-1	-1	-1	+1	-1	0,205
10	6	19,7	30	3	12	10	+1	-1	-1	+1	+1	0,250
11	12	8	80	3	12	10	-1	+1	-1	+1	+1	0,223
12	3	19,7	80	3	12	2,5	+1	+1	-1	+1	-1	0,291
13	13	8	30	10	12	10	-1	-1	+1	+1	+1	0,199
14	7	19,7	30	10	12	2,5	+1	-1	+1	+1	-1	0,238
15	11	8	80	10	12	2,5	-1	+1	+1	+1	-1	0,192
16	4	19,7	80	10	12	10	+1	+1	+1	+1	+1	0,254

¹ Variáveis definidas no item 3.1.3.2 e mostradas na Tabela 11.

² Ordem de Yates.

³ Aleatoria.

Foi utilizada uma maneira sistemática que facilita os cálculos dos efeitos. Construiu-se uma tabela de sinais (Tabela 14) da seguinte maneira: primeiro começa-se com uma coluna de sinais +, intitulada de I, que é necessária para o cálculo da média dos resultados. As próximas cinco colunas de sinais correspondem aos níveis codificados das cinco variáveis escritos na ordem padrão de Yates. As colunas correspondentes às interações de duas variáveis (AB, AC, ..., CE, DE) são obtidas pela multiplicação dos respectivos sinais, linha por linha. Na última coluna são colocados os valores médios da espessura da luva, \bar{y} . Na última linha são escritos os divisores, que são o número de sinais + da respectiva coluna.

Os efeitos foram obtidos, multiplicando-se a coluna da espessura pela coluna de sinais correspondente ao efeito a ser estimado e dividido pelo respectivo divisor. Por exemplo, as estimativas dos efeitos de A e de AB na variável resposta são obtidas assim:

$$A = \frac{1}{8}(-0,165 + 0,214 - 0,183 + 0,232 - 0,157 + 0,208 - 0,175 + 0,215 - 0,205 + 0,250 - 0,223 + 0,291 - 0,199 + 0,240 - 0,192 + 0,254) = 0,0503$$

Tabela 14 - Matrix para obtenção dos efeitos no planejamento fatorial fracionado, 2^{5-1}_V

I	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE	(\bar{y})
+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	0,165
+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0,214
+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	0,183
+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	0,233
+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,157
+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	0,207
+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	0,175
+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	0,215
+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	0,205
+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	0,250
+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	0,223
+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	0,291
+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	0,199
+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	0,238
+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	0,192
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,254
16	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	Divisor

Tabela 15 - Estimativa dos efeitos

Efeitos	Estimativa
Média	0,212
$l_A \rightarrow A + BCDE$	0,050
$l_B \rightarrow B + ACDE$	0,016
$l_C \rightarrow C + ABDE$	-0,016
$l_D \rightarrow D + ABCE$	0,038
$l_E \rightarrow E + ABCD$	0,001
$l_{AB} \rightarrow AB + CDE$	0,004
$l_{AC} \rightarrow AC + BDE$	-0,002
$l_{BC} \rightarrow BC + ADE$	-0,008
$l_{AD} \rightarrow AD + BCE$	0,003
$l_{BD} \rightarrow BD + ACE$	0,001
$l_{CD} \rightarrow CD + ABE$	-0,006
$l_{AE} \rightarrow AE + BCD$	-0,005
$l_{BE} \rightarrow BE + ACD$	-0,001
$l_{CE} \rightarrow CE + ABD$	0,007
$l_{DE} \rightarrow DE + ABC$	-0,002

$$AB = 1/8(+ 0,165 - 0,214 - 0,183 + 0,232 + 0,157 - 0,208 - 0,175 + 0,215 + 0,205 - 0,250 - 0,223 + 0,291 + 0,199 + 0,240 - 0,192 - 0,254) = 0,0043$$

Por razões de rapidez e facilidade os efeitos foram calculados com o pacote estatístico STATGRAPH, e são apresentados na Tabela 15.

Avaliação da significância dos efeitos: método gráfico

Existem várias maneiras de avaliar com segurança quais efeitos são realmente significantes [3], sobre a espessura da luva mas, neste trabalho, somente foi utilizado o método de probabilidade normal, porque é adequado para planejamentos com três ou mais variáveis e, onde é possível ocorrer interações de ordem mais elevada. Este método considera que os efeitos desprezíveis têm distribuição zero. Quando esses efeitos são colocados no gráfico de probabilidade normal (Figura 7) eles tenderão a se agrupar em uma linha reta que passa pelo ponto (0,0). Os efeitos significativos terão médias diferentes de zero e estarão afastados da linha reta.

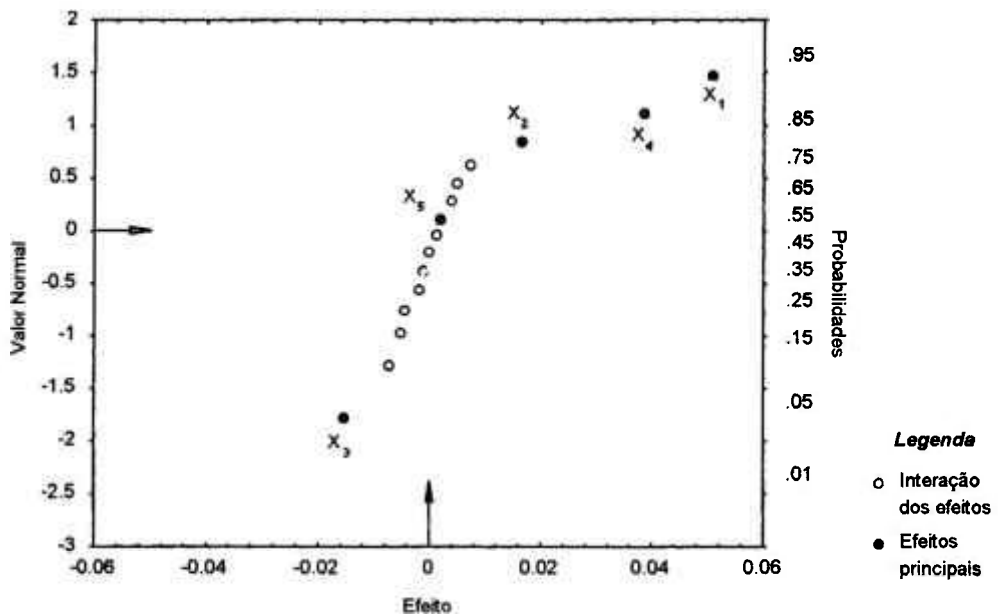


Figura 7 - Gráfico de probabilidade normal dos efeitos estimados ($\sigma = 0,035$)

Observa-se na Figura 7 que, dos 15 efeitos estimados, 11 deles se ajustam razoavelmente como uma linha reta passando pelo ponto (0,0). São considerados não significativos. Os demais, x_1 , x_2 , x_3 , e x_4 , afastados da reta, são significativos. Isto é, a variável x_1 (concentração do coagulante) apresenta um grande efeito sobre a espessura da luva: há um aumento de 0,05 mm, em média, na espessura quando a concentração do coagulante varia de 8% para 19,7%. A variável x_4 (tempo de permanência do molde imerso no látex irradiado) também apresenta um efeito significativo sobre a espessura da luva. Observa-se um aumento de 0,04 mm na espessura, em média, quando o molde fica imerso 9 segundos a mais, isto é, passa de 3 s para 12 s. As variáveis x_2 (temperatura do molde, quando ele é imerso no látex) e x_3 (tempo de escoamento do coagulante da superfície do molde, quando o molde sai da solução coagulante) apresentam o mesmo efeito, porém, de sinal contrário: o sinal - indica que existe uma redução de 0,02 mm, em média, na espessura quando o tempo de escoamento passa de 3 s para 10 s, ou seja, a saída do molde se faz mais devagar. Isto pode ser explicado assim: quando a saída do molde da solução coagulante é rápida, arrasta, um excesso de coagulante, permitindo maior depósito de borracha. Quando é lenta a saída do molde da solução coagulante há tempo para que o coagulante escorra pela superfície do molde e permita um menor depósito de borracha. O sinal + indica que existe um aumento de 0,02 mm, em média, na espessura quando a temperatura do molde, antes de ser imerso no látex, passa de 40 °C para 80 °C. Portanto, os efeitos das variáveis x_2 e x_3 podem ser anulados, quando são variados, proporcionalmente, dentro da faixa experimental estudada. A espessura não é afetada pela velocidade de saída do molde de látex, na faixa experimental estudada.

Correlação da espessura

Neste ítem, os níveis codificados das cinco variáveis, que influenciam a espessura da luva, serão correlacionados com os valores de espessura da luva, obtidos a partir do planejamento fatorial (Tabela 13). O modelo de ajuste das variáveis codificadas obedece a equação de um polinômio de primeiro grau do tipo:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \varepsilon \quad (27)$$

onde: \hat{y} representa os valores de espessura estimados pelo modelo; $x_1, x_2, x_3, x_4,$ e x_5 são os níveis codificados para as variáveis A, B, C, D e E; β_i representa os coeficientes de regressão e, ε representa o desvio padrão ou erro devido ao ajuste.

Os cálculos dos coeficientes de regressão foram realizados utilizando o pacote estatístico STATGRAPH, e são apresentados na Tabela 16. O coeficiente de determinação de ajuste do modelo adotado é de 0,957, e o erro calculado por esse modelo é 0,009.

Os valores baixos dos níveis de significância, p , indicam que os coeficientes das variáveis codificadas x_1, x_2, x_3, x_4 são significativos. Observa-se, também, que esses coeficientes correspondem à metade dos efeitos das variáveis A, B, C, D e E detetados pelo método gráfico (Tabela 15). Esse fator $\frac{1}{2}$ se deve ao fato do efeito ser definido como a diferença na resposta quando varia-se o fator do nível -1 para +1, o que corresponde a uma variação de 2 unidades. O coeficiente de regressão é, no entanto, a alteração em y quando a variável codificada varia em uma unidade.

Tabela 16 - Coeficientes de regressão para um modelo linear

Variáveis	Coefficiente	σ	p^1
Constantes	0,212	0,002	0,000
A	0,025	0,002	0,000
B	0,008	0,002	0,005
C	-0,008	0,002	0,005
D	0,019	0,002	0,000
E	0,001	0,002	0,753

¹nível de significância.

Esse método é muito útil porque permite correlacionar, através de modelos de regressão, os valores de espessura, obtidos com as variáveis que influenciam sobre ela. Portanto, substituindo os valores dos coeficientes de regressão na equação 27 obtem-se a seguinte equação:

$$\hat{y} = 0,213 + 0,025 x_1 + 0,008 x_2 - 0,008 x_3 + 0,019 x_4 + 0,0007 x_5 \quad (28)$$

Analisando a equação 28, o terceiro e o quarto elementos da regressão se compensam no mesmo nível por terem coeficientes iguais e de sinal contrário, podendo ser eliminados. O último elemento pode ser desprezado, por ter coeficiente muito pequeno, e faria variar a espessura em dez milésimos de milímetro. Então a equação 28 pode ser escrita assim:

$$\hat{y} = 0,213 + 0,025 x_1 + 0,019 x_4 \quad (29)$$

onde: \hat{y} representa as estimativas da espessura da luva cirúrgica dada em mm; x_1 e x_4 as variáveis codificadas correspondentes as variáveis A e D; 0,213 é o valor médio da espessura, em mm.

A equação 29 é uma equação matemática com duas variáveis que pode ser representada em coordenadas tridimensionais (Figura 8). A equação 28 é útil para controlar as variáveis quando se quer fabricar luvas cirúrgicas a nível industrial.

3.2.1.2 - Na secagem

A velocidade de secagem da borracha ou a taxa de evaporação da água em função do tempo, foi determinada através dos ensaios de secagem do filme [23], que consistem em registrar o peso do filme em intervalos regulares de tempo, até peso constante. A perda da umidade é determinada pela diferença entre os pesos do filme em cada intervalo de tempo. No ensaio de secagem do filme de borracha por convecção livre, o peso do filme seco foi de 2,2372 g e a sua espessura média foi de $0,235 \pm 0,034$ mm. Na convecção forçada, o peso do filme seco foi de 2,071 g e a sua espessura média foi de $0,201 \pm 0,020$ mm.

Para determinar a umidade que corresponde a cada ponto experimental diminuiu-se o peso da borracha úmida do peso da borracha seca e dividiu-se essa diferença pelo peso da borracha seca. Os resultados mostrados

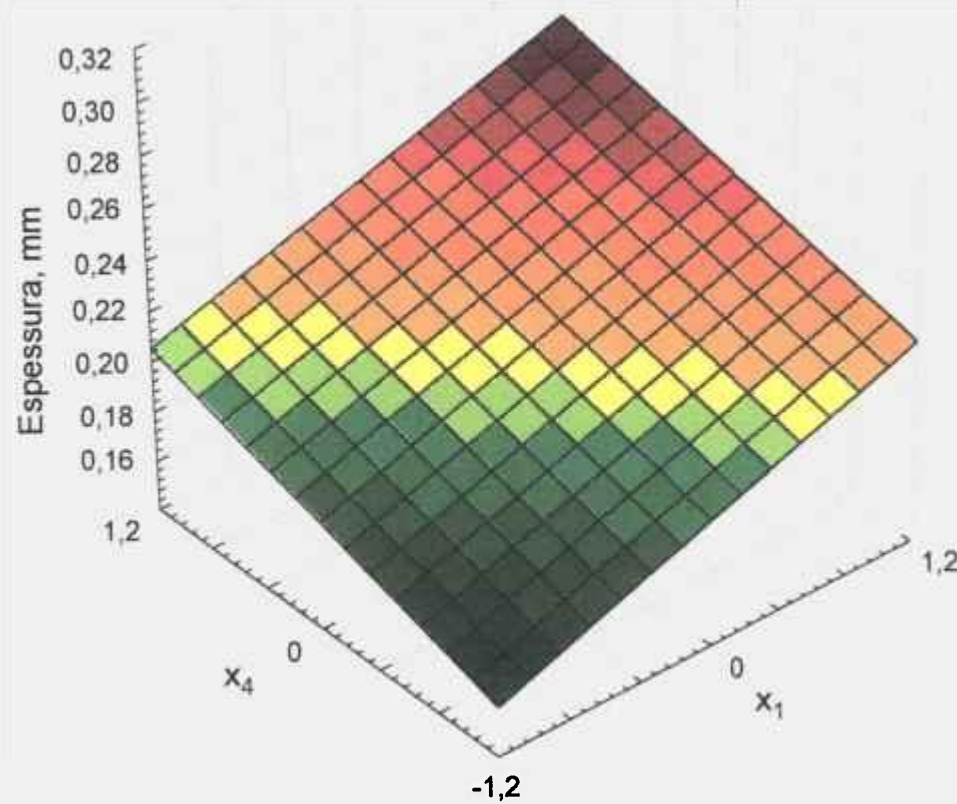


Figura 8 - Variação da espessura

na terceira coluna das Tabelas 17, 18, correspondem aos dois tipos de convecção. As curvas de umidade-tempo do filme de borracha coagulada, para cada tipo de convecção (Figura 9), mostram que a umidade decresce, inicialmente, de forma constante até atingir o valor constante da X^* . Na convecção livre $X^* = 0,0021$ e na convecção forçada $X^* = 0,0015$

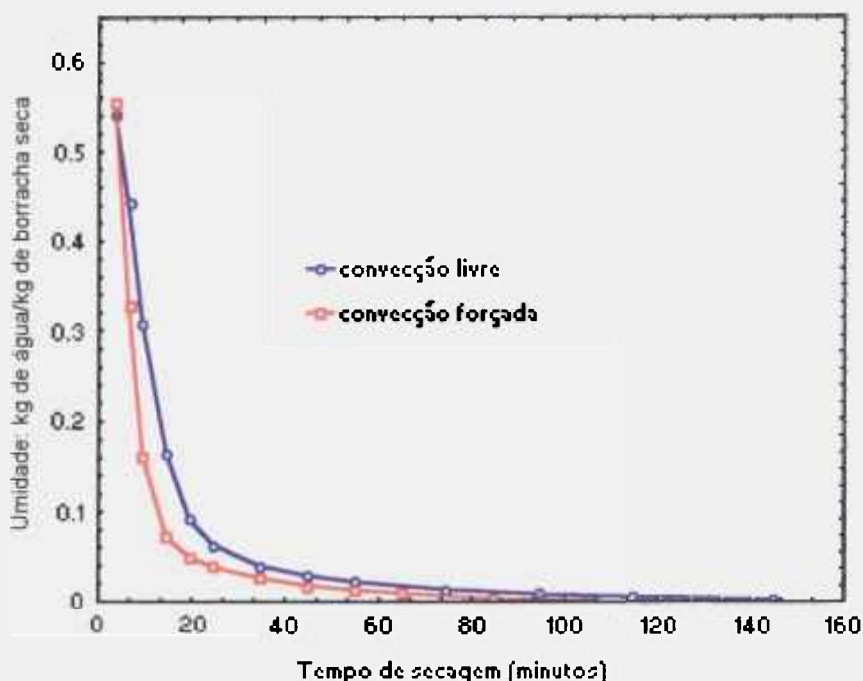


Figura 9 - Curvas de umidade-tempo para o filme de borracha

Por diferenciação tabular das colunas 1 e 3 das Tabelas 17 e 18, obtem-se a Figura 10, cujos valores são apresentados nas colunas 5 e 6 das mesmas tabelas. Nesta figura são mostradas as curvas da taxa de evaporação da umidade da borracha (w ou $dx/d\theta$), em função da umidade ainda presente no material. Observam-se vários intervalos semelhantes para ambos os tipos de convecção, onde o comportamento de secagem é diferente. O primeiro intervalo AB, que poderia não existir, corresponde ao período de indução, onde o mecanismo de secagem ainda não é estável. No segundo intervalo BC, onde a velocidade de secagem é considerada constante, quando a umidade atinge X_c (ponto C), ocorre uma queda acentuada até valores praticamente 0. A umidade

livre é nula porque a umidade da borracha atinge o equilíbrio com a umidade do ar.

Período ante-crítico

Observa-se também que X_c é praticamente igual para os dois ensaios de secagem 0,161, mostrando que a velocidade do ar não influencia a X_c da borracha, como a espessura do filme influencia a X_c , foi necessário fabricar os filmes, de tal maneira que a diferença de espessura fosse mínima. O valor obtido foi de 0,034 mm.

Tabela 17 - Dados de umidade-tempo para convecção livre

Tempo, (θ) (minutos)	Peso (g)	Umidade (X)	-dx	d θ	(-dx/d θ) minutos ⁻¹
0	3,7395	0,6715	---	---	---
3	3,4515	0,5428	0,1287	3	0,042900
6	3,1815	0,4421	0,1007	3	0,040200
9	2,9270	0,3083	0,1338	3	0,037900
14	2,6032	0,1636	0,1447	5	0,028900
19	2,4413	0,0912	0,0724	5	0,014500
24	2,3797	0,0637	0,0270	5	0,005500
34	2,3266	0,0400	0,0237	10	0,002400
44	2,3021	0,0290	0,0110	10	0,001100
54	2,2866	0,0221	0,0069	10	0,000700
74	2,2670	0,0133	0,0088	20	0,000400
94	2,2561	0,0085	0,0048	20	0,000200
114	2,2491	0,0053	0,0032	20	0,000160
144	2,2433	0,0027	0,0026	30	0,000087

O período ante-crítico para ambas as convecções é considerado o intervalo BC, onde a taxa de evaporação (dx/d θ), dada em minutos⁻¹, não é constante com a umidade, porque há pouca umidade superficial. Entretanto essa variação se aproxima da linearidade. Para a convecção forçada essa variação obedece a seguinte equação de correlação:

$$dx/d\theta = 0,04305 + 0,0906 X \quad (30)$$

Para a convecção livre a variação é menos acentuada e obedece a seguinte equação de correlação:

$$dx/d\theta = 0,03124 + 0,0211 X \quad (31)$$

Substituindo-se o valor de X_c nas equações 30 e 31, calcula-se o valor da taxa de secagem para X_c . Na convecção forçada a taxa de evaporação de $0,0576 \text{ minutos}^{-1}$ é maior que na convecção livre, cujo valor é de $0,0346 \text{ minutos}^{-1}$. A duração dos períodos de secagem ante-crítico, deduzida por interpolação das Tabelas 17 e 18, são 9,01 minutos para a convecção forçada e 14,18 minutos para a convecção livre.

Tabela 18 - Dados de umidade-tempo para convecção forçada

Tempo, (θ) (minutos)	Peso (g)	Umidade (X)	-dx	d θ	(-dx/d θ) minutos ⁻¹
0	3,7967	0,8333	—	—	—
3	3,2231	0,5563	0,2770	3	0,09230
6	2,7531	0,3294	0,2269	3	0,07560
9	2,4048	0,1612	0,1682	3	0,05610
14	2,2196	0,0718	0,1434	5	0,01790
19	2,1730	0,0493	0,0225	5	0,00450
24	2,1506	0,0384	0,0109	5	0,00220
34	2,1252	0,0262	0,0122	10	0,00120
44	2,1083	0,0180	0,0082	10	0,00080
54	2,0970	0,0126	0,0054	10	0,00050
64	2,0894	0,0089	0,0037	10	0,00040
84	2,0788	0,0038	0,0051	20	0,00030
104	2,0741	0,0015	0,0023	20	0,00010

A velocidade de secagem no ponto crítico pode ser calculada a partir desses valores, para cada tipo de convecção, através da equação 16. Na convecção forçada, $S/A = 2,071/180 = 0,0115 \text{ g/cm}^2$ e $w_c = 0,0576 \times 0,0115 = 0,000662 \text{ g/(minuto.cm}^2)$ ou $0,397 \text{ kg/(h.m}^2)$. Na convecção livre, $S/A = 2,237/180 = 0,0124 \text{ g/cm}^2$ e $w_c = 0,0346 \times 0,0124 = 0,000429 \text{ g/(minutos.cm}^2)$ ou $0,257 \text{ kg/(h.m}^2)$.

Os ensaios de secagem em condições constantes são muito importantes, porque, a partir deles obtêm-se representações gráficas, como as das Figuras 9 e 10, que dão uma idéia aproximada do mecanismo de secagem da borracha. Auxilia também no conhecimento dos valores das constantes de secagem no período ante-crítico, com boa precisão, como a velocidade ante-crítica de secagem e X_c da borracha nas condições experimentais. Também é possível correlacionar esses valores com os de diferentes condições. Pode-se mudar: a temperatura de secagem, a umidade do meio de secagem e a velocidade do ar, além das espessuras dos artefatos. Convém lembrar que a X_c está associada com a espessura da borracha.

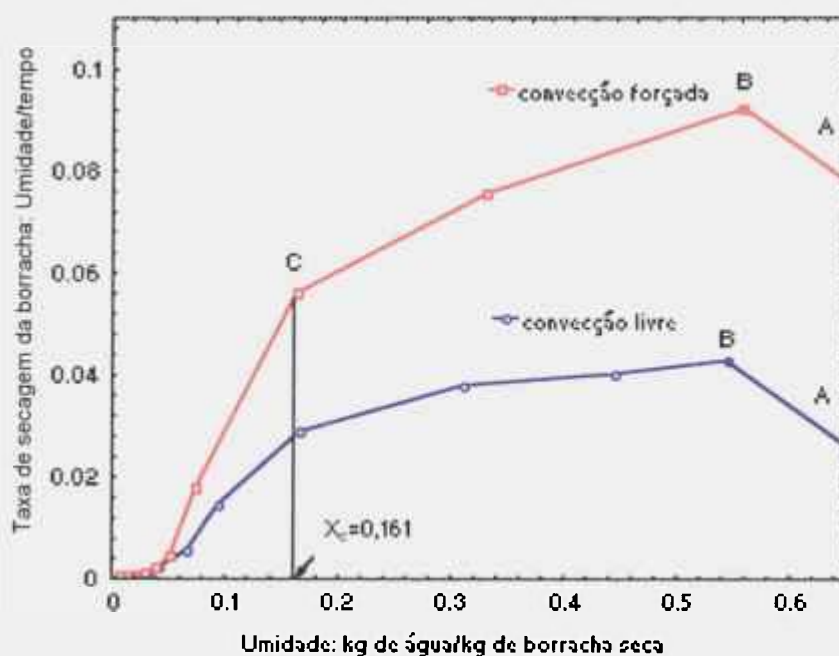


Figura 10 - Taxa de evaporação da umidade da borracha

Período pós-crítico

As curvas da Figura 10 não são apropriadas para determinar as leis de secagem do período pós-crítico. É melhor representar o logaritmo da umidade em função do tempo (Figura 11). Desta forma é possível conhecer o mecanismo de

secagem, como também, relacionar facilmente os resultados experimentais dimensioná-los para as condições de secagem a nível industrial.

No primeiro período de secagem pós-crítico, a linha que une os pontos experimentais é aproximadamente reta para ambos os tipos de convecção. O coeficiente angular, m , é dado por:

$$m = \frac{\log \frac{X - X^*}{X_0 - X^*}}{\Delta \theta} \quad (32)$$

onde X_0 é a umidade inicial do período pós-crítico.

Em condições constantes de secagem, uma vez determinado m , pode-se calcular a duração do período pós-crítico entre duas umidades quaisquer, utilizando a equação 32. Alterando o valor de m , em função do período ante-crítico e da espessura do material, a mesma equação é utilizada para avaliar períodos de secagem pós-crítico em outras condições.

Substituindo os valores de X_0 por $X_c = 0,161$ e X^* por $0,0021$ na equação 32 e considerando as umidades correspondente, o tempo final desse primeiro período que ocorre 64 minutos após o início da secagem para a convecção forçada $m = -0,00462 \text{ minutos}^{-1}$ e a equação é:

$$\theta = -0,004625 \log \frac{X - X^*}{X_0 - X^*} \quad (33)$$

Para a convecção livre $m = -0,00257 \text{ minutos}^{-1}$ e a equação é:

$$\theta = -0,002574 \log \frac{X - X^*}{X_0 - X^*} \quad (34)$$

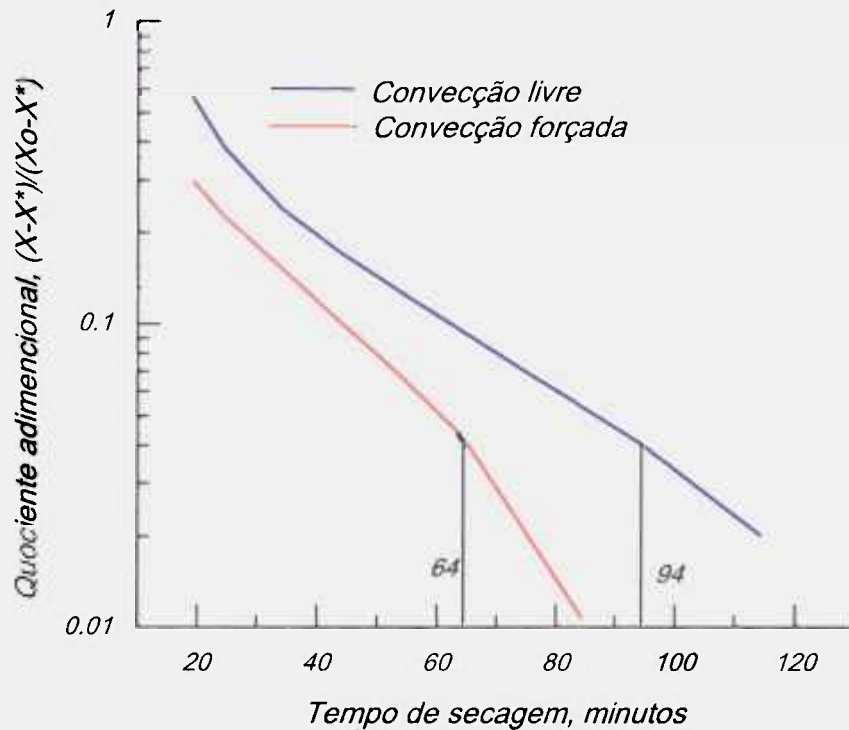


Figura 11 - Representação mono-logarítmica da secagem no período pós-crítico

Nas equações 33 e 34, θ é o tempo de secagem pós-crítico até a umidade X , medido a partir de 9,01 minutos, que é a duração do período ante-crítico, para convecção forçada e 14,18 minutos, que é a duração do período ante-crítico, para convecção livre. Portanto, a duração do primeiro período pós crítico será então de $64 - 9,01 = 54,99$ minutos para convecção forçada e $94 - 14,18 = 79,82$ minutos para convecção livre.

3.2.2 - PROPRIEDADES E ESTERILIZAÇÃO

Segundo o "Manual de Esterilização de Suprimentos Médicos por Radiação", preparado pela AAMI [28], estabelece que 25 kGy é uma boa dose de esterilização. Para doses menores que 25 kGy deve ser considerado o nível desejado de esterilidade. Por outro lado, pesquisas realizadas nos Estados Unidos, demonstram que a dose de esterilização foi significativamente menor que 25 kGy, porque o volume de suprimentos médicos esterilizados nos últimos anos foi muito grande. Entretanto não ocorreu nenhuma evidência de infecção nos

pacientes [28]. Membros da AIEA, ligados ao desenvolvimento desse processo alternativo, informaram em discussões científicas, que a dose de esterilização utilizada é em torno de 10 kGy, para evitar uma degradação acentuada da luva. Portanto, neste trabalho, as doses de esterilização escolhidas foram de 10 kGy e 25 kGy. Nenhum ensaio para avaliar a eficiência da radioesterilização foi feito. Apenas as propriedades mecânicas foram avaliadas.

As propriedades mecânicas das luvas cirúrgicas fabricadas pelo processo alternativo, na presença de An-B, são comparadas com as das fabricadas pelo processo térmico convencional, na presença de enxofre. Avalia-se também a possibilidade de esterilizar as luvas cirúrgicas com raios gama, em função de suas propriedades mecânicas. Os resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Propriedades mecânicas das luvas esterilizadas

Propriedades	PTC ¹	Processo alternativo		
		0 kGy	10 kGy	25 kGy
Deformação permanente, %	3,40	6,30	9,20	13,30
Alongamento de ruptura, %	920,00	946,00	965,00	972,00
Resistência à tração, MPa	25,82	26,85	20,35	13,59
Módulo a 500%, MPa	1,56	1,02	0,72	0,65
Rasgo angular, kgf/cm	74,00	48,00	62,00	57,00

¹ Processo térmico convencional.

As luvas cirúrgicas fabricadas pelo processo alternativo apresentam propriedades semelhantes às fabricadas pelo processo convencional. A DP de 6,3 é ligeiramente maior e o RA de 48 kgf/cm é cerca de 1,5 vezes menor. Entretanto a RT de 26,85 MPa é ligeiramente maior. A RT das luvas fabricadas por ambos os processos atingem valores maiores que 24 MPa que é o mínimo exigido pela norma ASTM D 3577-78a.

Observa-se também que o efeito da esterilização nas luvas cirúrgicas fabricadas pelo processo alternativo, influi negativamente nas propriedades mecânicas, porque a RT apresenta uma queda de 24% quando as luvas são esterilizadas a 10 kGy, de 26,85 MPa para 20,35 MPa e 50% quando as luvas

são esterilizadas a 25 kGy, de 26,85 MPa para 13,59 MPa. Esses valores são muito inferiores ao mínimo exigido pela norma.

Após o envelhecimento das luvas não esterilizadas, obtidas por ambos os processos de vulcanização, observa-se que ocorrem alterações mais significantes em suas propriedades mecânicas (Tabela 20). Entretanto, quando as luvas são fabricadas pelo processo alternativo, radioesterilizadas e envelhecidas a RT sofre uma queda bastante acentuada, de 26,85 MPa para 12,13 MPa quando esterilizada a 10 kGy, e para 10,62 MPa quando esterilizada a 25 kGy, demonstrando que o látex, formulado não resiste a uma dose total de 20 kGy ou de 35 kGy.

Tabela 20 - Propriedades mecânicas das luvas esterilizadas e envelhecidas

Propriedades	PTC ¹	Processo alternativo		
		0 kGy	10 kGy	25 kGy
Deformação permanente, %	3,60	7,20	12,80	13,15
Alongamento de ruptura, %	932,00	973,00	1020,00	1000,00
Resistência à tração, MPa	25,03	25,43	12,13	10,62
Módulo a 500%, MPa	1,29	0,95	0,78	0,71
Rasgo angular, kgf/cm	41,00	45,00	32,00	21,00

¹ Processo térmico convencional.

3.3 - CONCLUSÕES

Na fabricação de luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante a partir de látex vulcanizado com raios gama, concluímos que, a espessura da luva varia linearmente, com a concentração da solução coagulante e com o tempo de saída do molde do látex. Esta relação matemática muito útil para a indústria, foi obtida a partir de métodos estatísticos, aplicados tanto no planejamento experimental (planejamento fatorial fracionado) como na análise de resultados. A equação é a seguinte: $\hat{y} = 0,213 + 0,025 [\text{CaCl}_2] + 0,019 t$.

O efeito da temperatura do molde, quando ele é imerso no látex e o efeito do tempo de escoamento do coagulante da superfície do molde,

demonstraram ser iguais mas de efeitos contrários. Seus efeitos são compensados. Essa característica compensatória permanece, se as variáveis variam proporcionalmente dentro da faixa experimental estudada. Com um só ciclo de imersão obteve-se uma espessura máxima de 0,2476 mm. A estimativa dos efeitos demonstrou que as variáveis estudadas são independentes, não existindo interação entre elas. A velocidade de saída do molde do látex não interfere na espessura da luva. Isto significa que pode-se defini-la segundo as condições de processamento mais convenientes.

Os ensaios de secagem feitos sobre o filme de borracha coagulada, depositada sobre uma placa de vidro pelo método de imersão com coagulante a partir do látex vulcanizado com raios gama, mostra que inicialmente a velocidade de secagem não é constante. Isto indica que existe pouca umidade superficial. Entretanto se aproxima de uma relação linear, sugerindo que o mecanismo de secagem predominante, talvez seja por difusão capilar do interior do filme.

Outro fato que indica a existência de pouca umidade superficial, são os valores de velocidade de evaporação calculada no ponto crítico, que foi de 0,3976 kg/h.m² para convecção forçada e de 0,2583 kg/h.m² para convecção livre. Isto indica que no período ante-crítico pode-se remover maior quantidade de água quando a secagem for feita por convecção forçada. A umidade crítica da borracha atinge um valor de 0,161 para filmes menores que 0,2 mm de espessura. Para umidades menores à crítica, ou seja, para umidades que estão dentro do período pós-crítico, a velocidade de secagem ocorre pela evaporação da água sobre uma parte da superfície útil total, diminuindo essa fração à medida que transcorre a secagem. Na projeção industrial esses dados são úteis, porque a partir deles, foi possível encontrar as equações de correlação do período pós-crítico que podem ser utilizados para determinar os parâmetros de desenho de secadores a grande escala.

As luvas cirúrgicas fabricadas pelo método de imersão com coagulante a partir do látex vulcanizado com raios gama, atingiram o valor de RT de 26,85 MPa, contra 25,82 MPa fabricadas pelo processo térmico convencional com enxofre. Após o envelhecimento, as mesmas luvas obtiveram um valor de RT de 25,43 MPa contra 25,03 MPa do processo convencional. Esses resultados mostram que o antioxidante Winstay-L fornece boa resistência térmica a artefatos

de espessuras até 1 mm. Observa-se também que o efeito da esterilização nas luvas cirúrgicas fabricadas pelo processo alternativo de vulcanização com raios gama com doses totais de 20 kGy e 35 kGy influi negativamente na RT da borracha. Uma queda de 24% e 50% da RT quando as luvas são esterilizadas a uma dose de 10 e 25 kGy, demonstra um alto grau degradativo da borracha irradiada. Este fato mostra a necessidade de desenvolver formulações para o látex que promovam uma maior resistência radiolítica no artefato radioesterilizado.

Os resultados experimentais obtidos neste Capítulo mostram que as luvas cirúrgicas fabricadas pelo processo alternativo, podem ser comercializadas desde que sejam esterilizadas por um processo diferente da radioesterilização, usando o calor ou óxido de etileno como agentes de esterilização.

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Como foi visto no Capítulo 3, o processo alternativo de vulcanização do látex induzido com raios gama, apresenta vantagens, comparado com o processo térmico convencional porque produz artefatos com melhores qualidades relativas aos aspectos de saúde, toxicológicos e ambientais. Esse processo também apresenta algumas vantagens econômicas que serão mostradas neste Capítulo.

Recentemente, as pesquisas para tornar economicamente vantajoso o processo alternativo de vulcanização do látex, tem se acentuado, em três aspectos importantes: melhorar a qualidade dos artefatos, desenvolver irradiadores de baixo custo e diminuir os custos do radiosensibilizador. Cálculos econômicos, realizados recentemente no Japão, mostraram que doses menores que 10 kGy, tornam o processo alternativo competitivo com o processo térmico convencional [2, 17]. Assim, com o propósito de mostrar as características econômicas do processo alternativo, nas condições brasileiras, é que foi realizado neste Capítulo uma avaliação econômica, com o propósito de substituir o processo convencional pelo processo alternativo de vulcanização do látex.

A avaliação econômica foi realizada estabelecendo as seguintes condições de processamento, baseada na experiência de outros pesquisadores: a planta piloto projetada será utilizada para irradiar somente látex, cuja densidade é de $0,98 \text{ g/cm}^3$, com raios gama proveniente de uma fonte de ^{60}Co , tipo esteira, com uma dose de 10 kGy, na presença de 3 phr de An-B / 0,2 phr de KOH; o tipo de estocagem da fonte será úmido-submergível, com atividade máxima de 100 kCi de ^{60}Co ; a formulação e a irradiação do látex serão feitas por batelada, cuja capacidade de cada uma será de 1.340 kg; o tempo de exposição calculado neste trabalho, para atingir a dose de 10 kGy será de 11,4 horas [13, 14, 38]; o fator de eficiência ou fração da energia da radiação da fonte que é absorvida pelo produto será de 0,2 [5]; a eficiência de utilização da fonte será de 91% das horas

anuais ativas, com um total de 8.000 horas [12], repartidos em 3 turnos diários, cuja capacidade total de irradiação será de 117,54 kg de látex por hora. Outras condições serão indicadas nos cálculos.

Nas condições acima foram estimados os seguintes parâmetros econômicos: o investimento de capital para montar uma fábrica de luvas cirúrgicas que utiliza o processo de vulcanização do látex de borracha natural com raios gama; os custos de irradiação do látex nas condições econômicas brasileiras, o qual foi comparado com os custos de irradiação de outros países; e os custos de fabricação que foram comparados com os custos de fabricação do processo convencional, fornecidos por uma fábrica de luvas cirúrgicas de médio porte, com uma capacidade diária de 11.000 pares, operando em 3 turnos. Por último foram feitas as avaliações econômicas para quatro opções comerciais, através de indicadores econométricos calculados, tais como, o ponto de equilíbrio e a taxa interna de retorno, que permitem realizar uma análise comparativa e concluir qual a melhor opção.

4.1 - ASPECTOS TEÓRICOS

Uma avaliação econômica é um conjunto de estimativas. Sabendo que, uma estimativa é uma previsão do futuro e, como ninguém pode prevê-lo com exatidão, essa estimativa não se torna a realidade futura, mas será próxima dela. Entretanto todas as estimativas obtidas neste trabalho, foram baseadas na experiência de uma planta piloto em operação desde 1983, em Jakarta / Indonésia [38], de usinas de conservação de alimentos e de esterilização de produtos médicos e farmacêuticos que utilizam a radiação gama.

Noções sobre os aspectos teóricos básicos que permitem uma avaliação econômica do processo de fabricação de luvas cirúrgicas pelo processo alternativo de vulcanização serão apresentados em seguida, onde se discutirá o dimensionamento industrial da fonte de ^{60}Co , os principais parâmetros econômicos e os critérios de avaliação econômico utilizados.

4.1.1 - Fonte de irradiação

Os irradiadores gama podem ser clasificados em diversos tipos conforme o critério escolhido, que pode ser em função da geometria, da utilização ou do tipo de mecanismo, (processo em batelada ou contínuo, etc). De forma genérica um irradiador gama consiste de uma fonte radioativa, de uma área de armazenamento da fonte, de um mecanismo de exposição, de um sistema de transporte do material para dentro e para fora da área de irradiação, de uma blindagem e de um sistema de manuseio do produto. A fonte e a estrutura de transporte do produto são desenhados para manter uma eficiência ótima de irradiação e uma dose uniforme.

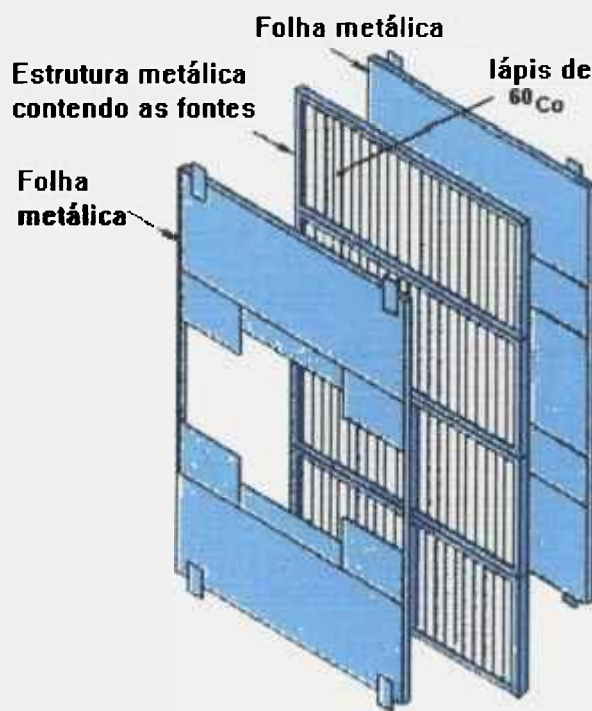


Figura 12 - Arranjo de uma fonte de ^{60}Co [47]

A fonte de ^{60}Co é a mais utilizada industrialmente, devido a alta energia dos raios gama (1,17 - 1,33 MeV) e uma meia vida de 5,3 anos [47]. As fontes comerciais consistem de pastilhas do metal de cobalto que são duplamente encapsuladas, tomando a forma de um cilindro de 0,5 x 18 polegadas [47],

chamadas de fonte tipo lápis. A máxima atividade específica teórica é aproximadamente de 1.200 Ci/g [47]. Um desenho típico de uma fonte estendida consiste de um arranjo em paralelo dos lápis contidos em uma estrutura metálica. Esse desenho é ilustrado na Figura 12. Embora o tipo de irradiador úmido, onde a fonte é blindada por 6 m de água em uma piscina, é mais caro quando comparado com o irradiador cuja blindagem é seca (chumbo), devido aos custos de purificação da água para garantir ótimos valores de condutividade, pH e temperatura, é, entretanto o mais usado porque apresenta uma boa flexibilidade na alteração do arranjo da fonte.

Penetração dos raios gama

Os raios gama provenientes dessa fonte são mais penetrantes do que um feixe de elétrons proveniente de um acelerador. Quase 75% da energia dos raios gama é absorvida nos primeiros 30 cm de água. Embora a irradiação com feixe de elétrons seja mais barata do que a irradiação com raios gama, a limitada penetração dos elétrons a faz menos utilizada. Assim, por exemplo: um feixe de elétrons com uma energia de 10 MeV pode ter um poder de penetração de $3,2 \text{ g/cm}^2$. Isto significa que somente se podem irradiar materiais com massa específica inferior a $3,2 \text{ g/cm}^2$, que é igual a densidade multiplicada pela espessura do material. Raios gama, com a mesma energia de 10 MeV, têm poder de penetração dez vezes maior, de 31 g/cm^2 [45]. Raios gama com energia média de 1,25 MeV, provenientes da fonte de ^{60}Co , tem um poder de penetração na água, de aproximadamente 12 g/cm^2 [45]. Portanto, pode-se irradiar materiais de densidade de 1 g/cm^3 , até com 12 cm de espessura. Outro recurso adotado para materiais com até o dobro da espessura de penetração é irradiá-los em ambos os lados, para garantir a penetração em todo o material. Outra possibilidade para líquidos é agitá-los durante a irradiação, para garantir doses homogêneas e as necessárias.

A partir da taxa de dose da fonte é possível determinar o tempo necessário de irradiação do material. A equação 35 calcula a taxa de dose (TD), em água, de uma fonte puntiforme de ^{60}Co , dada em kGy/h [5].

$$TD_{\infty Co} = \frac{1,25 \times 10^{-1} \times C}{R^2} [B_0 \times e^{(-0,063 \times r)}] \quad (35)$$

onde:

C = atividade de um elemento da fonte, em Ci.

R = distância da fonte, em cm.

B₀ = é o fator de acumulação da dose,.

r = espessura do material, em cm.

O fator de acumulação da dose, dependente da energia do fóton e da espessura do material. E pode ser calculado segundo a equação 36 [5].

$$B_0 = 1 + k \times 0,063 \times r \quad (36)$$

onde, k é a relação entre a espessura do material e o poder de penetração na água, que depende da energia dos raios gama. O poder de penetração dos raios gama no material, a sua quantidade e a taxa de dose da fonte são parâmetros importantes para dimensioná-la.

4.1.2 - Teoria econômica

A gestão econômica de uma empresa se divide em duas partes: a gestão interna, que é a tomada de decisões dentro da empresa e, a gestão externa, que trata da interação entre a empresa e o meio externo. Neste trabalho somente será tratado da gestão interna da empresa, enfocando alguns conhecimentos mínimos indispensáveis. São abordadas noções gerais sobre custos e sobre os principais parâmetros econômicos utilizados, como o tempo de retorno de investimento de capital, o ponto de equilíbrio e a estimativa de investimento.

Custos totais

A base de toda a gestão econômica de uma empresa é o conhecimento total dos custos, os quais podem ser divididos genericamente em custos de produção, que são aqueles ligados à produção que podem se chamar de custos totais e, os demais custos não ligados à produção, como por exemplo, os custos administrativos.

Os custos totais (CT), por sua vez, podem ser divididos em dois grupos: custos variáveis (CV), que dependem diretamente do nível de produção e, custos fixos (CF), que permanecem constantes independentemente do nível de produção. Estas despesas fixas, por sua vez, são de duas naturezas: aquelas que são fixas para um determinado nível de produção e aquelas que são fixas em qualquer nível de produção.

Os custos de produção de um modo geral são subdivididos da seguinte forma:

- Matérias-primas principais
- Matérias primas secundárias
- Mão-de-obra de fabricação
- Utilidades
- Manutenção
- Embalagem
- Outras despesas

É preciso enfatizar que a constituição do custo de produção varia com a natureza do produto fabricado. As matérias-primas principais representam o maior custo e influenciam diretamente sobre o custo final do produto. Os custos de mão-de-obra considera os salários dos trabalhadores. No item "utilidades" podem ser consideradas despesas como a geração de vapor; a força elétrica, a água e o ar comprimido consumidos; etc. Neste caso, calcula-se primeiro o custo unitário de cada uma delas, como se fosse um produto fabricado, o qual é multiplicado pelo seu consumo por unidade de produto fabricado. Assim por

exemplo, o custo do vapor, é calculado separadamente, levando em conta as matérias-primas principais, secundárias, mão-de-obra, manutenção, etc., necessários à fabricação de uma tonelada de vapor. O custo da tonelada de vapor multiplicado pelo número de toneladas de vapor utilizado por tonelada de produto, dará então o custo de vapor por tonelada de produto. O custo de manutenção, que inclui materiais e mão-de-obra, necessários para o funcionamento de uma instalação, deve ser determinado da forma mais precisa possível. Porém, quando as informações sobre o custo de manutenção são poucas, é válido estimar o custo anual de manutenção como sendo uma fração do investimento, que varia de 4% a 10%, conforme a natureza da instalação. Outras despesas relacionadas diretamente com a fabricação são, o frete quando este é pago pelo fabricante do produto, o seguro da instalação quando é pago em separado para a unidade de produção e, o controle de qualidade quando este se refere exclusivamente a um produto determinado.

Assim os CV podem ser divididos genericamente em matérias-primas principais, matérias-primas secundárias, utilidades, despesas de embalagem. Porém os CF por nível de produção, podem ser mão-de-obra, manutenção e outras despesas. Os CF que não variam com qualquer nível de produção, no qual não se inclui nenhum dos elementos do custo de produção, podem ser aluguéis, aforamentos, etc.

Tempo de retorno de investimento do capital

O objetivo de todo empreendimento econômico resume-se em obter lucro, preferivelmente o maior possível, dentro do menor tempo possível e com o menor risco possível.

A avaliação econômica consiste em conhecer com a maior certeza possível as perspectivas de um investimento, isto é, a sua rentabilidade, a fim de poder comparar com outros investimentos possíveis. A base da avaliação de rentabilidade é o cálculo das entradas totais (ET) em caixa, resultantes do investimento. Porém, não só as entradas em caixa dão, por si só, uma descrição suficiente. Também devem ser considerados outros fatores como o tempo de

retorno do capital, as perspectivas a longo prazo do investimento, o valor do dinheiro em função do tempo, etc. Assim surgiram vários métodos de cálculo de rentabilidade levando em conta esses fatores. De uma maneira geral cada economista, seleciona aquele método que mais se adapta às suas necessidades. Entre os métodos mais comuns estão:

- a. Tempo de retorno do capital;
- b. Taxa interna de retorno;
- c. valor atual líquido;
- d. valor futuro líquido;
- e. valor atual líquido equivalente;
- f. taxa equivalente de retorno.

É necessário mencionar, que não existe uma maneira única de se calcular a rentabilidade de um investimento. Assim por exemplo, fazendo uma avaliação de um dado projeto, percebe-se que há maior rentabilidade segundo um método de cálculo e menor segundo outro. Por isso, a fim de que a decisão não seja subjetiva, é necessário que o método de cálculo adotado seja aquele que melhor se ajuste aos objetivos do projeto.

Independentemente do método de cálculo utilizado a avaliação da rentabilidade de um projeto é baseado nos seguintes fatores principais:

- evolução do preço de venda;
- evolução da quantidade vendida;
- evolução do custo das matérias primas principais;
- evolução dos custos de fabricação e de despesas gerais;
- montante do investimento físico, e
- montante do investimento em capital de giro.

Dentre esses fatores, existem dois, cuja previsão a longo prazo é particularmente difícil de calcular com exatidão, que são o preço de venda, e o preço de compra das principais matérias-primas. Por este motivo, o resultado de um cálculo de rentabilidade serve apenas como indicação de uma ordem de

grandeza, devendo ser tomado com cautela em função da hipótese de custos e de preços adotada.

Para calcular a rentabilidade das opções de investimento mencionadas neste trabalho, será utilizado o método de cálculo do tempo de retorno do capital (TRC), que é o período de tempo entre a entrada em funcionamento de uma instalação, e o momento de recuperação da quantia investida. Quanto mais curto este tempo, tanto mais atraente é o investimento. Este método de cálculo porém nada indica sobre o que acontece após este período, em que o investimento pode até mesmo tornar-se antieconômico. É um método simples e portanto, é largamente utilizado. Consiste simplesmente no cálculo do quociente entre o investimento do capital (IC) e a entrada em caixa líquida anual ou lucro (L), segundo a seguinte equação:

$$TRC = \frac{IC}{L} \quad (37)$$

Ponto de equilíbrio

A análise da sensibilidade ou do ponto de equilíbrio (PE) é uma técnica que pode ser gráfica ou algébrica. É amplamente utilizada devido a sua simplicidade e a sua capacidade para considerar a incerteza de estimativas particulares. Considera, geralmente, apenas uma estimativa por vez. Assim o PE é dado pela igualdade entre L e CT estimados, como representado na seguinte equação:

$$CT = CV + CF = L \quad (38)$$

Estimativa de investimentos e custos de irradiação

Pode-se estimar o investimento de capital de uma planta de irradiação, com raios gama provenientes de uma fonte de ^{60}Co , de tipo industrial úmida,

considerando o valor da fonte, dos prédios e do equipamento, que são necessários para operar essa planta. Porém, os custos de operação são estimados a partir dos CF e dos CV. Entre os CF considera-se a amortização do capital, os gastos referentes a juros, impostos e seguros. Entre os CV considera-se a reposição da fonte, a mão-de-obra requerida para operar a fonte, a manutenção da instalação, além dos custos de consumo de água, de energia e a dosimetria para controle de qualidade dos serviços que garante a eficácia do processo.

A somatória de todos os custos acumulados durante um ano de operação representa o custo anual (P), que é o custo mínimo para que a planta de irradiação possa operar sem interrupção. Quando P é dividido pela capacidade anual de irradiação, que é a vazão mássica ou a capacidade de irradiação em kg por hora (Q_i) multiplicado pela eficiência de utilização da fonte (91%), que representa as horas anuais ativas (T), calculada em 8.000 horas por ano [12], obtem-se o custo de irradiação por kg de produto (M):

$$M = \frac{P}{(Q_i \cdot T)} \quad (39)$$

A partir dessas informações básicas, em seguida serão realizados os cálculos necessários para obter as avaliações econômicas, do processo considerado neste trabalho e, discutí-las.

4.2 - CÁLCULOS E DISCUSSÃO

Os cálculos teóricos necessários são baseados no dimensionamento da capacidade de irradiação de uma suposta fábrica de luvas cirúrgicas que utilizaria o processo de vulcanização do látex induzido com raios gama de ^{60}Co , com DV de 10 kGy utilizando 3 phr de An-B e 0,2 phr de KOH como sistema de radiosensibilizador. A capacidade desta fábrica e o processo de fabricação das luvas pelo método de imersão com coagulante, é similar à de uma outra fábrica de luvas cirúrgicas qualquer, de médio porte que utiliza o processo térmico

convencional de vulcanização. Neste trabalho, o processo de irradiação do látex é considerado por batelada, porém a fabricação das luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante é considerada como uma operação contínua.

4.2.1 - Capacidade de irradiação e atividade da fonte de ^{60}Co

Em cada batelada 1.340 kg de látex formulado são irradiados no reator. As quantidades de reagentes são calculadas a partir da Tabela 6. O tempo de vulcanização, ou tempo total de exposição do látex no reator de irradiação, foi calculado, dimensionando o volume do reator, que foi considerado de aproximadamente de $1,7 \text{ m}^3$, com 1.800 mm de altura e 1.300 mm de diâmetro. Posteriormente foi calculada a TD no centro do reator, utilizando as equações 35 e 36, para atingir uma DV de 10 kGy. Desses cálculos obteve-se uma TD de 2,26 kGy/h e o tempo teórico de exposição de 11,4 horas. Assim, dividindo a quantidade de látex formulado por batelada, pelo tempo teórico de exposição, obtem-se Q_i de 117,54 kg/h, considerando a eficiência de utilização da fonte de 91%. A capacidade anual de irradiação ($Q_i T$) calculada será então de aproximadamente 940 toneladas.

A atividade da fonte pode ser calculada em função da dose requerida, que é de 10 kGy, da capacidade de irradiação que é de 117,54 kg/h. É importante considerar o fator de eficiência da fonte (F) que é a fração de energia absorvida, pelo látex, que não promove a reticulação. Segundo a literatura essa fração está entre 0,2 e 0,5 [5], A fração de energia absorvida pelo látex, considerada neste trabalho é de 0,2. Assim, substituindo na equação 40.

$$W_{^{60}\text{Co}} = 18,7 \times \frac{Q_i \times DV}{F} \quad (40)$$

onde, $W_{^{60}\text{Co}}$ é a atividade da fonte dada em Ci e, a constante representa o fator de conversão, quando a atividade é expressa em Ci.

Obtem-se portanto, a atividade da fonte requerida, que é de 109.899,9 Ci de ^{60}Co . Com a finalidade de facilitar os cálculos, a atividade da fonte é aproximada para 100 kCi.

4.2.2 - Investimento de capital

Os cálculos do IC são realizados considerando o projeto da instalação de uma fábrica de luvas cirúrgicas, que utiliza o processo alternativo de vulcanização, que preve um irradiador industrial de ^{60}Co tipo esteira, úmido, com uma atividade máxima de 100 kCi de ^{60}Co .

A Tabela 21 mostra os itens considerados para estimar o IC desta fábrica, projetada com uma capacidade de fabricação diária de 11.000 pares de luvas cirúrgicas e uma capacidade de irradiação da fonte de 117,54 kg/h. Esses itens foram organizados em grupos e somados os sub-totais de cada um deles. Os quatro principais grupos consideradas são: estocagem e formulação, irradiação, processo e miscelânea.

A ESTOCAGEM E FORMULAÇÃO, é constituída pelos equipamentos necessários para estocar o látex, que são 2 tambores, de fibra de vidro com 15.000 L de capacidade e, para formular o látex, que são 3 tambores usados para agitação e 1 para misturar, com 1,7 m³ de capacidade cada um. Os respectivos preços apresentados na Tabela 21 foram fornecidos pela fábrica de médio porte [15]. No mesmo grupo inclui-se as áreas de estocagem, de descarga e corredores cujo total foi de 898 m², custando US\$100 por metro quadrado construído [37]. As áreas de laboratório, oficina, escritório e de serviços atingem uma área total de 360 m², com um preço por metro quadrado construído de US\$ 250 [37].

A IRRADIAÇÃO, é constituída pelo equipamento necessário para irradiar o látex formulado. Os componentes são os seguintes: o irradiador úmido, tipo esteira, onde se inclui a piscina de armazenamento; o mecanismo de elevação; os sistemas auxiliares e de segurança que inclui a ponte rolante; o sistema desmineralizador de água e o sistema de detetores; as fontes radioativas, que tem um valor no mercado argentino de US\$ 1,2/Ci [37],

adquiridas totalmente encapsuladas, cujo valor adicional foi de US\$ 0,061/Ci [37]. No valor da fonte inclui-se os gastos de transporte. O valor do irradiador de US\$ 391.000. Neste grupo total de itens foram também incluídos os gastos com a construção civil, cuja área ocupada por esta unidade foi de 196 m² a um preço de US\$ 300 por Ci [37]. Por último, foi considerado o valor do reator de irradiação, com uma capacidade de 1,7 m³, com 1.800 mm de altura e 1.300 mm de diâmetro e, também, os gastos relativos à montagem eletromecânica de todos os equipamentos, que estão taxados em 10% sobre o custo total dos equipamentos.

Tabela 21 - Estimativa de investimento de capital da fábrica de luvas cirúrgicas que utiliza o processo alternativo de vulcanização (US\$).

Discriminação	Valores	
ESTOCAGEM E FORMULAÇÃO		192.474
1. Equipamentos		12.674
Estocagem de látex fresco (2 unidades)	11.724	
Tambor/agitação (3 unidades)	450	
Tambor/mistura (1 unidade)	500	
2. Área de laboratório, oficina, escritório e serviços		90.000
3. Área de descarga, de estocagem e corredores		89.800
IRRADIAÇÃO		539.000
4. Irradiador		391.000
ponta fonte	25.000	
mecanismo de elevação	30.000	
piscina de armazenamento das fontes	30.000	
sistemas auxiliares e de segurança	180.000	
fontes radioativas	120.000	
encapsulamento	6.000	
5. Construção civil		120.000
6. Reator de irradiação (2 unidades)		10.000
7. Montagem		18.000
PROCESSO		1.575.000
8. Máquina de luvas (1 unidade)		1.500.000
9. Área de processo		75.000
MISCELÂNEA		285.115
10. Tambores, carros hidráulicos		1.200
11. Equipamento de laboratório e escritório		3.000
12. Terreno		127.680
13. Projeto e gerenciamento de obra civil		50.000
14. Balança		4.000
15. Imprevistos		99.235
Total		2.591.589

Em PROCESSO inclui-se a maquinaria referente à fabricação de luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante, projetada para operar de forma contínua, 24 horas por dia, produzindo em uma unidade 11.000 pares de luvas por dia. O preço, foi fornecido pela fábrica de médio porte [15], que utiliza o processo térmico convencional. Também inclui-se a área ocupada por esta unidade de fabricação que dá um total de 300 m², a um preço de US\$ 250 por metro quadrado construído [15].

Em MISCELÂNEA se encontra tudo o que se refere aos equipamentos leves, tais como carros hidráulicos, tambores de estocagem de látex e de reagentes químicos, balança, além dos equipamentos referentes aos ambientes de laboratório e aos ambientes de escritório. Encontram-se também os gastos referentes à aquisição do total de terreno, na qual vai ser montada a fábrica, que é de 1.824 m² a um preço de US\$ 70 por metro quadrado. Esse preço é referente ao local industrial da cidade de São Paulo. Inclui-se também os gastos de execução do projeto e gerenciamento da obra civil, assim como os gastos de imprevistos que foi taxado em 10% de todos os itens, exceto a máquina de luvas.

Somando todos esses itens obtem-se o valor de IC de US\$ 2.591.589.

4.2.3 - Custos de irradiação

Os custos de irradiação por kg de látex irradiado, foram estimados a partir dos CF e dos CV obtidos para o projeto da fábrica.

Nos CF foram incluídos os gastos de montagem eletromecânica e as despesas de amortização do capital, gastos na aquisição dos equipamentos, que foram calculados sobre 10 anos de amortização [41]. Os equipamentos considerados (Tabela 21, itens 1, 4, 6 e 7) são aqueles necessários na estocagem e na formulação do látex, além dos que compõem o sistema de irradiação. São incluídas também as despesas referentes a todas as edificações, calculadas sobre 20 anos de amortização (Tabela 21, itens 2, 3 e 5) [41]. Nos CF foram incluídos os gastos referentes aos juros, calculados como 10% de todos os itens da Tabela 21, exceto sobre a unidade de processamento item (8 e 9), porque não faz parte dos custos de irradiação. São incluídos também, os gastos

com impostos e seguros. O valor total estimado dos CF foi de US\$ 162.066 (Tabela 22).

Tabela 22 - Custo de irradiação do látex com raios gama (US\$/ano)

Discriminação	Valor	
Total de custos fixos		162.066
Custos variáveis		186.250
Reposição da fonte	15.600	
Mão-de-obra	97.000	
Manutenção da instalação	58.650	
Serviços	15.000	
Capacidade, kg/h.		117,540
Custo de irradiação, US\$/kg.		0,370
Custo do radiosensibilizador, US\$/kg.		0,049
Custo de vulcanização com raios gama, US\$/kg.		0,420

Nos CV, os quais dependem da capacidade de irradiação, ou seja, da quantidade de látex a ser irradiado, estão incluídas as despesas por reposição da fonte, que representa 13% sobre o valor da carga inicial (US\$ 120.000) [37]. Também são incluídas as despesas relativas ao salário referente à mão-de-obra direta, formada pelos 7 funcionários encarregados pelo funcionamento da unidade de irradiação. Considera-se também, as despesas de manutenção da unidade de irradiação, que representa 15% do valor do sistema de irradiação e finalmente considera-se os gastos relativos aos serviços de dosimetria do consumo de eletricidade, água, e telefone. O valor total estimado dos CV foi de US\$ 186.250, mostrado na Tabela 22.

Os CT, que representa a sumatória dos CF e CV, foi calculado em US\$ 348.316. Como a capacidade horária de irradiação foi calculado em 117,54 kg de látex, a equação 39, permite calcular o custo de irradiação que foi de US\$ 0,37/kg. Entretanto, foi preciso considerar os custos do radiosensibilizador (A-nB), que atinge no mercado nacional o preço de US\$ 3,3/kg, para um consumo de 7 toneladas o custo anual será de US\$ 22.782, assim o custo por conceito do radiosensibilizador será de US\$ 0,049 por kg de látex irradiado. Desta forma o custo de irradiação atinge o valor de US\$ 0,42/kg.

A Tabela 23 mostra os custos de irradiação do látex nos países asiáticos que utilizam o processo alternativo de vulcanização. Observa-se que o Brasil apresenta o maior custo de irradiação, porque os custos de manutenção da instalação, contidos nos CV, especificamente, o tratamento da água da piscina é muito elevado.

Tabela 23 - Custos de irradiação do látex de borracha natural a nível mundial (US\$/kg) [26]

Tipo de irradiador	Portátil	Seco	Úmido
Capacidade de irradiação, t/ano.	150	500	1.000
China	0,239-0,254	0,16-0,18	0,134-0,142
Índia	0,41	0,20	0,10
Indonésia	0,51	0,074	0,04
Japão	1,32-1,40	1,82-0,80	0,16-0,48
Malásia	0,41	0,17	0,215
Sri Lanka	0,22	0,18	0,09
Tailândia	0,265	0,137	0,094
Brasil	-----	-----	0,42*

*calculado neste trabalho

4.2.4 - Custos de fabricação

Para fabricar diariamente 11.000 pares de luvas cirúrgicas, que representa a capacidade da unidade de processamento, consome-se 470 toneladas de látex irradiado por ano. Isto representa a metade da capacidade projetada do sistema de irradiação. Mas para efeitos de comparação, o consumo de todos os reagentes que participam na formulação do látex e a solução coagulante com nitrato de cálcio, foram calculados a partir da capacidade de 470 toneladas. As despesas anuais de fabricação, referentes a esse consumo, deu um total de US\$ 490.195 (Tabela 24).

Os demais itens, serão calculados considerando a capacidade de irradiação de 940 toneladas de látex por ano, como obtida anteriormente. Os itens foram os seguintes: a) despesas de mão-de-obra, de US\$ 126.640 por ano, relativos aos salários de 20 funcionários, repartidos em três turnos diários, alocados na unidade de irradiação em número de 7 e na unidade de

processamento em número de 13; b) despesas com serviços, no montante de US\$ 185.000/ano, referentes ao consumo de água e de energia, telefone e dosimetria; c) despesas referentes à manutenção da instalação, de US\$ 88.650 por ano, calculadas como sendo a soma de 15% do valor do sistema de irradiação com 2% do valor da máquina de luvas (Tabela 21, itens 4 e 8); d) despesas de reposição dos lápis de ^{60}Co , de US\$ 15.600 por ano, calculados no item 4.2.2 (Tabela 22).

Tabela 24 - Consumo anual dos reagentes químicos

Reagentes	Consumo	Valor unitário	Custo
	(t)	(US\$/kg)	US\$
Látex	381,50	1,20	457.800
An-B	7,00	3,30	22.782
KOH	0,45	15,10	6.950
Nitrato de cálcio	0,50	3,67	1.835
Álcool	0,40	2,00	800
Talco	0,07	0,40	28
Total			490.195

Portanto, o total estimado do custo de fabricação de luvas cirúrgicas pelo processo alternativo de vulcanização, foi de US\$ 906.085 por ano (Tabela 25).

Porém, a fábrica de luvas cirúrgicas de médio porte, que utiliza o processo térmico convencional na presença de enxofre, tem um CT anual de fabricação estimado em US\$ 1.060.667 (Tabela 26). Essas despesas de mão-de-obra são referentes aos salários dos 13 funcionários, repartidos em três turnos diários. As outras despesas são referentes ao consumo dos reagentes necessários para a formulação do látex; de energia; de serviços, como água, luz, telefone; aos gastos de manutenção da instalação e; por último ao consumo de combustível, já que nas etapas de cura e pós-cura, no processo térmico convencional, é utilizado vapor vivo, para elevar a temperatura.

As estimativas dos custos de fabricação para os dois processos foram calculadas sem ser considerado os CF e sem incluir os custos de embalagem e

esterilização por serem as mesmas nos dois processos. Foram considerados nos cálculos 8.000 horas efetivas de trabalho contínuo por ano e 24 horas por dia. A Tabela 27 compara os custos de fabricação para os dois processos.

Tabela 25 - Custos de fabricação de luvas cirúrgicas pelo processo alternativo de vulcanização (US\$/ano)

Discriminação	Valor
Formulação do látex	490.195
Mão-de-obra	126.640
Serviços	185.000
Manutenção da instalação	88.650
Reposição da fonte	15.600
Total	906.085

Tabela 26 - Custos de fabricação de luvas cirúrgicas pelo processo térmico convencional (US\$/ano) [15]

Discriminação	Valor
Formulação do látex	420.666
Mão-de-obra	29.666
Serviços	2.593
Manutenção da instalação	30.000
Consumo de energia	167.408
Consumo de combustível	410.333
Total	1.060.667

Da Tabela 27, observa-se que as despesas por consumo de combustível, no processo convencional, representa aproximadamente 40% dos custos. No processo alternativo, as despesas que originam o possível encarecimento deste processo, que são a reposição da fonte e a manutenção da instalação, representam aproximadamente 12% dos custos. Por outro lado, se a capacidade de fabricação de luvas cirúrgicas fosse dobrada, isto é 22.000 pares de luvas por dia, o único item que mudaria seria as despesas de formulação do látex que dobraria o seu valor para US\$ 2.942. Os demais itens permaneceriam constantes, baixando o custo de fabricação para US\$ 0,19 por par de luvas.

Esses fatos, indicam que o processo alternativo de vulcanização resultou ser mais barato na fabricação de luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante, do que o processo de vulcanização térmico convencional, cujo consumo de energia e de combustível encarece-o.

Tabela 27 - Comparação dos custos de fabricação entre os dois processos de vulcanização (US\$/dia)

Discriminação	Processo	
	Convencional	Alternativo
Formulação do látex	1.262	1.471
Mão-de-obra	89	380
Serviços	510	555
Manutenção da instalação	90	266
Combustível	1.231	-----
Reposição da fonte	-----	47
Total	3.182	2.719
Pares de luvas por dia	11.000	11.000
Custo de fabricação, US\$/par	0,289	0,247

Em seguida, serão analisadas as possíveis opções de comercialização deste processo alternativo, com a finalidade de introduzi-lo na indústria de artefato de borracha, na indústria de luvas cirúrgicas.

4.2.5 - Opções comerciais

A avaliação econômica foi aplicada para quatro opções comerciais, escolhidas com a finalidade de abranger as possíveis situações para investir na instalação de uma fábrica de vulcanização do látex de borracha natural com radiação ionizante, no Brasil. E também com o objetivo de difundir essa nova tecnologia para as fábricas já existentes de produção de látex e de fabricação de luvas cirúrgicas, que quiserem modificar as técnicas até agora empregadas. As opções comerciais consideradas para o processo alternativo, são as seguintes:

Opção A representa uma fábrica de luvas cirúrgicas, com o sistema de irradiação.

Opção B representa uma fábrica de luvas cirúrgicas sem o sistema de irradiação. Os serviços de irradiação são comprados.

Opção C representa uma usina de irradiação de látex de borracha natural com 3 alternativas possíveis.

Opção D Opção A com o investimento de capital relativo ao sistema de irradiação bancado por instituições interessadas (FAPESP, IAEA).

A avaliação econômica de cada opção comercial será baseada na análise da sensibilidade do investimento, aplicando a técnica gráfica do PE; sobre os CT e os ET, e também, no estudo da rentabilidade do investimento através da técnica do TRC. O cálculo do TRC se faz aplicando a equação 37.

A Tabela 28 mostra os resultados das estimativas do IC para cada opção comercial. Os cálculos foram realizados seguindo a metodologia descrita no item 4.2.2. Observa-se que a opção C, que representa uma usina de irradiação de látex, é a que exige menor IC; enquanto que a opção A, que representa uma fábrica de luvas cirúrgicas com o sistema de irradiação instalada, é a que exige o maior IC.

Tabela 28 - Resumo do investimento de capital para cada opção (US\$)

Discriminação	opção A	opção B	opção C	opção D
Estocagem e formulação	192.474	186.612	192.474	186.612
Irradiação	539.000	-----	539.000	28.000
Processo	1.575.000	1.575.000	-----	1.575.000
Miscelânea	285.115	230.629	277.615	234.015
Total	2.591.589	1.992.241	1.009.089	2.023.627

Os custos operativos de uma fábrica mostram o valor necessário para operá-la normalmente durante um ano. A Tabela 29 mostra as estimativas dos custos operacionais constituídos pela soma dos CF, CV e imprevistos, devido à despesas pré-operativas, que correspondem a 10% desses custos. A opção C apresenta custos operacionais de ordem da 3 vezes menores que os correspondentes às outras opções.

Tabela 29 - Estimativa dos CF e CV para todas as opções comerciais (US\$/ano)

Discriminação	opção A	opção B	opção C	opção D
Custos fixos				
1. Amortização do capital				
equipamentos diversos	193.167	150.681	43.167	154.067
edificação	18.740	12.740	14.990	12.740
2. Juros	259.159	199.224	100.909	202.363
3. Impostos e seguros	3.000	3.000	3.000	3.000
Custos variáveis				
4. Reposição da fonte	15.609	-----	15.600	15.600
5. Mão-de-obra	126.640	29.640	97.000	126.640
6. Manutenção da instalação	88.650	30.000	58.650	88.650
7. Serviços	185.000	170.000	15.000	185.000
8. Materiais diversos	2.000	2.000	2.000	2.000
9. Materiais de laboratório	2.000	2.000	2.000	2.000
10. Fretes	-----	5.875	-----	-----
11. Custo do serviço de irradiação	-----	183.300	-----	-----
12. Custos de embalagem	114.253	114.253	-----	114.253
13. Custos de esterilização	73.333	73.333	-----	73.333
Custos operacionais				
Total dos CF	474.066	365.645	162.066	372.170
Total dos CV	607.477	610.402	190.250	607.477
Imprevistos (10% sobre os custos)	108.154	97.605	35.232	97.965
Total	1.189.697	1.073.652	387.548	1.077.612

A Tabela 30 mostra a opção mais lucrativa, porque permite calcular o valor de L a partir das despesas referentes à compra de reagentes químicos, dos CT, das vendas, que representam os valores de ET e do respectivo ICM que foi de 11%. O L obtido em cada opção comercial foi calculado como sendo a soma algébrica de $ET - (CT + ICM)$.

As estimativas dos CF para cada opção comercial, foram calculadas seguindo a metodologia descrita no item 4.2.3 (cálculo dos custos de irradiação). Porém, as estimativas dos CV para cada opção comercial foram calculadas seguindo a metodologia descrita no item 4.2.4 (cálculo dos custos de fabricação).

Como é esperado, a opção D é a mais lucrativa porque uma parte do investimento de capital é bancada por instituições financeiras. Entre as outras 3 opções, a opção A, que representa uma fábrica completa, foi a mais lucrativa. Entretanto para se decidir qual a opção comercial mais vantajosa foi necessário considerar outros parâmetros econômicos, os quais serão calculados, em seguida, para cada uma das 4 opções, e analisadas comparativamente.

Tabela 30 - Receita das opções comerciais

Discriminação			Totais (US\$/ano)			
Compra de reagentes	C ¹	V ²	opção A	opção B	opção C	opção D
1. Látex	763	1,2	915.600	457.800	457.800	915.600
2. Acrilato de n-butila	14	3,3	46.200	22.782	22.782	46.200
3. Hidróxido de potássio	0,9	15,1	13.590	6.950	6.950	13.590
4. Nitrato de cálcio	0,5	3,67	1.835	1.835	-----	1.835
5. Álcool	0,4	2	800	800	-----	800
6. Talco	0,07	0,4	28	28	-----	28
7. Total de compras			978.053	490.195	487.532	978.053
8. CF			474.066	365.645	162.066	372.170
9. CV			607.477	610.402	190.250	607.477
10. CT (7+8+9)			2.059.596	1.466.242	839.848	1.957.700
11. Venda			3.666.667	3.666.667	-----	3.666.667
12. Preço de venda (US\$/par)			0,6	0,6	-----	0,6
13. Valor de latex irradiado (US\$/tambor).			500	-----	500	500
14. Total de latex irradiado (t)			940	470	940	940
15. Preço para irradiar latex (US\$/kg)			-----	-----	0,39	-----
16. ET (US\$)			3.375.000	2.200.000	1.358.300	3.375.000
17. Impostos (ICM = 11% sobre vendas)			371.250	242.000	149.413	371.250
17. L (16-17-10) (US\$)			944.154	491.758	369.039	1.046.050

¹ Material consumido, toneladas

² Valor unitário, US\$/kg

Opção A. Fábrica de luvas cirúrgicas com o sistema de irradiação

Nesta opção considera-se uma fábrica de luvas cirúrgicas com o sistema de irradiação de látex, com capacidade total de irradiação de 940 toneladas de látex por ano. A unidade de processamento da fábrica é desenhada para a fabricação de 11.000 pares de luvas cirúrgicas por dia, consumindo 470 toneladas de látex por ano.

O IC estimado para esta fábrica foi de US\$ 2.591.589. Neste cálculo foram considerados os investimentos para a montagem de todas os itens da Tabela 21. Os CT anuais foram estimados em US\$ 2.059.596 referentes às despesas para formular e irradiar 940 toneladas de látex, assim como, as despesas referentes à fabricação anual de 3,7 milhões de pares de luvas cirúrgicas. Nestas despesas estão incluídos os custos de embalagem, e os de esterilização. Cada par de luva pesa em média 3,8 g e gasta-se US\$ 0,39 por kg de material embalado. O valor da esterilização no mercado foi de US\$ 0,02 por par de luva. Os ET anuais, foram estimados a partir da venda de luvas cirúrgicas já esterilizadas a um preço estimado de US\$ 0,6 por par. Este valor é justificado

pelos preços do mercado nacional, e da venda de 470 toneladas de látex irradiado que não foi processado, a um preço estimado de US\$ 500 por tambor de 200 kg. Este preço também foi justificado pelos valores de látex fresco fornecidos no mercado nacional. Em suma, as ET foram estimadas em US\$ 3.375.000. O lucro anual calculado foi de US\$ 944.154.

Substituindo os valores dos IC e L na equação 37 obtém-se a rentabilidade do investimento para a opção A, a qual permite um TRC de 2,74 anos. A análise de sensibilidade, aplicada para esta opção de investimento, pela técnica gráfica do PE atinge uma capacidade mínima de 137 toneladas (Figura 13), o que significa que se pode operar a fábrica mantendo no máximo uma capacidade ociosa de 85%, sem haver prejuízo.

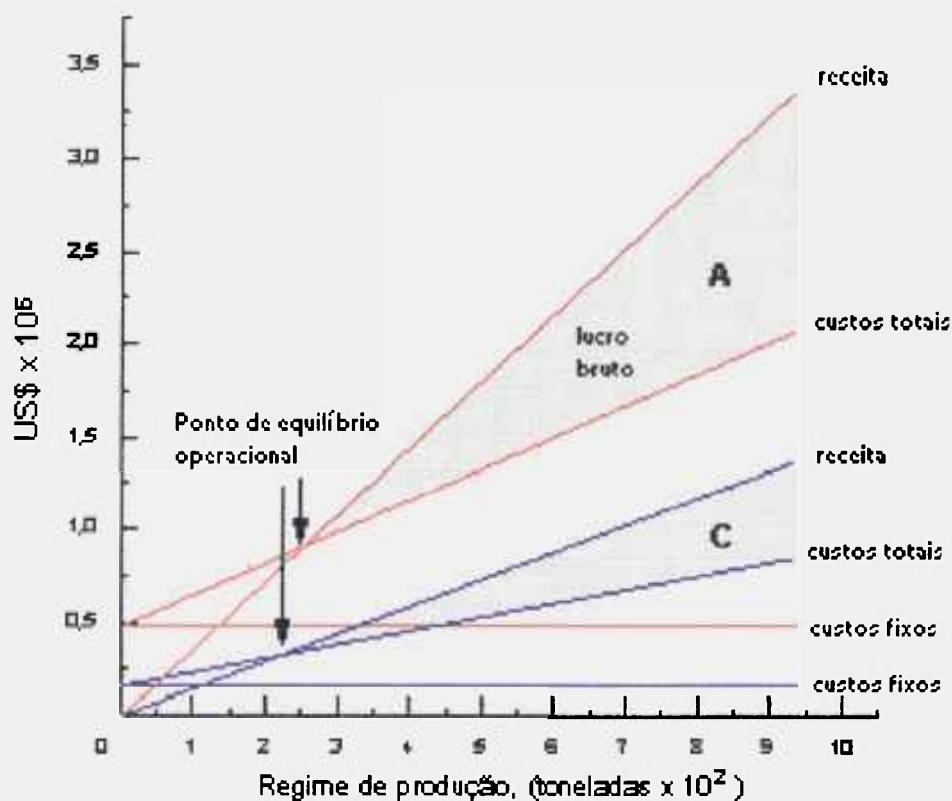


Figura 13 - Ponto de equilíbrio para as opções comerciais A e C

Opção B. Fábrica de luvas cirúrgicas sem o sistema de irradiação

Nesta opção, a fábrica de luvas cirúrgicas, que usa o processo alternativo de vulcanização tem que comprar o serviço de irradiação de terceiros. A capacidade diária de fabricação foi de 11.000 pares de luvas cirúrgicas, que representa um consumo de 470 toneladas de látex irradiado.

O IC estimado foi de US\$ 1.992.241. Neste cálculo foram considerados os investimentos necessários para ESTOCAGEM E FORMULAÇÃO e para PROCESSO E MISCELÂNEA. Os CT anuais foram estimados em US\$ 1.466.242, que correspondem às despesas devido à fabricação de 3,7 milhões de pares de luvas cirúrgicas. Os ET anuais de US\$ 2.200.000, foram estimados a partir da venda de luvas cirúrgicas já esterilizadas, a um preço de US\$ 0,6 por par. O lucro total anual calculado como na opção A, foi de US\$ 491.758.

A rentabilidade do investimento para esta opção permite um TRC de 4,05 anos. A análise da sua sensibilidade, mediante a técnica gráfica do PE, atinge uma capacidade mínima de 88 toneladas, o que significa uma capacidade máxima ociosa de 81%, sem haver prejuízo.

Opção C. Usina de irradiação de látex

Nesta opção considera-se uma usina de irradiação de látex, com uma capacidade anual de irradiação de 940 toneladas. O IC estimado para esta usina foi de US\$ 1.009.089, os quais foram calculados a partir do investimento para a ESTOCAGEM E FORMULAÇÃO, IRRADIAÇÃO E MISCELÂNEA.

Por sua vez esta opção permite três tipos de alternativas possíveis para a receita e, conseqüentemente, CF, CV e ET podem se modificar segundo a alternativa da receita a utilizar. A primeira alternativa será oferecer somente serviços de irradiação de látex, o que significa que não há despesas por compra de reagentes para formulação de látex. A segunda alternativa considera que 50% da capacidade de irradiação, será utilizada somente para irradiar látex que será vendido às indústrias de borracha. Os outros 50% são utilizados para irradiar

látices para terceiros. A terceira alternativa considera, exclusivamente, a irradiação de látex para fornecer ao mercado da indústria de borracha.

Os CT relativos às despesas de irradiação para a primeira alternativa foram estimados em US\$ 387.548, que foi um valor bem menor que o das outras alternativas. Na segunda alternativa, as despesas derivadas da compra de reagentes para a formulação do látex representam 58% sobre os CT, mas as despesas relativas aos custos de irradiação representam 42% dos CT. Por esta alternativa os CT aumentam para US\$ 839.848. Porém, na terceira alternativa as despesas com a compra de reagentes, fazem aumentar os CT para US\$ 1.327.300.

As estimativas dos ET foram calculados dependendo da receita utilizada, da seguinte maneira: para a primeira alternativa os ET foram obtidos somente através de serviços de irradiação para terceiros, com um valor de US\$ 366.600. A segunda alternativa estabelece que o ET, da venda de látex irradiado e de serviços de irradiação, atinge um valor de US\$ 1.358.300. Na terceira alternativa, os ET foram referentes ao fornecimento de látex irradiado para as indústrias de borracha, atingindo um valor de US\$ 2.350.000. De fato, observa-se que os ET para a terceira alternativa são muito superiores aos das outras alternativas, porém seus gastos também são maiores, mas proporcionais. Na primeira alternativa não se observa essa proporcionalidade sendo os custos maiores que as entradas. Isto porque a capacidade de irradiação em plantas piloto é baixa e o investimento não é rentável. O bom senso permite eliminar esta alternativa. Então, para as duas últimas alternativas serão calculadas as respectivas rentabilidades sobre seus investimentos e as suas sensibilidades sobre seus custos.

O cálculo da rentabilidade (equação 37) para a segunda alternativa, atinge um valor de TRC de 2,73 anos e, a análise de sensibilidade mostra uma capacidade mínima de 115 toneladas (Figura 13), que representa uma capacidade ociosa máxima de 87% sem haver prejuízo. Porém, a rentabilidade para a terceira alternativa dá um L estimado de US\$ 764.200 com um TRC igual a 1,32 anos. Como esse valor de TRC foi menor que o da segunda possibilidade, pode-se concluir que esta alternativa de fornecer látex formulado e irradiado para as indústrias de borracha foi a mais atrativa.

Opção D. Fábrica de luvas cirúrgicas com sistema de irradiação bancada

Esta opção é similar à opção A. Foi assumido que o sistema de irradiação é totalmente bancado por instituições interessadas no projeto. Por isso o IC desta fábrica foi calculado sem considerar o sistema de irradiação, que engloba os itens 4 e 5 da Tabela 21, atingindo um valor de US\$ 2.023.627. Porém, os cálculos e os valores estimados dos CV e os ET são similares à opção A. Entretanto os CF apresentam uma queda de 21% porque o sistema de irradiação foi totalmente bancado. Assim os CF abaixam para US\$ 372.170.

A rentabilidade desta opção, de certo modo é mais atrativa, quando comparada com as demais opções, porque o TRC foi de 1,93 anos. Mas, na análise de sensibilidade sobre os custos, não foi muito atraente, porque o PE dá um valor de 111 toneladas, o que representa uma capacidade ociosa de 88% antes de ocorrer prejuízo.

Resumo das opções

A Tabela 31 mostra os resultados das avaliações econômicas de todas as opções, demonstrando que a opção C com TRC de 2,73 anos e PE de 115 toneladas, apresenta características mais atrativas.

Tabela 31 - Comparação das opções comerciais estudadas

Opção	IC ¹ (US\$)	Q _i T ² (t/ano)	CT ³ (US\$/ano)	ET ⁴ (US\$/ano)	L ⁵ (US\$/ano)	PE ⁶ (t)	TRC ⁷ (anos)
A	2.591.589	940	2.059.596	3.375.000	1.315.404	137	2,74
B	1.992.241	470	1.466.242	2.200.000	733.758	88	4,05
C	1.009.089	940	839.848	1.358.300	518.452	115	2,73
D	2.023.627	940	1.957.700	3.375.000	1.417.300	111	1,93

¹ Investimento de capital

² Capacidade da fábrica

³ Custos totais

⁴ Entradas totais

⁵ Lucro

⁶ Ponto de equilíbrio

⁷ Tempo de retorno do capital

O que significa que é mais conveniente para um investidor, montar uma usina de irradiação para formular e irradiar látex, do que montar uma fábrica

de luvas cirúrgicas com sistema de irradiação de látex. Dentro da opção C a alternativa de fornecer látex formulado e irradiado à indústria de borracha apresentou o menor valor de TRC sendo de 1,32 anos. Esta opção permite duas alternativas para o investidor se proteger das variações econômicas ou das mudanças do preço do látex.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

A fabricação de luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante utilizando látex de borracha natural vulcanizado com raios gama, embora seja já utilizado nos países europeus, é pouco conhecido no Brasil, porque ainda as pesquisas se encontram a nível de planta piloto e também porque as fontes de alta energia, como é o caso da energia nuclear, não são ainda muito difundidas e pouco utilizadas pela indústria brasileira. Em vista disto, as indústrias de borracha ainda continuam utilizando o único processo térmico de vulcanização tradicionalmente conhecido, embora consuma mais energia e reagentes químicos.

Assim foram fabricadas, neste trabalho, luvas cirúrgicas pelo método de imersão com coagulante, a partir do látex de borracha natural vulcanizado com raios gama com uma DV de 10 kGy, na presença de 3,0 phr de An-B / 0,2 phr de KOH.

Quando se quer fabricar luvas cirúrgicas com espessuras de, aproximadamente, 0,17 mm, é necessário estudar os parâmetros de processo que influenciam a espessura. Por isso neste trabalho foram estudados os efeitos de cinco variáveis como a concentração do coagulante, a temperatura do molde, o tempo de escoamento do coagulante, o tempo de permanência do molde imerso no látex e a velocidade de saída do molde do látex irradiado. Essas variáveis foram escolhidas segundo a experiência dos fabricantes de luvas e foram as que supostamente tem influência direta sobre espessura. Os experimentos foram planejados pelo método fatorial fracionado que reduziu para 16 o número de ensaios realizados. Esses ensaios mostraram que a concentração da solução de CaCl_2 , utilizado como agente coagulante em todos os experimentos, tem o maior efeito sobre a espessura, porque a superfície do coagulante no molde é porosa e permite a difusão iônica. Há, também, uma relação linear entre a espessura e o tempo de permanência do molde imerso no

látex irradiado, uma explicação para este fato é que, na deposição das partículas de borracha sobre o molde, ocorre uma reação entre os cátions do coagulante e os ânions que estão absorvidos sobre as partículas de borracha, que também são responsáveis pela estabilidade do látex. Os ânions de ácidos graxos e outros ânions não conhecidos, reagem com os íons de cálcio. Também pode-se sugerir que o mecanismo da deposição envolve primeiro a desidratação das partículas de borracha, seguida da neutralização dos ânions de ácido graxo que ficam absorvidos sobre as partículas de borracha. As demais variáveis, que registraram pouco efeito sobre a espessura, podem ser ajustadas levando em conta as razões econômicas e o bom senso. A análise estatística mostrou também que todas as cinco variáveis são independentes.

Se se deseja fabricar luvas com uma espessura determinada pode-se obtê-la, facilmente, através da equação desenvolvida neste trabalho, que considera a $[CaCl_2]$ e o tempo de imersão do molde no látex:

$$y = 0,213 + 0,025 [CaCl_2] + 0,019 t$$

Essa equação é muito útil em aplicações industriais porque a partir dela pode-se calcular a concentração do coagulante visando economizar seu consumo.

Os ensaios de secagem da borracha mostram que a umidade de equilíbrio para a convecção livre foi de 0,0027 e para a convecção forçada foi de 0,0015, para as condições experimentais. Também se demonstrou nestes ensaios que a velocidade de evaporação do líquido, através da borracha, não é constante no período ante-crítico, indicando que existe pouca umidade superficial e, portanto, nesse período prevalece a velocidade de difusão interna que, provavelmente, ocorre através do mecanismo de difusão capilar. Outro fato que indica a existência de pouca umidade superficial, são os valores da velocidade de evaporação calculada no ponto crítico que foi de $0,3976 \text{ kg / h.m}^2$ para convecção forçada e de $0,2583 \text{ kg / h.m}^2$ para convecção livre. Isto indica que no período ante-crítico pode-se remover maior quantidade de água quando a secagem for feita por convecção forçada. A umidade crítica da borracha atinge um valor de 0,161 para filmes menores que 0,2 mm de espessura. Para umidades menores que a crítica, ou seja, para umidades que estão dentro do período pós-crítico, a velocidade de secagem ocorre pela evaporação da água sobre uma

parte da superfície útil total, diminuindo essa fração à medida que transcorre a secagem. Isto acontece porque a velocidade de difusão interna não é suficiente para suprir todo o líquido que se evapora na superfície. Como consequência neste período a velocidade de evaporação diminui, porque ocorre o aparecimento de zonas secas sobre a superfície do filme de borracha. Na projeção industrial esses dados são úteis, porque permitem desenhar o tipo de secador apropriado para materiais com espessura menores que 0,2 mm, como é o caso da secagem de luvas cirúrgicas em grande escala.

Os ensaios mecânicos das luvas cirúrgicas fabricadas pelo método de imersão com coagulante, a partir do látex vulcanizado com raios gama mostram que podem ser comercializadas. A resistência à tração foi de 26,85 MPa enquanto que pelo processo convencional foi de 25,82 MPa. Quando as luvas fabricadas por ambos os processos são envelhecidas as propriedades mecânicas são ligeiramente alteradas. Entretanto, quando são radioesterilizadas as propriedades mecânicas das luvas fabricadas pelo processo alternativo, decaem abaixo dos valores permitidos para a comercialização, mesmo com dose de 10 kGy. Isto mostra que a irradiação induz a degradação e devem ser esterilizadas por um outro processo ou deve-se pesquisar um sistema de radiosensibilizadores para o látex que forneça maior resistência radiolítica à borracha.

O estudo da avaliação econômica demonstra que, no Brasil, o custo de irradiação do látex é muito alto comparado com os países asiáticos, que já estão utilizando o processo alternativo de vulcanização na fabricação de luvas cirúrgicas. É de 0,42 US\$/kg. Esses custos elevados são causados, principalmente, porque foi considerada uma capacidade de irradiação da fonte, bem menor que a considerada em plantas pilotos no Japão. Neste trabalho, foi preciso limitar a fabricação em somente 11.000 pares de luvas diárias. Esta condição foi imposta para se poder comparar os custos com uma fábrica de luvas que utiliza o processo convencional. É interessante ressaltar que, no Brasil, os custos de fabricação de luvas cirúrgicas pelo processo alternativo é menor do que os custos do processo convencional; respectivamente, US\$ 0,247 / par e US\$ 0,298 / par. Com essa restrição o processo alternativo ainda é ligeiramente mais econômico. É claro que se pode dobrar a capacidade de fabricação de luvas

e, então, os custos totais diminuem significativamente, porque os custos fixos não se alteram e o aumento dos custos variáveis não é tão significativo. Desta forma o processo alternativo se torna ainda mais econômico e atrativo.

Das quatro opções comerciais estudadas a opção C, que considera a operação de uma usina de beneficiamento do látex, vulcanizando-o com raios gama, é a mais atrativa. Os custos de operação dessa usina, cuja atividade máxima da fonte de ^{60}Co é de 100 kCi, que irradia o látex formulado com uma dose de 10 kGy e uma capacidade de irradiação de 117,54 kg/h, foi estimado em US\$ 348.316 por ano, ou US\$ 0,375 por kg de látex irradiado. Estes custos são devido principalmente à reposição de elementos da fonte de ^{60}Co e à manutenção da piscina onde é blindada.

É mais atraente para um investidor montar uma usina de beneficiamento de látex com raios gama, do que investir em uma fábrica de luvas cirúrgicas com um irradiador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ARAÚJO, S C. *Vulcanização do Látex de Borracha Natural Induzida com Feixe de Elétrons*. São Paulo, 1993. (Dissertação de mestrado, IPEN/CNEN-SP).
- 2 AROONVISOOT, P. & MAKUUCHI, K. Selection of Hydroperoxide as Co-Sensitizer for n-Butyl Acrylate. In: JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation of natural rubber latex: Proceedings of the international symposium on ..., held in Tokyo and Takasaki, July, 26-28, 1989*. Tokyo, 1990. p. 305-18 (JAERI-M-89-228).
- 3 BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. *Statics for Experimenter: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. N Y, 1978.
- 4 BRASIL. MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO. SUPERINTENDÊNCIA DA BORRACHA. *Curso básico em tecnologia de elastômeros*. s.l, s.d. v. I - VI.
- 5 BRYNJOLFSSON, A., Costs of Picowave Processing. Practical Application of Food Irradiation. In: ASIA AND THE PACIFIC. *Proceedings of a seminar for Asia and the Pacific on the practical application of food irradiation jointly organized by the International Atomic Energy Agency and The Food and Agriculture Organization of the United Nations and held in Shanghai, 7-11 April, 1986*, p. 83-107, IAEA-TECDOC-452.
- 6 BRASIL. Secretaria de Planejamento, Orçamento e Coordenação. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, anuário estatístico, 1993. v.53, p.4.22-2, 1993.
- 7 CALVI, L. C. (ABTB). *Princípios Básicos sobre a Tecnologia*. Boletim Técnico. 1990. número 41, p. 3-10.
- 8 CANAVEL, V. *Efeito do antioxidante e do radiosensibilizador na estabilidade do látex de borracha natural vulcanizada com raios gama*. São Paulo, 1993. (Dissertação de mestrado, IPEN/CNEN-SP).
- 9 CHARLES, A. *Radiation Effect in Material*, London, Pergamos, 1960.
- 10 CHARLESB, A. *Radiation Effect in Material*, London, Pergamos, 1960.
- 11 COLIN, W. E. *Developments in Rubber and Rubber Composites - 1*. Great Britian, p. 79-86, 1980.
- 12 CUDA, J. Optimum Plant Capacity - Technical and Economic Considerations. *Rad. Phys. Chem.*, 25 (1-3) : 411-23, 1985.

- 13 CURZIO, O. A. & QUARANTA, H. C. Theoretical Evaluation of Dose Rate for a Cobalt-60 Source in a Pool Irradiator. *Int. J. Radiat. Isot.*, 32: 256-7, 1981.
- 14 CURZIO, O. A. & QUARANTA, H. C. Multipurpose Gamma Irradiation Facility Design. *Int. J. Radiat. Isot.* 33: 462-3, 1982.
- 15 CONTIM, A.M. Comunicação pessoal.
- 16 C.C. FURNAS. *Manual of Industrial Chemistry*. v.2, 6 ed. p. 1457-84, 1963.
- 17 DEVENDRA, R. & MAKUUCHI, K. Combination Effect of Carbon Tetrachloride with 2-Ethylhexyl Acrylate as a Sensitizer for Radiation Vulcanization of Natural Rubber Latex. In: JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation of natural rubber latex: Proceedings of the international symposium on ..., held in Tokyo and Takasaki, July, 26-28, 1989*. Tokyo, 1990. p. 178-88 (JAERI-M-89-228).
- 18 DEVENDRA, R. & MAKUUCHI, K. *Development of new sensitizer for radiation vulcanization of natural rubber latex*. Final report to IAEA and to JAERI, 1987.
- 19 GAZOTTI, W. A. Jr.; RODRIGUEZ, M. A.; MARCO-A de PAOLI. Estabilidade de compostos de borracha de EPDM e de Borracha Natural perante solução de glutaraldeído. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, ano II, n1. p. 26-30, 1992.
- 20 GUEDES, S. M. L. & CONTIM, A. M. Processo Alternativo de Vulcanização do Látex de Borracha Natural Induzido por Radiação Ionizante. In ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA BORRACHA: *Anais do quarto congresso brasileiro de tecnologia da borracha. realizado em São Paulo, 17-19 de Setembro de 1991*. v. 1. p. 73-89.
- 21 JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation Vulcanization of Natural Rubber Latex: Proceedings of the International Symposium on..., held in Tokyo and Takasaki, 26-28 July, 1989*. Tokyo, 1990. p. 326-35.
- 22 JOUSSEF, A.I. Comunicação pessoal.
- 23 KEYY, B. R. *Drying: Principles and Practice*, Mc-graw Hill. 1972.
- 24 KLEIN, P. Making Rubber Goods of Latex by Electro-Deposition. *Rubber Industry*, v.4, n° 4, p. 343-51, 1928.
- 25 MACHI, S. Radiation Vulcanization of Natural Rubber Latex. In: JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation of natural rubber latex: Proceedings of the international symposium on ..., held in Tokyo and Takasaki, July, 26-28, 1989*. Tokyo, 1990. p. 1-412 (JAERI-M-89-228).

- 26 MAKUUCHI, K. Progress in Radiation Vulcanization of Natural Rubber Latex through International Cooperation. In: JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation vulcanization of natural rubber latex: Proceedings of the international symposium on..., held in Tokyo and Takasaki, July, 26-28, 1989.* Tokyo, 1990. p. 91-99 (JAERI-M-89-228).
- 27 MARTIN, V.J., MONTALBAN, A., CURBELO, S., Evaluación económica del proceso de irradiación para una planta multipropósito, Food Irradiation Processing, (Proceedings of a Symposium, Washington, D.C., 4-8 March 1985), IAEA, Vienna, 1985, p. 379-95.
- 28 MASEFIELD, J.; DIETZ, G. R.; OWENS W. M. Major Considerations Governing the Adoption of Cobalto-60 Sterilization. *Rad. Phys. Chem.*, 14: 277-83, 1979.
- 29 MOHID, N.; MAKUUCHI, K.; YOSHI, F.; ISHIGAKI, I. Effect of non-Rubber Components on Sensitized RVNRL. In: JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation vulcanization of natural rubber latex: Proceedings of the international symposium on..., held in Tokyo and Takasaki, July, 26-28, 1989.* Tokyo, 1990. p. 157-63 (JAERI-M-89-228).
- 30 MORITA T, M.; VIEGAS, R. M. *Manual de soluções, reagentes e solventes*, 2ed, sl, Edgar Blucher, 1972.
- 31 NAKAMURA, A.; IKARASHI, Y.; TSUCHIYA, T.; KANIWA, M., Radiation Vulcanized Natural Rubber Latex is Not Cytotoxic. In: JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation vulcanization of natural rubber latex: Proceedings of the international symposium on....., held in Tokyo and Takasaki, July, 26-28, 1989.* Tokyo, 1990. p. 79-87 (JAERI-M-89-228).
- 32 O ESTADO DE SÃO PAULO. Informações sobre a cultura do látex. Suplemento Agrícola, ano 34, número 1855. 2 de Maio de 1991. p 4-6.
- 33 PENDLE, T. D. The Natural Latex Industry and its Future Prospects. In: JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation vulcanization of natural rubber latex: Proceedings of the international symposium on..., held in Tokyo and Takasaki, July 26-28, 1989.* Tokyo, 1990. p. 27-41. (JAERI-M-89-228).
- 34 PERRY, J. H. P. ph.D. *Manual del ingeniero químico*, Tomo I, sección 13, p. 1239-62.
- 35 PRICE, J. W. *Nuclear Radiation Detection*. McGraw-Hill Book Company. 2ed, NY. p. 24. 1964.
- 36 RAYMOND, B. & SEYMOUR, C.E.C. Jr *Polymer Chemistry an Introduction*, 2 ed. New York, 1987, p. 200-7. Mac-Graw Hill.
- 37 RELA P. Comunicação pessoal.

- 38 RIDWAN, M. Pilot scale experiments on radiation vulcanization of Natural Rubber Latex. *Rad. Phys. Chem.*, 25 (4-6): 887-92, 1985.
- 39 SOUZA, A. *Comportamento do An-B/KOH/HPt-B na vulcanização do látex de borracha natural induzida com raios gama*. São Paulo, 1994 (Dissertação de mestrado, IPEN/CNEN-SP).
- 40 SPINKS, J.W.T. & WOODS, R.J. *An Introduction to Radiation Chemistry*. 3ed, p. 46, 1990.
- 41 SUNDARI, F.& MARGA, U. *Development of Condon and Gloves from Radiation Vulcanized Natural Rubber Latex*. Center for the Application of Isotopes and Radiation. Indonesia (JAERI-M-89-228) p. 132-5.
- 42 THOMAS, E. Effect of Non-Rubber Solids and Stabilizing Agents on Radiation Vulcanization of Natural Rubber Latex. In: JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation of natural rubber latex: Proceedings of the international symposium on ..., held in Tokyo and Takasaki, July, 26-28, 1989*. Tokyo, 1990. p. 178-88 (JAERI-M-89-228).
- 43 TODOROV, M. I. *The mechanism of radiation vulcanization of latex*. In: SECOND TIHANY SYMPOSIUM ON RADIATION CHEMISTRY. Dobo, J & Hedvig, P. (ed), Akameniai Kiado, Budapest, 1967. p. 749-56.
- 44 TRYBAL, R. E. *Operaciones de transferencias de masa*, 2ed. Cap. 12, p. 723-57. 1978.
- 45 SEELMANN-EGGEBERT, W.; PFENNIG, G.; MUNZEL, H.; KLEWENEBENIUS, H. Tabla de Núclidos. COMISION NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR., Buenos Aires, Argentina. 1981.
- 46 UTAMA, M. *Irradiated Latex and its Application*. Final report Viena, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Jan 1990 (IAEA-RU-2080).
- 47 WILLIAMS J. L., DUNN T. S. Radiation Sources - Gamma. *Rad. Phys. Chem.*, 14: 185-201, 1979.
- 48 VILLAR, G.E. *Coloides*. Montevideo, Uruguay, 1863. Mc-Graw Hill.
- 49 ZHONGHAI & MAKUUCHI, K. n-Butyl Acrylate as a Sensitizer for Radiation Vulcanization of Natural Rubber Latex. In: JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Radiation of natural rubber latex: Proceedings of the international symposium on ..., held in Tokyo and Takasaki, July, 26-28, 1989*. Tokyo, 1990. p. 326-335 (JAERI-M-89-228).