

BR 9023016  
INIS-BR-194

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA DAS ROUPAS PROTETORAS FEITAS DE TECIDO  
E SUA DESCONTAMINAÇÃO EM SOLUÇÕES AQUOSAS**

DAVID TADASHI FUKUMORI

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de "Mestre na Área de Concentração em Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: Dr. Gian-Maria Agostino Angelo Sordi

**SÃO PAULO**  
1989

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA DAS ROUPAS PROTETORAS FEITAS DE TECIDO  
E SUA DESCONTAMINAÇÃO EM SOLUÇÕES AQUOSAS**

**DAVID TADASHI FUKUMORI**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de "Mestre na Área de Concentração em Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: Dr. Gian-Maria Agostino Angelo Sordi



**SÃO PAULO**  
**1989**

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP - IPEN

**O sol**

**é a fonte de energia**

**que ilumina, aquece e proporciona  
as condições para a existência  
de vida na Terra.**

**Saibam os seres racionais**

**utilizar a energia**

**proveniente do núcleo atômico,  
em benefício de seus semelhantes,  
enquanto o sol e a vida existirem.**

Devo ao INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES e à COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR a grande parte de meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Quero manifestar os agradecimentos

ao Superintendente do IPEN - Dr. CLÁUDIO RODRIGUES,

ao Diretor de Segurança Nuclear - Dr. LAÉRCIO ANTONIO VINHAS,

ao Diretor de Materiais Nucleares - Dr. ALCÍDIO ABRÃO

ao Orientador - Dr. GIAN-MARIA A. A. SORDI e

a todos que permitiram, auxiliaram e incentivaram a elaboração e a conclusão deste trabalho.

CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA DAS ROUPAS PROTETORAS FEITAS DE TECIDO  
E SUA DESCONTAMINAÇÃO EM SOLUÇÕES AQUOSAS.

DAVID TADASHI FUKUMORI

R E S U M O

Esta dissertação versa sobre a contaminação radioativa , sua prevenção, controle e descontaminação, concernentes às roupas protetoras feitas de tecido habitualmente utilizadas, em condições normais de trabalho, nas instalações onde os materiais radioativos são manuseados ou processados, especialmente como fontes não seladas.

Estão descritas as características dos tecidos das roupas protetoras e dos contaminantes, os mecanismos da contaminação, os riscos associados às roupas contaminadas, bem como o planejamento das áreas de trabalho, a monitoração e os limites para controlar a contaminação. Referindo-se à descontaminação, deu-se a ênfase aos reagentes, seus mecanismos de ação e métodos para avaliar as suas eficiências.

Os reagentes selecionados foram testados experimentalmente e suas eficiências para a descontaminação das amostras de tecido de algodão, contaminadas com solução de nitrato de urânio, foram avaliadas pelas taxas de contagem, determinadas por meio de um sistema provido de um detector Geiger-Müller. Entre os reagentes testados estão os agentes complexantes, tensoativos e produtos comerciais de limpeza. Os resultados obtidos foram analisados e interpretados em termos estatísticos, radioquímicos e do ponto de vista da Proteção Radiológica.

A contaminação radioativa das roupas protetoras e a sua descontaminação são assuntos extensos e que ainda podem ser desenvolvidos e aprimorados; várias sugestões foram apresentadas para estudos posteriores.

**RADIOACTIVE CONTAMINATION OF PROTECTIVE CLOTHES MADE OF TEXTILE  
AND THEIR DECONTAMINATION IN AQUEOUS SOLUTIONS.**

**DAVID TADASHI FUKUMORI**

**A B S T R A C T**

This dissertation deals with the radioactive contamination, its prevention, control and decontamination, related to protective clothing made of textile and usually weared in normal working conditions, within the installations where radioactive materials are handled or processed, especially as unsealed sources.

The features of textile materials and contaminants, contamination mechanisms, risks related to contaminated clothes, planning of working areas, monitoring and surface contamination limits are described. Concerning to decontamination, the reagents, their action mechanisms and methods of efficiency evaluation are emphasized.

The selected reagents were experimentally tested and their efficiencies in decontaminating cotton cloth samples, contaminated with uranyl nitrate solution, were evaluated by means of counting rate determined with a Geiger-Müller provided counting system. In this way, complexing agents, surfactants and commercial cleaning products were tested. The results were analysed and interpreted considering statistical, radiochemical and Radiation Protection aspects.

Both, the radioactive contamination and decontamination of protective clothes are extensive matters and they still could be developed and improved; thus, many suggestions were presented as further studies.

# Í N D I C E

	Página
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Contaminação Radioativa e Roupas Protetoras ...	1
1.2. Utilização de Roupas Protetoras no <u>IPEN</u> .....	4
1.3. Objetivos do Trabalho .....	5
2. CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA DAS ROUPAS PROTETORAS .....	6
2.1. Natureza das Roupas Protetoras .....	6
2.2. Contaminantes Radioativos .....	9
2.3. Principais Mecanismos da Contaminação de Roupas	11
2.4. Riscos Radiológicos .....	12
3. PREVENÇÃO E CONTROLE DA CONTAMINAÇÃO DE ROUPAS .....	15
3.1. Planejamento das Áreas de Trabalho .....	15
3.2. Monitoração .....	17
3.3. Limites de Contaminação .....	18
4. DESCONTAMINAÇÃO DE ROUPAS .....	24
4.1. Procedimentos Gerais .....	24
4.2. Processo .....	26
4.3. Variáveis do Processo .....	28
4.4. Projeto da Instalação .....	29
4.5. Reagentes de Descontaminação .....	31
4.5.1. Agentes Tensoativos .....	31
4.5.2. Agentes Complexantes .....	34
4.5.3. Sabões e Detergentes .....	36
4.5.4. Formulações Especiais .....	38
4.6. Mecanismos de Remoção dos Contaminantes .....	38
4.7. Métodos para Avaliar a Descontaminação .....	41

	Página
<b>5. PARTE EXPERIMENTAL</b> .....	<b>47</b>
<b>5.1. Considerações Gerais</b> .....	<b>47</b>
<b>5.2. Materiais e Equipamentos</b> .....	<b>48</b>
5.2.1. Contaminante, Tecido e Materiais de Vidro .....	48
5.2.2. Reagentes Químicos .....	49
5.2.3. Equipamentos .....	50
<b>5.3. Procedimentos e Ensaios</b> .....	<b>50</b>
5.3.1. Preparação das Amostras de Tecido .....	50
5.3.2. Contagens e Tratamento dos Dados .....	50
5.3.3. Ensaios de Contaminação das Amostras de Tecido .....	53
<b>5.4. Procedimentos e Resultados de Descontaminação</b> .	<b>56</b>
5.4.1. Descontaminação com Água .....	56
5.4.2. Descontaminação com Soluções de Substân cias Diferentes .....	57
5.4.3. Descontaminação Sequencial com Água e com Citrato de Sódio a 0,5% .....	57
5.4.4. Descontaminação Comparativa com Citratos	59
5.4.5. Descontaminação com Carbonato de Sódio em Diferentes Concentrações .....	61
5.4.6. Descontaminação com Produtos Comerciais de Limpeza .....	61
<b>6. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>63</b>
6.1. Observação e Análise dos Dados .....	63
6.2. Interpretação Radioquímica .....	71
6.3. Interpretação sob o Ponto de Vista da Proteção Radiológica .....	73
6.4. Fontes de Erros .....	74

	<b>Página</b>
<b>7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>76</b>
<b>7.1. Comentários Gerais .....</b>	<b>76</b>
<b>7.2. Sugestões para Trabalhos Posteriores .....</b>	<b>77</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 <b>79</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA E ROUPAS PROTETORAS

O manuseio de qualquer material radioativo envolve um certo risco, visto que as radiações ionizantes oriundas do material podem causar efeitos deletérios nos seres humanos. Quando na forma não selada, além de causar a irradiação direta, o material poderá contaminar o ar, as superfícies dos locais de trabalho e, inclusive as pessoas, se não forem tomadas as precauções necessárias.

A contaminação radioativa pode ser definida como a presença indesejável de materiais radioativos, em qualquer meio ou superfície<sup>(4,8,44)</sup>. É indesejável porque oferece riscos à saúde das pessoas que podem sofrer diretamente a irradiação externa, ou a irradiação interna em consequência da incorporação dos contaminantes por inalação, ingestão, ferimentos ou absorção cutânea. Além disso, pode interferir nas medidas que têm por base as contagens das radiações ou pode comprometer a qualidade de um produto.

Muitos inconvenientes da contaminação radioativa podem ser reduzidos ou eliminados pelo planejamento cuidadoso e pela construção bem feita do local de trabalho, pelo manuseio correto e pela contenção efetiva dos materiais radioativos.

O confinamento total do material radioativo pelos dispositivos de proteção da instalação nem sempre é praticável ou justifi-

ficável, técnica ou economicamente. Portanto, nas áreas de trabalho onde a contaminação radioativa não é totalmente confinada, torna-se necessário dar uma proteção suplementar aos trabalhadores, fornecendo-lhes roupas protetoras ou equipamentos de proteção individual, que sejam adequados para cada circunstância.

A principal função das roupas e dos equipamentos de proteção é interceptar os materiais que, de outro modo, iriam contaminar as roupas pessoais, as mãos, os cabelos, a pele e, inclusive, as partes internas do corpo. Certos equipamentos podem ser usados para reduzir a exposição das partes do corpo às radiações beta, gama ou X.

Vale enfatizar que, em instalações nucleares ou radioativas bem projetadas e construídas, a utilização intensa de indumentárias especiais de proteção é necessária apenas em áreas restritas ou em situações de emergência, quando há risco de contaminação de pessoas.

Nas áreas onde a probabilidade de ocorrer uma contaminação é pequena, roupas protetoras simples, como aventais e capas de laboratório, são habitualmente utilizadas sobre as roupas pessoais, como medida preventiva.

Em áreas onde a contaminação pode atingir níveis muito elevados, comprometendo inclusive a qualidade do ar, recomenda-se a troca completa da roupa pessoal por trajes especiais que isolem completamente o indivíduo do ambiente contaminado. Fornece-se também um equipamento de respiração, que previne a inalação de contaminantes pelo usuário.

As roupas e os equipamentos de proteção são utilizados de acordo com as condições do local do trabalho, o risco existente, o custo envolvido, etc. As recomendações publicadas pela Agência Internacional de Energia Atômica<sup>(18,19,20)</sup>, bem como aquelas fornecidas pelos fabricantes, podem servir como guia para a seleção

---

e o uso correto das roupas e dos demais equipamentos de proteção.

As roupas empregadas em áreas sujeitas à contaminação radioativa exigem cuidados e tratamentos especiais, porque podem portar quantidades nocivas de radionuclídeos e podem constituir um meio de dispersão dos contaminantes para locais não contaminados. Por causa dos riscos inerentes, não devem ser levianamente manuseadas ou simplesmente enviadas para lavanderias públicas.

Os estabelecimentos que adotarem roupas protetoras contra a contaminação, necessitarão de serviços de suporte para mantê-las em boas condições de uso e livres dos contaminantes radioativos. Estes serviços incluem a coleta de roupas usadas nas áreas de trabalho, a classificação, a descontaminação, os acabamentos finais e a redistribuição. Nesses estabelecimentos, a descontaminação de roupas é essencialmente um serviço prático que concorre com os propósitos da Proteção Radiológica e da higiene.

As questões associadas à descontaminação de roupas de tecido, radioativamente contaminadas, constituem ainda importantes temas de pesquisas que acompanham a evolução da tecnologia nuclear. Muitos estudos têm sido realizados, considerando os diversos tipos de fibras têxteis, a variedade dos radionuclídeos e as suas formas químicas, os reagentes e as condições dos processos de descontaminação<sup>(36)</sup>.

A pesquisa sobre a descontaminação de roupas pode ser desenvolvida dentro dos objetivos da Proteção Radiológica, a fim de, com a otimização do controle das roupas contaminadas e com o aprimoramento das técnicas de descontaminação, contribuir para a redução das doses equivalentes dos trabalhadores a um mínimo razoável e para a observação dos limites recomendados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica<sup>(23)</sup>.

## 1.2. UTILIZAÇÃO DE ROUPAS PROTETORAS NO IPEN

O INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN) é um estabelecimento onde se manuseiam várias espécies de radionuclídeos que têm aplicações científicas, médicas ou industriais.

Nos setores onde existem células blindadas e caixas de manipulação providas de luvas, que confinam os materiais radioativos durante as operações e nos laboratórios onde os materiais são manuseados em quantidades muito pequenas, conforme os procedimentos recomendados, as ocorrências da contaminação de roupas são raras.

Em determinadas áreas das usinas de processamento químico do urânio e do tório e das usinas de tratamento metalúrgico do urânio, que fazem parte do ciclo do combustível nuclear, há operações em que os trabalhadores devem manusear os compostos dos elementos citados, usando roupas protetoras. Nessas áreas de trabalho, a contaminação de roupas é quase inevitável, a não ser que todo o processamento seja automatizado e os compostos sejam completamente isolados do ambiente de trabalho.

A maioria das roupas protetoras usadas no IPEN consiste de aventais (capas de laboratório ou guarda-pós), macacões e uniformes feitos de tecido de algodão. Essas roupas, quando utilizadas nas áreas sujeitas à contaminação, são recolhidas e enviadas ao Laboratório de Descontaminação, onde se procedem a descontaminação e a monitoração, a fim de garantir o asseio e as boas condições de uso.

### 1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os principais objetivos deste trabalho são:

- a) estudar as características e os cuidados concernentes à contaminação radioativa das roupas protetoras utilizadas em condições normais de trabalho;
- b) pesquisar as técnicas e os reagentes usados na descontaminação das roupas, especialmente aquelas confeccionadas com tecidos; e
- c) avaliar empiricamente a eficiência dos reagentes na remoção dos contaminantes radioativos do tecido de algodão em meio aquoso.

A pesquisa deve ser conduzida com vista ao aprimoramento dos procedimentos para o controle da contaminação das roupas de trabalho, principalmente no que diz respeito às técnicas de descontaminação.

Os contaminantes radioativos a serem estudados, devem ser representativos dos que, efetivamente, causam a contaminação de roupas nas áreas de trabalho. São de interesse especial, os compostos de urânio das usinas de processamento químico, integrante do ciclo do combustível nuclear.

As delimitações dos objetivos expostos são de ordem técnica e econômica. Os reagentes usados na descontaminação não devem prejudicar as fibras dos tecidos, devem ser eficientes e baratos para não onerar em demasia o processo de descontaminação de roupas.

## 2. CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA DAS ROUPAS PROTETORAS

### 2.1. NATUREZA DAS ROUPAS PROTETORAS<sup>(16,19)</sup>

Os materiais que compõem as roupas protetoras utilizadas contra a contaminação radioativa podem ser impermeáveis ou permeáveis.

As roupas feitas com materiais impermeáveis são utilizadas onde possam ocorrer contaminações por líquidos, pós ou gases radioativos, quando as roupas de tecidos forem insuficientes para proteger os usuários. São geralmente destinadas para operações especiais de manutenção, descontaminação ou de emergência.

Os materiais impermeáveis das roupas protetoras normalmente são filmes ou folhas de polímeros orgânicos, lisos e pouco susceptíveis à impregnação de contaminantes. O cloreto de polivinila (ou PVC) é um dos materiais mais utilizados, pois apresenta excelente resistência química, custo relativamente baixo e não é inflamável<sup>(16)</sup>.

As roupas impermeáveis geralmente são usadas em conjunto com botas, luvas e máscaras, isolando completamente os usuários do ambiente contaminado. Estas roupas não são normalmente adotadas para utilização rotineira, por serem desconfortáveis aos usuários e geralmente necessitarem de um arejamento forçado.

As roupas protetoras comuns, como macacões, aventais e

uniformes de trabalho, são confeccionadas com tecidos. Estes, por sua vez, são constituídos por fios ou linhas de materiais denominados fibras têxteis, e são geralmente permeáveis.

Existem diversas fibras têxteis naturais ou artificiais (12,42). As fibras naturais podem ser de origem vegetal, animal ou mineral. O algodão e o linho são produtos celulósicos sintetizados pelas plantas; a lã e a seda são proteínas produzidas por animais; e o amianto é um mineral. Entre as fibras artificiais citam-se rayons, poliésteres, poliamidas e poliacrilonitrilas. A tabela 2.1. apresenta resumidamente a classificação das diversas fibras.

TABELA 2.1. Classificação das fibras têxteis.

<b>Fibras Têxteis</b>	<b>Naturais</b>	minerais	asbesto (amianto)
		proteínicas	lã, seda
		celulósica	algodão, linho, cânhamo, juta
	<b>Artificiais</b>	inorgânicas	vidro, metal, sílica
		orgânicas de polímeros naturais	rayon, alginato, borracha
		orgânicas de polímeros sintéticos	poliéster, poliamida, polivinila, poliolefina, poliacrilonitrila

A maioria das fibras têxteis, quer seja natural ou artificial, é constituída de polímeros, cujas moléculas possuem um grande número de unidades elementares repetidas (monômeros). A tabela 2.2. apresenta as unidades características da estrutura química de alguns polímeros.

TABELA 2.2. Estruturas químicas de fibras têxteis<sup>(25)</sup>.

Polímero	Estrutura química	Nomes comuns das fibras têxteis
Celulose	$\left[ \begin{array}{c} \text{H}_2\text{COH} \\   \\ \text{CH} - \text{O} \\   \quad \quad   \\ -\text{C}-\text{H} \quad \quad \text{HC}-\text{O}- \\   \quad \quad \quad   \\ \text{HCOH} \quad \quad \text{HCOH} \end{array} \right]_n$	Algodão Linho Rayon (viscose)
Poliâmida	$\left[ -\text{NH} - (\text{CH}_2)_5 - \overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} - \right]_n$	Nylon (6) (EUA) Perlon (RFA)
Poliéster	$\left[ -\text{CH}_2\text{CH}_2 - \overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} - \text{C}_6\text{H}_4 - \overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} - \text{O} - \right]_n$	Terilene (Ingl.) Dralon (EUA)
Poliacrilonitrila	$\left[ -\text{CH}_2 - \underset{\text{CN}}{\text{CH}} - \right]_n$	Orlon (EUA) Acrilan (EUA)

Dentre os diversos tipos de fibras têxteis, o algodão é ainda bastante utilizado na confecção de roupas protetoras comuns. O tecido desse material possui uma grande capacidade de absorver e reter diversas substâncias. As roupas protetoras de al

godão preservam o usuário do respingo radioativo e da contaminação de superfície e, além disso, são mais agradáveis de serem usadas em clima quente.

As vantagens e as desvantagens do algodão comparadas às do nylon foram apontadas por BARRY<sup>(3)</sup>. O algodão é mais absorvente, porém o segundo é mais fácil de lavar e menos suscetível à fixação de contaminantes. A escolha do tipo de tecido para a roupa protetora dependerá da disponibilidade no mercado, do custo, das condições de uso e da facilidade de lavar e descontaminar.

Entre os vários tipos de tecidos de algodão, poliéster, vinyon, rayon e de suas misturas, testados por Morishima e seus colaboradores<sup>(28)</sup>, utilizando  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Co}$  e  $^{134}\text{Cs}$  como contaminantes, o tecido de poliéster combinado com 35% de algodão foi considerado o que apresentou melhores qualidades, sendo pouco suscetível à contaminação e fácil descontaminá-lo.

## 2.2. CONTAMINANTES RADIOATIVOS

Diferencia-se a contaminação radioativa daquela biológica ou química, pelo fato de ser constituída por núclídeos emissores de radiações ionizantes - os radionuclídeos.

Cada radionuclídeo é identificado pelo seu número atômico, massa atômica, meia-vida, tipo e energia das radiações emitidas.

De um modo geral, qualquer radionuclídeo pode causar uma contaminação radioativa, porém muitos deles possuem meia-vida extremamente curta ou existem em quantidades muito pequenas que raramente constituem uma inconveniência.

Os principais radionuclídeos virtualmente capazes de causar uma contaminação radioativa são aqueles manuseados ou processados em quantidades significativas e que possam apresentar riscos radiológicos. Citam-se entre eles os núclídeos físséis e fér-

teis, os produtos de fissão e os produtos ativados<sup>(36)</sup>.

Os nuclídeos físséis e férteis são utilizados na fabricação de combustíveis nucleares. Os principais são os isótopos de urânio, tório e plutônio. Pertencem aos elementos químicos metálicos com massa atômica elevada e sofrem decaimento para outros "nuclídeos-filhos" também radioativos.

Os produtos de fissão são formados durante a irradiação dos combustíveis nucleares e nos testes nucleares. São radioisótopos de diversos elementos químicos e cujo número de massa está a proximadamente numa faixa compreendida entre 70 e 160, quando considerados em quantidades nuclearmente significativas. Vários desses isótopos podem ser separados no reprocessamento de elementos combustíveis gastos.

Os produtos ativados são obtidos pela irradiação de átomos estáveis em reatores nucleares e em aceleradores de partículas. São utilizados sob diversas formas químicas e físicas em pesquisa, medicina, agricultura e indústria.

As características de uma contaminação não se limitam ao comportamento isolado dos radionuclídeos envolvidos, pois podem formar diferentes compostos químicos e apresentar-se como íons, moléculas, colóides ou partículas macroscópicas.

Os contaminantes subsistem sob a forma iônica, geralmente em soluções aquosas, ou adsorvidos na superfície de objetos. Os radionuclídeos dos elementos químicos metálicos dão origem principalmente a cátions e dos não metálicos formam predominantemente ânions.

Os contaminantes moleculares apresentam os radionuclídeos substituindo um ou mais átomos estáveis que compõem a molécula. As moléculas marcadas são exemplos típicos dessa classe de contaminantes.

Em dimensões coloidais (1 nm a 1  $\mu$ m), os contaminantes podem assumir a forma aérea, como névoa, fumaça e poeira. Podem constituir também emulsões e suspensões em meios líquidos.

Os contaminantes podem apresentar-se também como partículas macroscópicas, tais como fragmentos de minérios, sais insolúveis precipitados e pós de óxidos metálicos. Nesses casos, geralmente os radionuclídeos estão agregados ou associados a substratos não radioativos.

Normalmente, os contaminantes não se apresentam sob uma forma definida. São complexos, muitas vezes associados a sujidades como fuligem, poeira e materiais oleosos.

### 2.3. PRINCIPAIS MECANISMOS DA CONTAMINAÇÃO DE ROUPAS<sup>(2,3,16)</sup>

A contaminação da roupa é resultante principalmente da deposição de poeira, do respingo ou do derramamento de líquidos, do contato da roupa com uma superfície contaminada, ou ainda, da adsorção de gases e vapores radioativos.

A poeira suspensa no ar tende a se depositar por gravidade, sobre as superfícies expostas do local, com maior ou menor velocidade, dependendo da densidade, das dimensões das partículas e do movimento do ar.

Os contaminantes poeirentos depositados sobre a roupa podem permanecer soltos, com possibilidade de serem ressuspensos pelo movimento da roupa ou do ar. Por causa da possibilidade de ressuspensão, dispersão e inalação desse tipo de contaminante, as roupas utilizadas nessas áreas devem ser removidas ou manuseadas com cuidado.

O respingo de uma solução geralmente sofre uma absorção rápida pelo tecido. Com o decorrer do tempo, o solvente tende a evaporar-se aumentando a concentração do soluto e também a fixa

ção dos contaminantes sobre o tecido.

Os derramamentos de grandes quantidades de líquidos radioativos podem resultar em complicações maiores. O líquido derramado em excesso sobre a roupa, não sendo totalmente absorvido, pode penetrar através dos poros dos tecidos e atingir as roupas de baixo e o corpo do indivíduo. Por isso, onde há possibilidade de ocorrer derramamentos em tais proporções, recomenda-se vestir roupas protetoras impermeáveis.

Os contaminantes presentes sobre uma superfície, principalmente na forma líquida ou de pó, podem ser transferidos para a roupa pelo contato desta com a superfície contaminada. A fração da contaminação transferida para a roupa depende do grau de fixação dos contaminantes na superfície, do modo pelo qual a roupa e a superfície se tocam e do material que constitui a roupa.

A contaminação de roupas por adsorção de gases ou vapores radioativos é menos comum, em relação às causas mencionadas anteriormente. Pode ocorrer em ambientes onde há gases ou substâncias voláteis como iodo radioativo ou  $UF_6$ . Nesse caso, do ponto de vista radiológico, a contaminação do ar é bastante crítica, pois os contaminantes podem atingir facilmente as vias respiratórias dos trabalhadores, sendo necessário um equipamento de proteção da respiração. Além disso, as roupas devem ser impermeáveis e não de tecidos, pois estes apresentam poros que permitem a difusão dos gases contaminantes.

#### 2.4. RISCOS RADIOLÓGICOS<sup>(8)</sup>

A contaminação de roupa pode ser comparada a uma fonte radioativa plana, localizada muito próxima ao corpo do usuário da roupa. A dose equivalente recebida pelo usuário dependerá da atividade, do espectro de emissão dos radionuclídeos, da distribui

ção dos contaminantes na roupa e de outros fatores como auto-absorção, espalhamento da radiação, etc.

As partículas alfa e as radiações beta de baixa energia possuem curto alcance, isto é, são pouco penetrantes e geralmente são detidas pela roupa, pelo ar ou pelas camadas mais externas da pele. As radiações beta com energias superiores podem provocar lesões na pele e nas regiões subcutâneas. As radiações gama e X, por causa do alto poder de penetração, constituem risco de irradiação externa, mesmo à distância.

Além de afetar uma pessoa pela irradiação externa, os contaminantes podem irradiar internamente quando forem inalados, ingeridos ou absorvidos através da pele ou por ferimento.

Quando introduzidos no corpo, os radionuclídeos poderão causar danos aos órgãos internos. Existem alguns radionuclídeos mais perigosos que outros. Os mais comuns foram classificados conforme a radiotoxicidade relativa por unidade de atividade, em quatro grupos: radiotoxicidade muito alta, alta, moderada e baixa<sup>(20)</sup>.

A ingestão dos contaminantes presentes na roupa é rara, porém pode depender do hábito do trabalhador. A mão é considerada o principal veículo para a ingestão dos contaminantes.

A absorção através da pele poderá ocorrer quando a contaminação atingir as partes do corpo e especialmente os ferimentos abertos. A absorção depende da forma química do contaminante; compostos tritiados, iodo radioativo e algumas substâncias orgânicas apresentam maiores riscos de serem absorvidos.

O principal risco da contaminação de roupa é consequência da probabilidade de inalar os contaminantes radioativos.

A contaminação de roupa pode ser considerada fixa ou solta, dependendo da sua mobilidade. A contaminação fixa não pode ser removida ou transferida para outras superfícies ou meios, e

não ser por tratamentos específicos. Ao contrário, a contaminação solta pode facilmente ser suspensa ou dispersa no ar, por simples sacudidura da roupa, ou transferida para outras superfícies pelo contato. Portanto, a última apresenta maior risco de ser inalada ou transferida às pessoas, enquanto a primeira só apresenta riscos de irradiação externa.

Para estimar a quantidade da contaminação de superfície que possa ser dispersa no ar, em diversas circunstâncias, foi definido o fator de ressuspensão. Este é a razão entre a contaminação de uma superfície e a conseqüente contaminação do ar. O fator de ressuspensão determinado durante as trocas de roupas contaminadas em vestiários, tem variado entre  $10^{-4} \text{ m}^{-1}$  a  $10^{-3} \text{ m}^{-1}$  (8).

O maior risco de inalação ocorre durante as operações que precedem os processos de descontaminação. Qualquer contaminação remanescente na roupa, depois da descontaminação, pode ser considerada fixa.

### 3. PREVENÇÃO E CONTROLE DA CONTAMINAÇÃO DE ROUPAS

#### 3.1. PLANEJAMENTO DAS ÁREAS DE TRABALHO

O planejamento da área onde o material radioativo será manuseado, é uma etapa essencial na prevenção da contaminação radioativa e da irradiação dos indivíduos.

Em certas operações, os riscos de contaminação e de irradiação podem ser reduzidos confinando as fontes radioativas em células blindadas ou em caixas de manipulação providas de luvas. A exaustão ou a circulação adequada do ar pode evitar que operadores inalem os contaminantes voláteis.

As áreas onde a contaminação radioativa pode oferecer riscos de irradiação externa ou interna, devem ser visivelmente demarcadas e o acesso a elas deve ser restrito às pessoas adequadamente instruídas e providas de roupas e de equipamentos de proteção.

Geralmente, na entrada das áreas sujeitas à contaminação , instala-se um vestiário onde se efetua a troca de roupas. O indivíduo ao entrar, deixa a sua roupa pessoal e veste a de proteção , ao sair, remove aquela usada, vestindo em seguida a sua própria roupa. O vestiário é provido de monitores que detectam a contaminação das mãos, dos pés e das roupas; possui chuveiros e pias que

possibilitam a descontaminação pessoal em caso de necessidade e, também, locais ou recipientes para a coleta das roupas contaminadas. A figura 3.1. mostra um esquema do vestiário baseado nas recomendações da AIEA<sup>(17)</sup>.

Em pequenos laboratórios, onde não há vestiários, as roupas usadas durante a manipulação de fontes não seladas são deixadas em local apropriado, preferencialmente próximo ao do trabalho. Essas roupas não devem ser usadas em locais como refeitório, biblioteca, escritório ou sala de estudo em nenhuma circunstância<sup>(30)</sup>.

Os trabalhadores devem ser instruídos quanto ao uso e às limitações das roupas protetoras. Devem conhecer os procedimentos para vestir ou trocar de roupa sem transferir a contaminação para o seu corpo, para a roupa pessoal ou para outros locais.

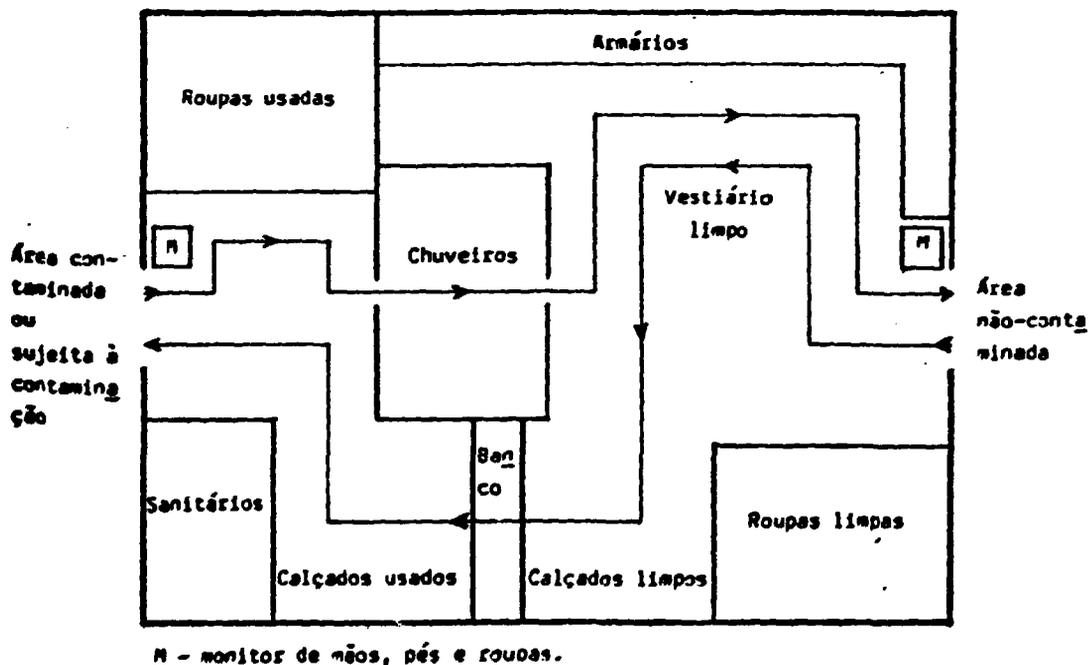


Figura 3.1. Esquema do vestiário de acesso às áreas sujeitas à contaminação<sup>(17)</sup>.

### 3.2. MONITORAÇÃO<sup>(8,14)</sup>

As roupas protetoras e as pessoais usadas em áreas sujeitas à contaminação radioativa devem ser examinadas por meio da monitoração, periodicamente, ou ao término do trabalho que tenha envolvido fontes radioativas não seladas.

A monitoração de roupas é realizada com o intuito de prevenir a dose equivalente excessiva ou desnecessária do indivíduo e o espalhamento da contaminação nas roupas ou por meio delas para outros locais inconvenientes. As roupas nas quais forem constatadas contaminações devem ser separadas convenientemente e recolhidas para a descontaminação.

Os instrumentos destinados à monitoração da contaminação de roupas podem ser fixos ou portáteis. Nas saídas das áreas contaminadas, normalmente são instalados detectores fixos que monitoram tanto as roupas, como as mãos e os calçados. Esses detectores indicam se alguma parte do corpo ou do vestuário está contaminada, por meio de um medidor, um sinal luminoso ou sonoro. Alguns medidores portáteis da taxa de exposição ou da taxa de contagem, podem ser utilizados também para a avaliação da contaminação.

A monitoração exerce também uma importante função na classificação de roupas no Laboratório de Descontaminação (item 4.1). As roupas com diferentes tipos e níveis de contaminação podem ser separadas a critério da monitoração antes de serem submetidas à descontaminação. Outrossim, a monitoração deve garantir que as roupas a serem reutilizadas deixem o Laboratório de Descontaminação, livres da contaminação.

A interpretação das medidas da contaminação de roupas pode ser feita em termos de limites derivados descritos a seguir (item 3.3).

### 3.3. LIMITES DE CONTAMINAÇÃO

A contaminação radioativa presente na roupa pode dar origem a uma dose equivalente no indivíduo em consequência da irradiação externa ou da incorporação dos contaminantes.

A relação entre a contaminação de roupa e a dose equivalente é bastante complexa e nem sempre pode ser determinada por causa de fatores tão variáveis como a distribuição dos contaminantes sobre a roupa, a energia das radiações emitidas pelos radionuclídeos, absorção das radiações e hábitos pessoais dos indivíduos.

Na prática, a contaminação de roupa tem sido avaliada pela medida da taxa de contagem, taxa de exposição ou, principalmente, da atividade por unidade de área.

Na monitoração da contaminação de superfícies, onde é incluída a monitoração de roupas, é comum fazer uso de limites que auxiliem a interpretação das medidas da contaminação.

Até a publicação dos modelos para calcular os limites derivados de trabalho para a contaminação de superfícies, pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), ainda não existiam limites de contaminação aceitos internacionalmente. Muitos países e diferentes instituições haviam estabelecido ou adotado seus próprios limites (20,8).

Os modelos de derivação apresentados pela AIEA consideram os radionuclídeos mais perigosos e os riscos de inalação, de ingestão e de irradiação externa, dentro dos conceitos e limites recomendados pela COMISSÃO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA (CIPR) em 1966 (22) e pela AIEA em 1967 (15).

Os limites de contaminação de superfícies foram derivados do risco de inalação, dividindo-se as concentrações máximas permitíveis de  $^{239}\text{Pu}$  (para os emissores alfa) e  $^{90}\text{Sr}$  (para os emissores beta) no ar pelo fator de ressuspensão.

Para derivar os limites pelo risco de ingestão, supôs-se

que uma pessoa ingerisse diariamente os contaminantes mais perigosos,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{210}\text{Pb}$ , presentes numa área de  $10\text{ cm}^2$  de pele. A derivação dos limites pelo risco de irradiação externa foi feita estimando-se a taxa de dose correspondente a uma fonte plana de partículas beta de energia máxima entre 0,5 e 3,0 MeV.

A tabela 3.1. apresenta os limites derivados de trabalho para a contaminação de superfícies, da Grã-Bretanha<sup>(8,11)</sup>.

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) publicou os limites de trabalho para a contaminação de superfícies na Resolução CNEN 6/73<sup>(10)</sup>.

Observa-se que os limites derivados para a contaminação de superfícies são estabelecidos para os contaminantes emissores de partículas alfa e beta, em atividade por unidade de área ( $\text{Bq.cm}^{-2}$ ). As emissões das radiações gama e X são de importância secundária na monitoração da contaminação de superfície, ainda que o risco de irradiação associado a elas não deva ser desconsiderado.

Recentemente, os limites que restringem a contaminação de superfícies foram reavaliados pela National Radiological Protection Board (NRPB)<sup>(45)</sup>, da Inglaterra, à luz dos conceitos mais recentes do CIRP<sup>(23)</sup>. O conselho inglês apresenta os limites derivados para a contaminação de superfícies nas unidades do SI ( $\text{Bq.cm}^{-2}$ ) e propõe uma nova classificação dos radionuclídeos para o controle da contaminação de superfície em locais de trabalho.

A partir de 1º de agosto de 1988, a CNEN adotou os novos limites britânicos. A partir desta data e durante o período de 2 anos, as instituições atualmente em operação deverão se adaptar aos novos limites, podendo utilizar tanto os antigos como os novos, no período citado<sup>(9)</sup>.

As tabelas 3.2. e 3.3. apresentam, respectivamente, a classificação dos radionuclídeos e os limites derivados para a contaminação de superfícies, propostos pela NRPB e adotados pela CNEN.

TABELA 3.1. Limites<sup>a</sup> derivados de trabalho para a contaminação de superfície<sup>(9,10,11)</sup>

TIPO DE SUPERFÍCIE	PRINCIPAIS EMISSORES ALFA <sup>b</sup> ( $\mu\text{Ci}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	EMISSORES ALFA DE BAIXA TOXICIDADE <sup>c</sup> ( $\mu\text{Ci}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	EMISSORES BETA ( $\mu\text{Ci}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	EMISSORES BETA DE BAIXA ENERGIA <sup>d</sup> 0,2 MeV máx. ( $\mu\text{Ci}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
ÁREAS INATIVAS E DE BAIXA ATIVIDADE ROUPA PESSOAL	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
ÁREAS ATIVAS ROUPAS NÃO USADAS NORMALMENTE EM ÁREAS INATIVAS	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$
PELE	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$

Observações referentes à tabela 3.1.

a) Os valores médios devem ser tomados em áreas de até  $300\text{cm}^2$  de superfícies inanimadas; de até  $1000\text{cm}^2$  de pisos, paredes e tetos; de até  $100\text{cm}^2$  de pele e de até  $300\text{cm}^2$  da mão.

b) Todos os emissores alfa não listados em c.

c) Isótopos do urânio (exceto  $^{230}\text{U}$ ,  $^{232}\text{U}$  e  $^{233}\text{U}$ ); urânio natural enriquecido ou empobrecido; tório natural;  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$  e  $^{230}\text{Th}$  quando estiverem diluídos a uma atividade específica da mesma ordem daquela do urânio e tório naturais; nuclídeos de meia-vida curta tais como o  $^{211}\text{At}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  e filhos dos isótopos de radônio.

A atenuação dos limites aplicada aos emissores beta de baixa energia não é válida para os isótopos de plutônio.

TABELA 3.2. Radionuclídeos por classe (9,45)

CLASSE	R A D I O N U C L Í D E O
I	$^{227}\text{Ac}$ , $^{228}\text{Th}$ , $^{230}\text{Th}$ , Th-nat., $^{231}\text{Pa}$ , $^{232}\text{U}$ , $^{233}\text{U}$ , $^{234}\text{U}$ , $^{236}\text{U}$ , emissores alfa com $Z > 92$
II	$^{147}\text{Sm}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{227}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , U-emp., U-nat., U-enr., $^{241}\text{Pu}$
III	demais radionuclídeos não especificados nas classe IV e V.
IV	$^{14}\text{C}$ , $^{35}\text{S}$ , $^{54}\text{Mn}$ , $^{57}\text{Co}$ , $^{65}\text{Zn}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{75}\text{Se}$ , $^{77}\text{Sr}$ , $^{99}\text{Tc}^m$ , $^{109}\text{Cd}$ , $^{123}\text{I}$ , $^{125}\text{I}$ , $^{129}\text{Cs}$ , $^{197}\text{Hg}$
V	$^3\text{H}$ , $^{51}\text{Cr}$ , $^{55}\text{Fe}$ , $^{63}\text{Ni}$ , $^{131}\text{Cs}$

TABELA 3.3. Limites derivados para contaminação de superfícies (9,45)

CATEGORIA	SUPERFÍCIE	LIMITE DE CONTAMINAÇÃO SUPERFICIAL ( Bq.cm <sup>-2</sup> )						
A	Interior e conteúdo de caixas de luvas; capelas com exaustão.	O mínimo razoavelmente exequível						
B	Áreas restritas; utensílios, equipamentos (incluindo roupas de proteção individual), materiais e artigos dentro de áreas restritas, excluindo as da categoria A.	extensão da contaminação ( m <sup>2</sup> )	Classe I	Classe II	Classe III		Classe IV	Classe V
		< 1	3	3x10 <sup>1</sup>	3x10 <sup>1</sup>		3x10 <sup>2</sup>	3x10 <sup>3</sup>
C	Superfícies do corpo.		3x10 <sup>-1</sup>	3x10 <sup>-1</sup>	emissores alfa	outros	3x10 <sup>1</sup>	3x10 <sup>2</sup>
					3x10 <sup>-1</sup>	3		
D	Áreas não restritas; roupas pessoais.		3x10 <sup>-1</sup>	3x10 <sup>-1</sup>	3		3x10 <sup>1</sup>	3x10 <sup>2</sup>

**Observações referentes à tabela 3.3.**

1. Obter os valores médios da contaminação superficial em áreas de, no máximo:
  - . 300 cm<sup>2</sup> de superfície de objetos;
  - . 1.000 cm<sup>2</sup> de pisos, paredes e tetos;
  - . 100 cm<sup>2</sup> de pele; e
  - . 300 cm<sup>2</sup> da mão (aproximadamente o total da mão)
2. Com relação à categoria C (superfície do corpo), valores de contaminação para todos os radionuclídeos são passíveis de aumento de um fator 10 quando a pele é monitorada com uma sonda de área pequena.
3. Para o <sup>231</sup>Pa usar um décimo dos limites dados para a classe I relativas às superfícies das categorias B, C e D, e para o <sup>237</sup>Np, usar um décimo dos limites dados a classe I relativa a superfície da categoria C.
4. Não aplicar os limites dados na Tabela a compostos voláteis e a radionuclídeos sob forma que penetrem facilmente na pele.
5. Sempre que possível, efetuar monitoração direta. Se for empregado o teste de esfregaço, supor a remoção de 10% da contaminação.
6. Para o caso de mistura de radionuclídeos:
  - a) quando a identidade dos radionuclídeos e suas quantidades relativas são conhecidas, considerar os radionuclídeos de baixa toxicidade (classes II e III para emissores alfa e classes IV e V para emissores beta) e efetuar uma média ponderada;
  - b) quando a identidade dos radionuclídeos é desconhecida, usar a classe mais restritiva, isto é, a classe I.

## 4. DESCONTAMINAÇÃO DE ROUPAS

### 4.1. PROCEDIMENTOS GERAIS

As roupas protetoras usadas em áreas sujeitas à contaminação radioativa normalmente são tratadas segundo os procedimentos gerais<sup>(30,26)</sup> apresentados na figura 4.1.

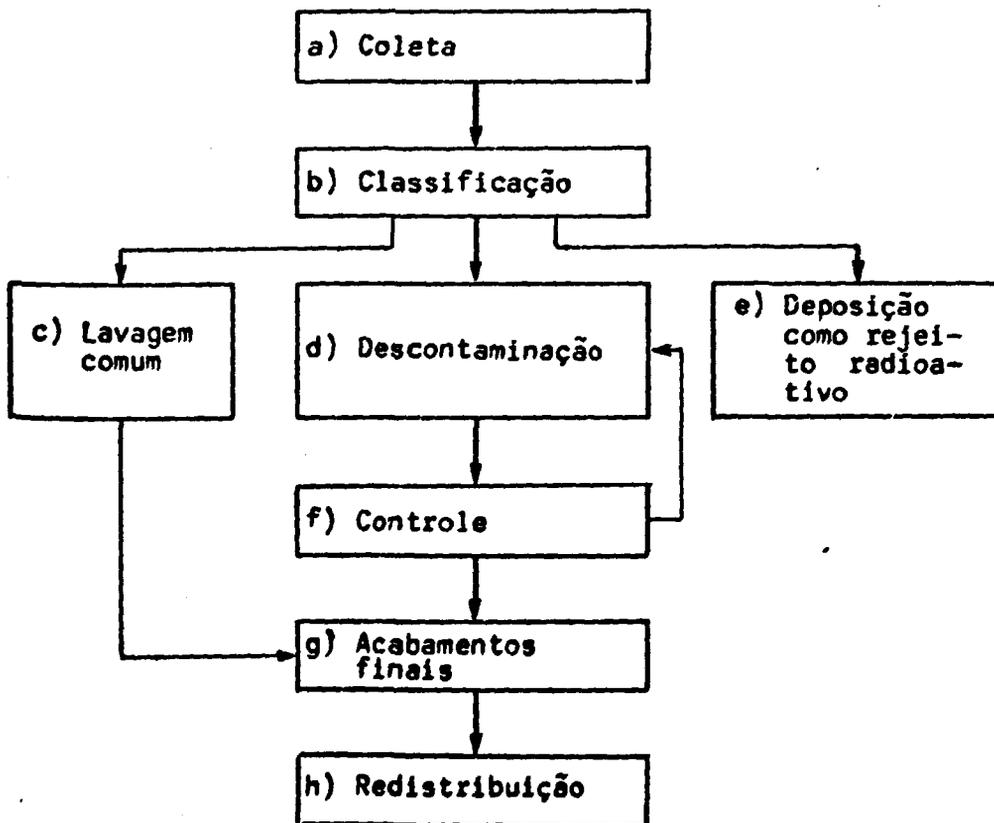


Figura 4.1. Esquema dos procedimentos gerais para o tratamento das roupas usadas nas áreas sujeitas à contaminação radioativa.

As roupas contaminadas são coletadas em sacos plásticos ou em outros recipientes adequados para o transporte. Essas roupas são marcadas de modo que possam ser identificadas quanto ao usuário, ao setor ao qual pertence e às características da possível contaminação. Quando uma roupa estiver excessivamente contaminada, é recolhida isoladamente para que a contaminação não seja transferida para outras. A coleta (a) é feita por pessoas especialmente designadas e treinadas.

No Laboratório de Descontaminação, as roupas recolhidas são submetidas à classificação (b) conforme o tipo de roupa, a origem e a contaminação. Roupas com diferentes tecidos, cores e contaminações devem ser tratadas separadamente. As que não estiverem contaminadas ou que apresentarem níveis abaixo dos limites de rivados são lavadas por processos convencionais (c). As roupas contaminadas e inviáveis de serem descontaminadas são eliminadas como rejeitos radioativos (e). Aquelas contaminadas com radionuclídeos de meia-vida curta podem ser retidas por um tempo para que a atividade seja reduzida a níveis aceitáveis, por decaimento radioativo.

Cada lote de roupas classificadas é descontaminado por um processo adequado (d). Um processo de descontaminação pode envolver uma série de lavagens com soluções distintas e em condições bem estabelecidas. Os processos de descontaminação serão discutidos no item 4.2.

Após a descontaminação (d), as roupas secas devem ser examinadas durante o controle (f), para verificar a existência ou não de alguma contaminação remanescente. As que não forem suficientemente descontaminadas, devem ser submetidas novamente à descontaminação.

As roupas descontaminadas passam pelos acabamentos finais (g), tais como engomagem, eventuais consertos, passagem a ferro ,

embalagem, etc.

A redistribuição (h) das roupas descontaminadas aos respectivos setores é feita dentro de um prazo programado.

Conforme os objetivos deste trabalho, o esquema aqui apresentado considera especialmente as roupas feitas de tecidos. As roupas impermeáveis e os equipamentos como luvas, calçados e máscaras de respiração seguem outros tratamentos que poderão ser objetos de estudos posteriores (item 7.2.).

#### 4.2. PROCESSO

O processo de descontaminação de artigos têxteis consiste em uma seqüência de operações pelas quais se pretende remover os contaminantes radioativos<sup>(29)</sup>.

Fundamentalmente, existem dois métodos distintos para a lavagem de artigos têxteis: o método seco (dry cleaning) e o método aquoso. A principal diferença entre eles está no solvente utilizado. O primeiro método emprega solventes orgânicos tais como tetracloretileno, tricloroetileno e produtos destilados do petróleo<sup>(7)</sup>, enquanto o segundo utiliza a água. Como o método seco envolve um sistema distinto do método aquoso, será considerado como sugestão para estudo posterior (capítulo 7). A descontaminação de roupas pelo método seco foi avaliada por Talboys e Spratt<sup>(43)</sup>.

Neste trabalho, considerar-se-á o processo de descontaminação baseado especialmente no método aquoso cujos procedimentos, reagentes e equipamentos são relativamente simples e conhecidos, pois são similares àqueles utilizados nas lavagens de roupas com sujidades comuns.

Um processo completo de descontaminação envolve as seguintes operações: lavagem, drenagem, enxaguadura, centrifugação e secagem.

A lavagem é propriamente a operação em que as roupas são agitadas ou friccionadas mecanicamente em um meio líquido, por um tempo determinado. Ao final da lavagem, o meio líquido é separado das roupas pela drenagem. A lavagem pode ser realizada em diferentes temperaturas e com soluções de reagentes de descontaminação em determinadas concentrações.

A enxaguadura é uma operação semelhante à lavagem. Porém, sua finalidade é remover as sujidades, os reagentes que permanecem nas roupas após a drenagem. Na enxaguadura, utiliza-se água limpa ou soluções bem diluídas de determinados produtos.

Um processo de descontaminação de roupas geralmente envolve várias operações de lavagem e de enxaguadura. Um ciclo de descontaminação de roupas, apresentado por McAlduff em 1950<sup>(26)</sup>, consistia de onze operações, cada uma com duração de 4 a 8 minutos. O processo avaliado por Hughes e seus colaboradores<sup>(13)</sup>, referido como a Fórmula 77A, envolvia oito etapas ou operações, conforme apresentado na tabela 4.1.

TABELA 4.1. Processo de descontaminação de roupas - Fórmula 77A<sup>(13)</sup>

ETAPA	OPERAÇÃO	TEMPERATURA		TEMPO (minutos)	REAGENTE
		°F	°C		
1	Ensaboadura	90-100	32-38	5	detergente
2	Lavagem ácida	140	60	5	ácido cítrico
3	Lavagem ácida	140	60	5	ácido cítrico
4	Lavagem por complexação	140	60	5	EDTA <sup>a</sup>
5	Lavagem por complexação	140	60	5	EDTA <sup>a</sup>
6	Enxaguadura	140	60	3	--
7	Enxaguadura	120	49	3	--
8	Acidulação	ambiente		5	M <sup>b</sup>

<sup>a</sup> sal tetrassódico

<sup>b</sup> mistura de partes iguais de fluorossilicato de sódio e fluorreto ácido de sódio

Após a lavagem e a enxaguadura, a água contida nas roupas molhadas é retirada por centrifugação e, então, as roupas úmidas são submetidas à secagem.

#### 4.3. VARIÁVEIS DO PROCESSO

Um processo de descontaminação de roupas apresenta as seguintes variáveis (1,13,36,43):

##### a) Composição da solução descontaminadora.

Uma solução utilizada na lavagem de roupas contaminadas pode ser composta por uma ou mais substâncias dissolvidas em água. Entre essas substâncias incluem-se os agentes tensoativos (item 4.5.1) e os agentes complexantes (item 4.5.2). A definição do tipo e da concentração dos reagentes depende de considerações econômicas e experimentais. Em termos gerais, a concentração do reagente de descontaminação está ao redor de 1% ou menos. A concentração de detergentes na solução de lavagem varia ao redor de 5 a 10 g.dm<sup>-3</sup> e a dos agentes complexantes ao redor de 2 a 5 g.dm<sup>-3</sup>. Esses dados podem variar, sendo que em alguns casos são recomendadas soluções de ácido cítrico a 3% (30).

##### b) Temperatura da solução descontaminadora.

A elevação da temperatura parece incrementar o poder detergente e descontaminante, porém isso aumenta o custo do processo e pode prejudicar os tecidos sensíveis ao aquecimento. Alguns processos envolvem várias lavagens e enxaguaduras a diferentes temperaturas. As recomendações gerais são que os artigos de tecido mais tênues sejam tratados entre 40 a 60°C e os mais resistentes entre 80 a 100°C (36).

c) Tempo de lavagem.

O efeito descontaminante de uma lavagem tende a atingir um máximo com o tempo. Tratamentos muito prolongados podem ser antiprodutivos e aumentar o desgaste das roupas. Cada operação de lavagem pode ser realizada em 5 a 15 minutos; o tempo total dependerá do número de operações envolvidas no processo.

d) Intensidade de agitação.

A intensidade da agitação promovida durante a lavagem, geralmente é uma característica do projeto da máquina lavadora. Está relacionada à velocidade de rotação, da reversão do sentido de rotação, etc. A agitação muito intensa pode prejudicar a qualidade dos tecidos.

e) Relação entre carga de roupa e o volume da solução.

As lavagens práticas podem ter a relação compreendida entre 1:1 a 1:6 (kg de roupa para litro de água).

f) Seqüência de operações.

O processo de descontaminação de roupas envolve uma série de lavagens e enxaguaduras estabelecidas numa certa ordem. A seqüência dessas operações pode influir na eficiência de descontaminação. A centrifugação e a secagem fazem parte das operações finais.

#### 4.4. PROJETO DA INSTALAÇÃO<sup>(24,35)</sup>

O processo de descontaminação de roupas pode ser executado fundamentalmente por um conjunto de três máquinas: a lavadora, a centrifugadora (ou extratora) e a secadora.

São disponíveis no mercado, máquinas com diversas capacidades e modelos. Algumas máquinas lavadoras são capazes de executar as operações de lavagem e de centrifugação. Há também máquinas lavadoras que podem ser instaladas junto a uma parede (ou ba

reira) que separa dois ambientes, tal que as roupas contaminadas são colocadas na máquina de um lado e retiradas do outro lado, a pós a lavagem.

As máquinas devem estar convenientemente dispostas a fim de facilitar as operações, as transferências de roupas e, ainda, para evitar a contaminação cruzada.

A figura 4.2. apresenta um esquema da disposição das máquinas e a parede que isola a área sujeita à contaminação das áreas destinadas a diversas finalidades.

Observações referentes à figura 4.2.

A1 - Área de classificação de roupas contaminadas - sujeita à contaminação.

B - Barreira ou parede cuja finalidade é evitar o espalhamento da contaminação da área A1 aos outros setores.

A2 - Área úmida - onde se localizam as máquinas de lavar M1, M2 e M3 e as centrifugadoras C1, C2 e C3. As operações nessa área envolvem roupas molhadas. As roupas com diferentes tipos de contaminação são tratadas em máquinas diferentes.

A3 - Área de secagem - onde se localizam as secadoras S1, S2 e S3.

A4 - Área de monitoração - as roupas são monitoradas para verificar se estão livres de contaminação, ou se devem retornar para nova descontaminação.

A5 - Área de acabamentos finais - reservada para passagem a ferro, engomagem, prensagem, etc.

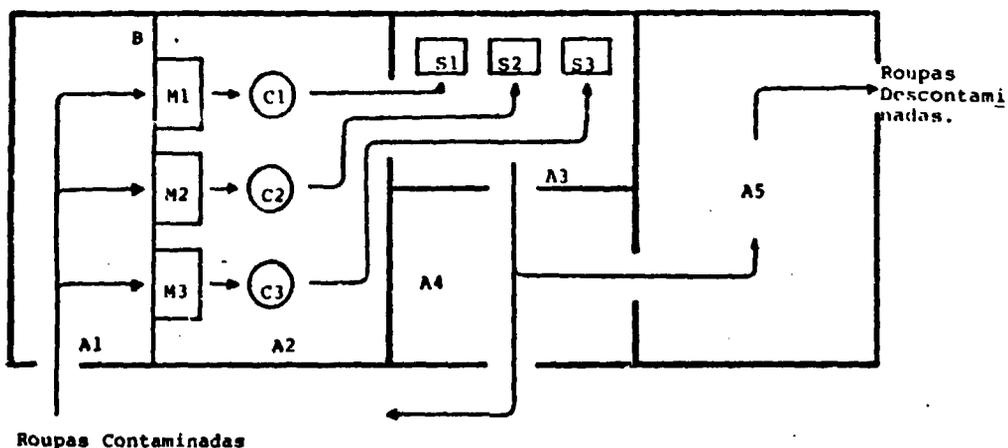


Figura 4.2. Esquema de uma lavanderia para a descontaminação de roupas.

#### 4.5. REAGENTES DE DESCONTAMINAÇÃO

##### 4.5.1. Agentes tensoativos<sup>(37,38,40)</sup>

Os agentes tensoativos são substâncias cujas moléculas são constituídas por uma parte hidrófila, solúvel em água e outra lipófila, solúvel em óleos e gorduras. Quando adicionados à água, modificam sensivelmente as propriedades superficiais ou interfaciais da mesma. São classificados conforme a parte hidrófila de suas moléculas em: aniônicos, catiônicos, não-iônicos e anfotéricos (ou anfotéricos).

A tabela 4.2. mostra os principais grupos hidrófilos dos agentes tensoativos.

A parte lipófila da molécula tensoativa, geralmente é uma cadeia hidrocarbônica do tipo alquil ou alquilaril, com cerca de 8 a 18 átomos de carbono.

Os agentes tensoativos possuem um largo campo de aplicação que se deve às suas propriedades deterativas, espumantes, umectantes, emulsionantes, solubilizantes e dispersantes.

TABELA 4.2. As classes e os principais grupos hidrófilos dos agentes tensoativos.

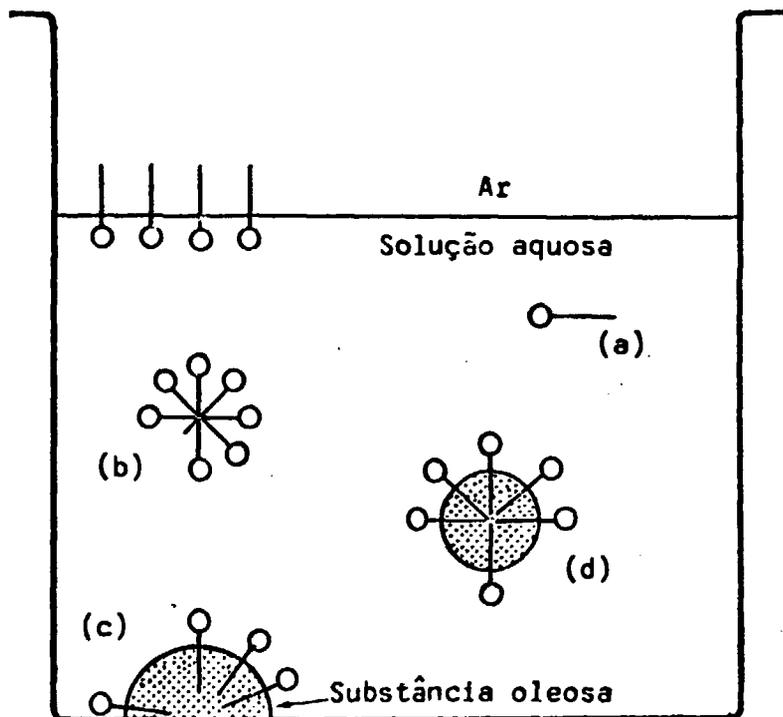
Classe	Principais grupos hidrófilos
Aniônica	carboxilato $-\text{COO}^-$ sulfato $-\text{OSO}_3^-$ sulfonato $-\text{SO}_3^-$ fosfato $-\text{OPO}_3^-$
Catiônica	amina $-\text{NH}_2$ $-\overset{ }{\text{N}}\text{H}$ $-\overset{ }{\text{N}}-$ (primária, secundária e terciária, respectivamente)  amônio quaternário $-\overset{ }{\text{N}}^{\pm}$
Não-iônica	polioxietileno $(-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ hidroxila $-\text{OH}$ éster $-\text{COO}^-$
Anfotérica	grupo aniônico e catiônico na mesma molécula

As propriedades das substâncias tensoativas que contribuem para a descontaminação de roupas, compreendem a capacidade de promover o umedecimento da superfície contaminada, solubilizar as substâncias normalmente insolúveis em água, suspender e dispersar os materiais particulados.

Essas propriedades estão relacionadas com a adsorção e orientação dos íons ou moléculas tensoativas nas interfaces, com a conseqüente diminuição da tensão interfacial e com a formação de micelas (figura 4.3.).

Os agentes tensoativos mais importantes para a descontaminação de tecidos são os da classe aniônica e não-iônica. Os primeiros por causa do baixo custo e os últimos pela versatilidade

com que podem ser obtidos industrialmente.



- (a) íon ou molécula isolada do agente tensoativo: o parte hidrófila; — parte lipófila.
- (b) formação de micelas.
- (c) adsorção e orientação das moléculas na inter<sub>face</sub> óleo/solução aquosa.
- (d) solubilização de uma partícula oleosa.

Figura 4.3. Ilustração da ação dos agentes tensoativos em solução.

Entre os tensoativos aniônicos, estão os sais de ácidos graxos (sabões), os ésteres do ácido sulfúrico, os alquilsulfonatos e os alquilarilsulfonatos. O dodecilbenzenosulfonato de sódio é comumente utilizado na composição de detergentes domésticos.

Os agentes tensoativos não-iônicos não produzem íons em solução. Sua solubilidade em água se deve aos grupos hidrofílicos como éter, hidroxila e éster. Muitos agentes tensoativos desta classe são obtidos por etoxilação de substâncias orgânicas. Os derivados polioxi-etilênicos são produzidos a custo razoável e com

certa versatilidade em suas propriedades que dependem da cadeia polioxietilênica. Os detergentes não-iônicos apresentam boas qualidades deterativas, com baixo poder espumante.

Os principais tipos de agentes tensoativos catiônicos utilizados na limpeza de tecidos são os compostos quaternários de amônio e aminas de cadeias longas. Apresentam um custo relativamente alto e geralmente são usados em detergentes com fins específicos, como amaciantes de roupas e germicidas. Não devem ser associados aos detergentes aniônicos, porque formam compostos graxos insolúveis com eles.

Certas substâncias tensoativas são anfotéricas, isto é, comportam-se como agente aniônico em meio básico e catiônico em meio ácido. Estas são menos comuns na detergência e na descontaminação.

#### 4.5.2. Agentes complexantes (6,25)

O termo "agente complexante" refere-se a qualquer substância capaz de formar compostos de coordenação ou complexos com íons metálicos. Entre essas substâncias, compreendem-se os agentes quelantes e os agentes seqüestrantes.

O agente quelante é uma molécula ou um íon que se liga por coordenação a um íon metálico central por meio de dois ou mais grupos doadores de elétrons. A palavra quelante denota sua capacidade de formar uma estrutura anelada com o íon metálico.

O agente é dito seqüestrante quando produz complexos solúveis e suficientemente estáveis no solvente considerado. Portanto, a utilidade destes agentes em descontaminação pode ser explicada pelo seu poder de solubilizar e de manter em solução os contaminantes catiônicos, principalmente os de metais pesados de transição. Além de solubilizar os contaminantes metálicos, os agentes seqüestrantes têm a capacidade de reduzir a dureza da água.

gua, pela complexação dos íons  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  e outros íons característicos, que poderiam interferir em processos de descontaminação.

Os agentes sequestrantes comercialmente importantes são os polifosfatos, os ácidos hidroxicarboxílicos e os ácidos aminopolicarboxílicos. A tabela 4.3. apresenta os exemplos mais comuns das referidas substâncias.

TABELA 4.3. Exemplos de agentes sequestrantes comuns.

Tipo	Exemplos
Polifosfato	pirofosfato tetrassódico tripolifosfato de sódio trimetafosfato de sódio polifosfatos vítreos
Ácido hidroxicarboxílico	ácido cítrico ácido tartárico ácido glucônico
Ácido aminopolicarboxílico	ácido nitriloacético (NTA) ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) ácido dietilenotriaminopentacético (DTPA)

Os polifosfatos são produtos da desidratação e condensação de fosfatos. Entre eles incluem-se os pirofosfatos, os tripolifosfatos, os metafosfatos e os polifosfatos vítreos. Possuem a capacidade de complexar íons metálicos, inclusive os íons de  $Ca^{++}$  e  $Mg^{++}$  característicos de águas duras. Exercem também ação peptizante e dispersante sobre os sólidos normalmente insolúveis em soluções aquosas, evitando a redeposição de partículas coloidais suspensas durante as lavagens de tecidos.

Os polifosfatos apresentam tendência para hidrólise em soluções aquosas, revertendo-se a ortofosfatos. A reversão é acele

rada pela presença de álcalis e íons  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Mg}^{++}$  e pelo aumento da temperatura. Isto acarreta a perda da habilidade sequestrante e a formação de ânions  $\text{PO}_4^{3-}$  com tendência para precipitar íons de metais.

Considerando-se a capacidade de limpeza e o menor custo em relação a outros agentes complexantes, os polifosfatos, principalmente o tripolifosfato de sódio, são indicados como aditivos dos detergentes utilizados na lavagem de tecidos.

Entre os ácidos hidroxicarboxílicos mais importantes como agentes sequestrantes, citam-se os ácidos cítrico, glucônico e tartárico. A capacidade quelante dos ácidos hidroxicarboxílicos é mais acentuada em regiões mais elevadas de pH, e diminui na ordem cítrico > tartárico > glucônico.

Os ácidos aminopolicarboxílicos formam quelatos extremamente estáveis em solução aquosa, com íons de metais pesados e de transição, inclusive com íons alcalino-terrosos. Geralmente são agentes sequestrantes mais eficientes que os polifosfatos e os hidroxicarboxílicos por formarem complexos mais estáveis, inclusive em temperaturas elevadas. O ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) e seus sais são exemplos de agentes complexantes desta classe utilizados em descontaminação. A principal limitação no emprego de agentes complexantes aminocarboxílicos, no presente, é o preço relativamente mais elevado.

#### 4.5.3. Sabões e detergentes<sup>(38)</sup>

Os produtos mais comuns usados na higienização de roupas são os sabões e os detergentes, disponíveis comercialmente.

Os sabões são bastante conhecidos e empregados como produto detergente desde muitos séculos atrás. Consistem essencialmente de sais de sódio ou de potássio, derivados de ácidos graxos pro

venientes das substâncias gordurosas de origem vegetal ou animal. Atuam como agentes tensoativos aniônicos.

Os sabões apresentam algumas inconveniências durante a lavagem, pois não funcionam bem em soluções ácidas, nem em águas que contenham íons de cálcio e de magnésio em concentrações elevadas. Por esses motivos, durante a sua produção, freqüentemente são complementados com substâncias que mantenham a alcalinidade, abrandem a dureza da água e aumentem sua ação detergente.

Atualmente, muitos detergentes são produzidos sinteticamente, com qualidades que sobrepujam as dos sabões. Os detergentes sintéticos utilizados em limpezas domésticas são misturas de agentes tensoativos sintéticos, aditivos e materiais de enchimento.

Os ingredientes dos sabões e dos detergentes, tais como os agentes tensoativos e complexantes, podem auxiliar a remoção dos contaminantes. Os produtos, como a carboximetilcelulose, que evitam a redeposição de contaminantes particulados, são especialmente importantes na descontaminação de produtos têxteis. Por outro lado, os alvejantes, os corantes, os perfumes e os materiais de enchimento praticamente não exercem qualquer efeito descontaminante. Os compostos alcalinos como silicato, carbonato e hidróxido de sódio têm a principal função de manter o pH da solução em valores elevados; podem dificultar a remoção de metais pesados que formam compostos insolúveis nesses valores de pH.

As vantagens da aplicação de sabões e de detergentes comerciais na descontaminação de roupas são a facilidade de serem adquiridos a custo relativamente baixo e a simplicidade de utilização. No entanto, deve-se considerar que os produtos citados são destinados para remover as sujidades comuns e para proporcionar aspectos de limpeza que nem sempre satisfazem aos critérios de descontaminação.

#### 4.5.4. Formulações especiais

Embora os agentes complexantes e os tensoativos possam ser empregados independentemente, muitas vezes, a associação des sas substâncias com outras em proporções adequadas melhoram os e feitos desejados na descontaminação de roupas.

É desejável que um reagente de descontaminação de roupas apresente boa eficiência de descontaminação, não danifique as rou pas, não seja corrosivo às máquinas ou às instalações do laboratóri o, não seja tóxico, seja de fácil obtenção e aplicação, apresen te baixo custo e não produza rejeitos de difícil degradação ou de difícil tratamento posterior.

Arris e Thomas<sup>(2)</sup> apresentaram alguns princípios envolvi dos para a formulação de reagentes de descontaminação. A composi ção dos reagentes sugeridos assemelha-se a de um detergente para higienização doméstica, sem branqueadores nem espumantes, mas com incremento de agentes complexantes. Esse tipo de reagente consis te numa mistura de agentes complexantes, agentes tensoativos e quantidades suficientes de íons sódio e de hidrogênio. Sendo rea gentes de ação moderada, são recomendados para a descontaminação de roupas.

#### 4.6. MECANISMOS DE REMOÇÃO DOS CONTAMINANTES<sup>(3,36,41)</sup>

O sistema de descontaminação de roupas em meio aquoso en volve os seguintes elementos mais importantes:

- a) a roupa (ou o tecido) que se quer descontaminar,
- b) os contaminantes radioativos,
- c) a solução descontaminante e
- d) a energia térmica e mecânica fornecida ao sistema.

A remoção do contaminante do tecido é o resultado das in

terações entre esses elementos do sistema.

Os tecidos das roupas, devido à sua constituição fibrosa, possuem uma superfície real muito extensa. Apresentam orifícios e interstícios cujas dimensões e formas dependem da maneira com que as fibras foram fiadas e tecidas. Ao nível molecular, as fibras podem apresentar sítios superficiais quimicamente ativos, onde os contaminantes podem se fixar.

Por exemplo, os contaminantes catiônicos, principalmente de metais polivalentes, podem ser fixados por adsorção ou troca iônica, pelos grupos superficiais das fibras têxteis que possuem caráter ácido e tendência à ionização, assim como a hidroxila e a carboxila. Podem também ser fixados por coordenação pelos grupos doadores de pares de elétrons.

A celulose que constitui a maioria das fibras de origem vegetal, pode atuar como trocador de cátion. A capacidade de troca iônica do algodão puro está em torno de 10 microequivalente por grama<sup>(41)</sup>.

Os ânions sofrem repulsão pelos grupos com carga elétrica de mesmo sinal, mas podem ser fixados pelos grupos, como o amino, que apresentam carga positiva.

Os contaminantes coloidais e particulados podem ficar retidos mecanicamente nos poros dos tecidos ou interstícios das fibras, e podem ser atraídos eletrostaticamente quando apresentarem cargas superficiais.

Uma boa solução descontaminante deve ser capaz de molhar completamente o tecido, permitindo que os reagentes entrem em contato com as superfícies. Essa propriedade de molhar as superfícies do tecido é incrementada pelo acréscimo de um agente tensoativo à solução (item 4.5.1.).

Idealmente, para o pleno êxito da descontaminação, todo o

contaminante inicialmente fixo no tecido, deve passar para a solução.

As ligações ou as forças que mantêm o contaminante fixo ao tecido devem ser rompidas e o contaminante deve permanecer na solução até que esta seja separada do tecido.

Citam-se os seguintes mecanismos que podem contribuir para a remoção dos contaminantes:

a) Dissolução

A água dissolve os contaminantes solúveis. Ela é um solvente polar e, portanto, dissolve os contaminantes iônicos solúveis (cátions e ânions) e moléculas polares hidrofílicas.

b) Desorção

É o fenômeno inverso à adsorção. Dependendo das condições do meio (pH, temperatura), os contaminantes presos principalmente por forças fracas de Van der Waals podem se desprender da superfície do tecido.

c) Troca iônica

Quando existir uma quantidade suficiente de íons não-radioativos, estes podem substituir aqueles radioativos presos aos sítios de troca iônica das fibras têxteis.

d) Seqüestração

As substâncias seqüestrantes (item 4.5.2.) formam complexos solúveis e estáveis em solução com cátions metálicos radioativos.

e) Solubilização

As substâncias de natureza gordurosa ou oleosa, normalmente insolúveis em água, podem ser solubilizadas por agentes tensoativos (item 4.5.1.).

f) Remoção mecânica

Contaminantes particulados oclusos nos interstícios dos tecidos podem ser removidos pela fricção do tecido e agitação da solução.

g) Suspensão e dispersão

Contaminantes particulados ou coloidais podem ser sus pensos e dispersos na solução com o auxílio de agentes tensoativos, polifosfatos (item 4.5.2.), e agitação me cânica da solução.

A energia térmica e mecânica fornecida ao sistema, de um modo geral, deve favorecer a descontaminação, ou seja, quando a solubilidade dos contaminantes aumentar com a elevação da temperatura e quando a agitação contribuir para a remoção e dispersão dos contaminantes no meio líquido.

#### 4.7. MÉTODOS PARA AVALIAR A DESCONTAMINAÇÃO

A eficiência de um processo de descontaminação pode ser a aliada pela quantidade de material radioativo indesejável que es se processo é capaz de remover da superfície ou do meio consid era do.

A quantidade de um material radioativo pode ser expressa em massa ou em atividade, portanto a avaliação poderá ser realiza da por métodos analíticos que permitam a determinação dessas gran ezas dos contaminantes radioativos removidos pelo processo.

A eficiência de um processo de descontaminação de roupas em meio aquoso depende de muitas variáveis como, as característi cas do contaminante, da roupa contaminada, do meio e das condi ções em que se procede a descontaminação. Estabelecendo-se um con trole adequado dessas variáveis, pode-se avaliar a eficiência dos reagentes utilizados no processo<sup>(33,39)</sup>. Isto pode ser realizado

em laboratório, contaminando-se amostras de tecido de interesse e descontaminando-as com diferentes reagentes em condições preestabelecidas.

Se a atividade da contaminação inicialmente presente na amostra for  $A_i$  e a atividade remanescente após a descontaminação (ou numa etapa de descontaminação) for  $A_f$ , definem-se os seguintes termos:

a) fator de descontaminação<sup>(4,44)</sup>:

$$FD = A_i \cdot A_f^{-1} \quad ;$$

b) índice de descontaminação<sup>(27,44)</sup>:

$$ID = \log (A_i \cdot A_f^{-1}) \quad ;$$

c) percentagem de descontaminação<sup>(32)</sup>:

$$PD = (1 - A_f \cdot A_i^{-1}) 100 \quad e$$

d) percentagem da atividade remanescente:

$$AR = A_f \cdot A_i^{-1} \cdot 100 \quad .$$

Os termos anteriormente definidos estão relacionados entre si. A tabela 4.4. apresenta alguns valores de FD, ID, PD e AR equivalentes, representados com até quatro algarismos significativos.

TABELA 4.4. Valores de FD, ID, PD e AR equivalentes, re-  
presentados com até quatro algarismos signifi-  
cativos.

FD	ID	PD %	AR %
1,00	0	0	100,0
1,25	0,097	20,00	80,00
2,00	0,301	50,00	50,00
4,00	0,602	75,00	25,00
10,00	1,000	90,00	10,00
25,00	1,398	96,00	4,00
50,00	1,699	98,00	2,00
100,0	2,000	99,00	1,00
+ ∞	+ ∞	100,0	0

Nishiwaki & Nishioka<sup>(32)</sup> determinaram três frações de uma contaminação, considerando outros critérios. Se  $A_1$  for a atividade do radionuclídeo inicialmente presente na amostra,  $A_2$  a atividade após a descontaminação com água e  $A_3$  a atividade após a descontaminação com um reagente, definem-se:

e) percentagem da contaminação livre:

$$CL = (A_1 - A_2) A_1^{-1} \cdot 100 \quad ;$$

f) percentagem da contaminação solta:

$$CS = (A_2 - A_3) A_1^{-1} \cdot 100 \quad e$$

g) percentagem da contaminação fixa:

$$CF = A_3 \cdot A_1^{-1} \cdot 100$$

Carlson & Neuman<sup>(5)</sup> avaliaram a remoção dos compostos de urânio das roupas, por meio do índice de eficiência de lavagem, IEL, que relaciona a eficiência de descontaminação da solução do reagente considerado com a eficiência de descontaminação da água.

Define-se assim,

h) Índice de eficiência de lavagem:

$$IEL = 10 \cdot (a - b) \cdot (100 - b)^{-1},$$

onde a é a percentagem da contaminação removida pelo reagente em solução aquosa e b é a percentagem da contaminação removida somente pela água. O valor máximo de IEL é 10; isto representa um caso ideal em que o reagente removeu toda a contaminação da amostra. O valor zero indica que o reagente não removeu nenhuma parte da contaminação além daquela que foi removida simplesmente pela água. Um valor negativo de IEL indica que o reagente removeu menos contaminação que a água, isto é, significa que o reagente aumentou a fixação dos radionuclídeos na amostra.

Os termos definidos anteriormente em (a) a (g) foram estabelecidos em função das atividades. Geralmente, a contaminação radioativa é avaliada pela contagem das radiações emitidas pelos radionuclídeos contaminantes, por meio de um detector conectado a um sistema eletrônico de medidas.

Por definição, a atividade  $A$ , de uma quantidade de um nuclídeo radioativo em um estado particular de energia, em um dado instante, é o quociente de  $dN$  por  $dt$ , onde  $dN$  é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia no intervalo de tempo  $dt$ <sup>(21)</sup>. Isto é:

$$A = \frac{dN}{dt} .$$

A taxa de contagem líquida  $\dot{x}_l$  (que é a taxa de contagem bruta da amostra menos a taxa de contagem da radiação de fundo) obtida experimentalmente deverá ser corrigida para a atividade, tal que:

$$A = \frac{1}{\epsilon} \dot{x}_l$$

O fator de correção,  $\epsilon$ , cujas unidades são contagens por

segundo/desintegração por segundo ou cps.Bq<sup>-1</sup>, é o produto de vários fatores que visam a correção da taxa de contagem para a geometria de contagem, a eficiência intrínseca do detector, o tempo de resolução do sistema de contagem, a absorção das radiações emitidas na própria amostra, no ar e na janela do detector e para o espalhamento das radiações na amostra e nos outros materiais do sistema de detecção<sup>(34)</sup>.

Os termos definidos para avaliar a descontaminação são determinados pela razão das atividades e poderão ser relacionados à razão das taxas de contagem pelos fatores de correção, tal que:

$$\frac{A_i}{A_f} = \frac{E_f}{E_i} \cdot \frac{\dot{X}_i}{\dot{X}_f}$$

onde,  $A_i$ ,  $E_i$  e  $\dot{X}_i$  são respectivamente, a atividade, o fator de correção e taxa de contagem da amostra antes da descontaminação;  $A_f$ ,  $E_f$  e  $\dot{X}_f$  são os respectivos valores após a descontaminação da amostra.

A avaliação pode ser realizada também em relação à massa do contaminante removido ou remanescente na amostra. O método é particularmente importante quando o radionuclídeo tem baixa atividade específica.

A atividade e massa de um radionuclídeo podem ser relacionadas pela equação seguinte:

$$m = \frac{T_{1/2} \cdot M}{\ln 2 \cdot N_A} \cdot A$$

onde:

$m$  é a massa do radionuclídeo considerado (g),

$T_{1/2}$  é a meia-vida (s),

M é a massa do mol do radionuclídeo (g),  
N<sub>A</sub> é o número de Avogadro ( $\sim 6,023 \times 10^{23}$ ),  
ln 2 vale aproximadamente 0,693, e  
A é a atividade do radionuclídeo (s<sup>-1</sup> ou Bq).

Portanto, para um determinado radionuclídeo contaminante, a relação entre a atividade inicial, A<sub>i</sub>, e a final, A<sub>f</sub>, equivale à relação da massa do contaminante inicialmente presente na amostra, m<sub>i</sub>, e aquela remanescente após a descontaminação, m<sub>f</sub>, isto é,

$$\frac{A_i}{A_f} = \frac{m_i}{m_f} .$$

## 5. PARTE EXPERIMENTAL

### 5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O principal objetivo desta parte é avaliar empiricamente a eficiência dos reagentes na descontaminação de tecidos de algodão em meio aquoso.

O método de avaliação foi desenvolvido considerando as condições práticas existentes no IPEN. A fim de simular as contaminações causadas pelos respingos de soluções radioativas em roupas, utilizou-se soluções de nitrato de urânio como contaminante e amostras de tecido de algodão como material representativo das roupas protetoras usadas em condições normais de trabalho.

Antes de testar os reagentes, foram realizados alguns ensaios de contaminação das amostras de tecido.

A técnica de medida adotada para avaliar a contaminação e a descontaminação foi a contagem das radiações provenientes das amostras de tecido. Os dados das contagens foram tratados conforme as indicações do item 5.3.2.

Os experimentos de descontaminação foram realizados imergindo as amostras de tecido em 400 cm<sup>3</sup> de solução, em béqueres de 600 cm<sup>3</sup> de capacidade, à temperatura ambiente. Foram testadas as

eficiências de descontaminação da água, das soluções de substâncias previamente selecionadas e dos produtos de limpeza comercialmente disponíveis.

Os procedimentos gerais para avaliar a eficiência dos reagentes de descontaminação foram esquematizados e apresentados na figura 5.1.

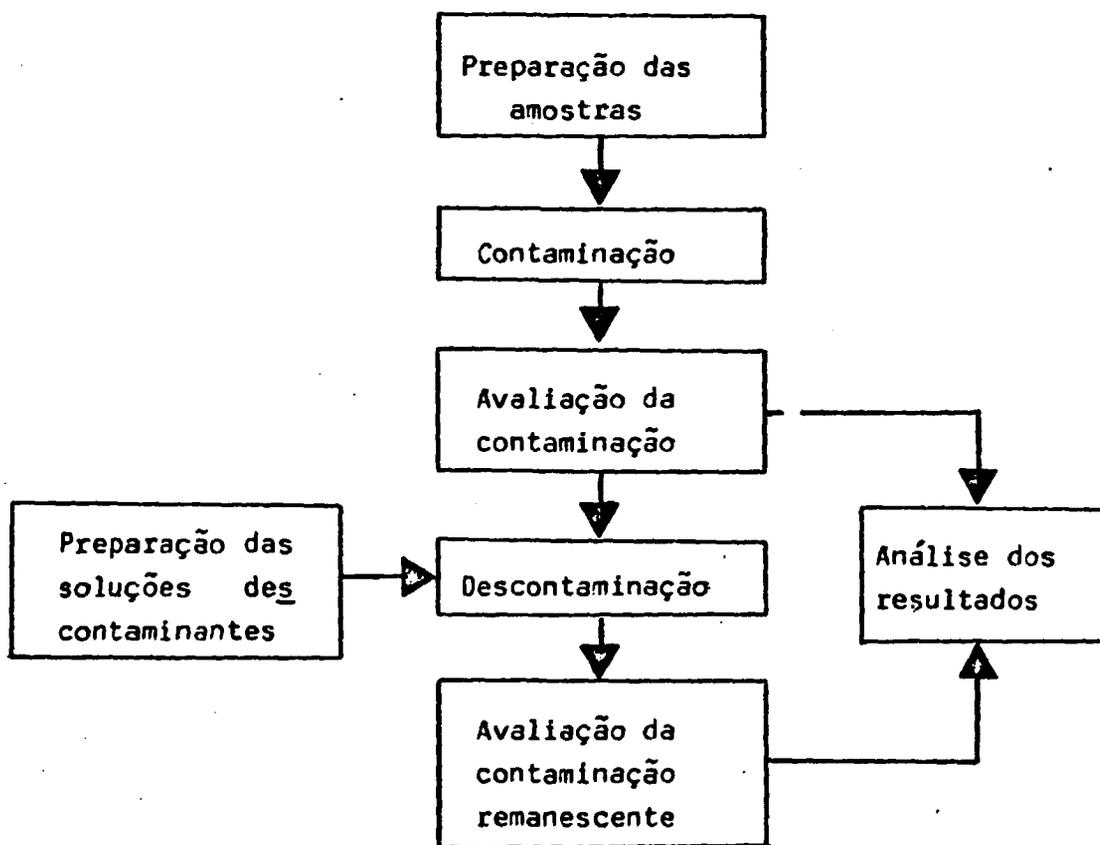


Figura 5.1. Esquema geral dos procedimentos adotados para avaliar a eficiência dos reagentes de descontaminação.

## 5.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

### 5.2.1. Contaminante, tecido e materiais de vidro

Foram utilizadas duas soluções de nitrato de urânio com  $334 \text{ g.dm}^{-3}$  e  $330 \text{ g.dm}^{-3}$  de urânio como contaminante radioativo.

As amostras contaminadas consistiram de retalhos de tecido branco de algodão, conhecido vulgarmente como brim. As amostras foram obtidas de tecidos novos e de guarda-pós usados.

Os materiais de vidro essenciais ao método foram micropi-  
petas de vidro com capacidades de 25, 50 e 100 mm<sup>3</sup> utilizadas na  
contaminação de amostras e béqueres de 600 cm<sup>3</sup> onde foram feitas  
as descontaminações das amostras. Outros materiais auxiliares fo-  
ram utilizados para diluições e preparo de soluções.

### 5.2.2. Reagentes químicos

Os reagentes testados foram codificados para facilitar a  
sua referência e estão apresentados na tabela 5.1.

TABELA 5.1. Reagentes cujas eficiências foram testadas para a des-  
contaminação de tecido de algodão.

CÓDIGO	NOME	FÓRMULA	MASSA MOLECULAR
ACIT	ácido cítrico	$C_6H_8O_7 \cdot H_2O$	210,15
ACOX	ácido oxálico	$(COOH)_2 \cdot 2H_2O$	126,07
BICS	bicarbonato de sódio	$NaHCO_3$	84,00
CARS	carbonato de sódio	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$	124,00
CITA	citrato (ácido) de amônio	$C_6H_{14}N_2O_7$	226,19
CITS	citrato de sódio	$Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$	294,11
DIET	dietanolamina	$(HOC_2H_4)_2NH$	105,14
EDTA	sal dissódico do áci- do etilenodiaminote- tracético.	$Na_2C_{10}H_{14}N_2O_8 \cdot 2H_2O$	372,24
HEXA	hexametafosfato de sódio	$(NaPO_3)_n$	101,96
HIDS	hidróxido de sódio	$NaOH$	40,00
LAUS	laurilsulfato de sódio	$NaC_{12}H_{25}SO_4$	288,38
PC01	produto comercial 1	-	-
PC02	produto comercial 2	-	-
PC03	produto comercial 3	-	-
PC04	produto comercial 4	-	-
TARS	tartarato (ácido) de sódio	$NaC_4H_5O_6$	190,09

### 5.2.3. Equipamentos

Os equipamentos utilizados neste trabalho foram:

- Agitadores mecânicos, marca FISATOM, modelos 712 e 713.
- Balança analítica, marca STANTON, modelo F4P.
- Balança tipo tríplex escala, marca MARTE, modelo 1000.
- Blindagem de chumbo, detalhes no texto (item 5.3.2.).
- Cronômetro, marca JAQUET, fabricação suíça.
- Detector Geiger-Müller com janela de mica, marca DCA, modelo 6113, voltagem de operação recomendada 500V, comprimento 5,2 cm, diâmetro externo 2,6 cm, diâmetro da janela 2,0 cm, inclinação do patamar 5%/100V, tempo morto mínimo 160  $\mu$ s, fabricação americana.
- Estufa para esterilização e secagem; marca FANEM, modelo 315-SE, tamanho 2.
- Sistema de contagem de impulsos, produzido no IPEN, modelo CPIO AIE PI-33A, detalhes no texto (item 5.3.2.).

## 5.3. PROCEDIMENTOS E ENSAIOS.

### 5.3.1. Preparação das amostras de tecido.

O tecido branco de algodão previamente lavado e seco foi recortado em retalhos retangulares com 6 cm de largura e 8 cm de comprimento. Cada retalho foi marcado com um código de letras e números no canto inferior direito, para que pudesse ser corretamente identificado e posicionado.

### 5.3.2. Contagens e tratamento dos dados.

A contaminação e a descontaminação das amostras de tecido foram avaliadas por meio das contagens das radiações emitidas pe

los radionuclídeos presentes nas amostras. Utilizou-se um detector Geiger-Müller, com janela de mica com 1,5 a 2,0 mg cm<sup>-2</sup> de densidade superficial, conectado a um sistema de contagem de impulsos fabricado no IPEN, modelo CPIO AIE PI-33A. O sistema possui um mostrador digital do número de contagens registradas, um seletor do tempo de contagem e um ajustador da tensão de operação.

O detector foi montado sobre uma estrutura de lucite com 8,0 cm x 8,0 cm de base e 11,3 cm de altura. Essa estrutura permite a colocação de uma placa de lucite de 7,0 cm de largura e 8,0 cm de comprimento em 6 posições a distâncias diferentes do detector. Tanto a estrutura como o detector são colocados dentro de uma blindagem cilíndrica de chumbo com 3,0 cm de espessura de parede lateral e inferior, e 7,5 cm de parede superior.

A amostra de tecido a ser contada, foi fixada sobre a placa de lucite com uma fita adesiva e posicionada na estrutura, tal que a mancha da contaminação ficou localizada aproximadamente a 0,8 cm de distância da janela de mica do detector.

Cada medida foi feita durante um tempo variável de 60 a 200 segundos e o resultado foi normalizado para contagens por minuto (cpm), descontando a radiação do ambiente.

Para avaliar a eficiência de descontaminação de um reagente foi feita uma medida da amostra contaminada antes da descontaminação, e uma outra após a descontaminação, mantendo o mesmo posicionamento da amostra em relação ao detector, nas duas medidas.

Os resultados das medidas realizadas foram submetidos a um tratamento estatístico, conforme as considerações seguintes<sup>(34)</sup>.

Para  $n$  medidas  $x_1, x_2, x_3, \dots$  e  $x_n$  tomadas de uma amostra em intervalos de tempos iguais, a média  $\bar{x}$  foi calculada pela expressão:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ,$$

e o desvio padrão da média,  $s$ , foi estimada pela expressão:

$$s = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 \right]^{1/2} .$$

O desvio padrão estimado para  $X$ , quando este representava o único valor do número de contagens das radiações, medido durante um tempo  $T$ , foi:

$$s_x = \sqrt{x} .$$

Tendo-se a contagem bruta,  $x_b$ , da amostra mais a da radiação do ambiente registrada durante um tempo,  $T_b$ , e a contagem da radiação do ambiente,  $x_a$ , registrada em um intervalo de tempo,  $T_a$ , a taxa de contagem líquida,  $\hat{x}_1$ , foi calculada, tal que:

$$\hat{x}_1 = \frac{x_b}{T_b} - \frac{x_a}{T_a} ,$$

e o desvio padrão de  $\hat{x}_1$  foi estimado pela expressão:

$$s_1 = \left[ \frac{x_b}{T_b^2} + \frac{x_a}{T_a^2} \right]^{1/2} .$$

A razão das taxas de contagem de uma amostra antes da descontaminação ( $\hat{x}_i$ ) e após a descontaminação ( $\hat{x}_f$ ) foi denominada fator de descontaminação experimental ( $FD_e$ ) e dada por:

$$FD_e = \frac{\hat{x}_i}{\hat{x}_f} ,$$

e o desvio padrão estimado para  $FD_e$ , foi

$$s_e = \frac{\bar{x}_i}{\bar{x}_f} \left[ \left( \frac{\sigma_{\bar{x}_i}}{\bar{x}_i} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\bar{x}_f}}{\bar{x}_f} \right)^2 \right]^{1/2}$$

A percentagem de descontaminação ( $PD_e$ ) foi calculada a partir de  $FD_e$ , tal que

$$PD_e = \left( 1 - \frac{1}{FD_e} \right) 100$$

### 5.3.3. Ensaio de contaminação das amostras de tecido.

Várias amostras de tecido foram submetidas aos ensaios de contaminação. Uma quantidade da solução com nitrato de urânio com  $334 \text{ g.dm}^{-3}$  de U foi depositada na região central de cada amostra, com o auxílio de uma micropipeta de vidro. As amostras contaminadas foram secas em estufa durante 30 minutos à temperatura em torno de  $70^\circ\text{C}$ . Foram esfriadas à temperatura ambiente e levadas ao sistema de detecção para a contagem. Três tipos de ensaios foram realizados, como descritos em (a), (b) e (c).

a) Verificação da taxa de contagem e do diâmetro da mancha em função do volume da solução contaminante depositada.

Seis amostras foram contaminadas com volumes diferentes da solução contaminante, respectivamente com 25, 50, 75, 100, 125 e  $150 \text{ mm}^3$ . Os diâmetros das manchas resultantes foram medidos e foram feitas cinco contagens de um minuto de cada amostra contaminada. Os diâmetros e as taxas de contagem médias ( $\bar{x}$ ) estão apresentadas na tabela 5.2.

TABELA 5.2. Diâmetro e taxa de contagem média ( $\bar{x}$ ) da mancha da contaminação em tecido de algodão, em função do volume da solução contaminante depositada.

Amostra	Volume do contaminante ( $\text{mm}^3$ )	Diâmetro (cm)	$\bar{x}$ (cpm)
A1	25	2,0	830 $\pm$ 36
A2	50	2,8	1490 $\pm$ 34
A3	75	3,2	1926 $\pm$ 29
A4	100	3,8	2173 $\pm$ 27
A5	125	4,0	2562 $\pm$ 36
A6	150	4,2	2754 $\pm$ 71

b) Verificação da taxa de contagem em função da diluição da solução contaminante, fixando o volume depositado em  $100 \text{ mm}^3$ .

A solução contaminante original foi diluída até seis vezes. As amostras de tecido foram contaminadas com  $100 \text{ mm}^3$  das soluções com concentrações diferentes. As taxas de contagem médias ( $\bar{x}$ ) foram determinadas como em (a) para cada amostra contaminada. Os resultados foram apresentados na tabela 5.3.

TABELA 5.3. Taxas de contagem médias ( $\bar{x}$ ) das amostras de tecido contaminadas com  $100 \text{ mm}^3$ , das soluções com diferentes concentrações (C) de nitrato de urânio.

Amostra	Fator de diluição	C ( $\text{g.dm}^{-3}$ )	$\bar{x}$ (cpm)
B1	1,00	334	2397 $\pm$ 53
B2	0,50	167	1095 $\pm$ 18
B3	0,33...	111	739 $\pm$ 22
B4	0,25	84	551 $\pm$ 26
B5	0,20	67	445 $\pm$ 13
B6	0,16...	56	372 $\pm$ 15

c) Verificação da reprodutibilidade da contaminação pela determinação de massa e pela medida da taxa de contagem.

As massas de quarenta amostras foram prévia e individualmente

determinadas com uma balança analítica. A seguir, as amostras foram contaminadas pela técnica descrita anteriormente. A massa do contaminante da amostra seca foi determinada pela diferença de massa da amostra contaminada e da amostra antes da contaminação. A taxa de contagem média ( $\bar{x}$ ) de cada amostra foi determinada por quatro medidas de um minuto, descontando -se a radiação do ambiente. Os resultados estão apresentados na tabela 5.4.

TABELA 5.4. Massas do contaminante e taxas de contagem médias ( $\bar{x}$ ) das amostras de tecido submetidas à mesma técnica de contaminação.

Amostra	Massa do contaminante ( $\cdot 10^{-2}$ g)	$\bar{x}$ (cpm)	Amostra	Massa do contaminante ( $\cdot 10^{-2}$ g)	$\bar{x}$ (cpm)
C01	5,28	2163 $\pm$ 52	C22	5,58	2158 $\pm$ 77
C02	5,53	2095 $\pm$ 64	C23	5,39	2063 $\pm$ 40
C03	5,26	2152 $\pm$ 32	C24	5,65	2141 $\pm$ 29
C04	5,39	2055 $\pm$ 35	C25	5,42	2275 $\pm$ 53
C05	5,33	2016 $\pm$ 78	C26	5,74	1953 $\pm$ 47
C06	4,66	2076 $\pm$ 82	C27	5,58	2078 $\pm$ 62
C07	5,33	2192 $\pm$ 43	C28	5,22	2027 $\pm$ 28
C08	5,17	2073 $\pm$ 35	C29	5,63	2225 $\pm$ 25
C09	5,09	2095 $\pm$ 39	C30	5,37	2070 $\pm$ 40
C10	5,42	2098 $\pm$ 24	C31	5,59	2083 $\pm$ 36
C11	5,43	2047 $\pm$ 44	C32	5,41	2017 $\pm$ 38
C12	5,30	2000 $\pm$ 36	C33	5,77	2104 $\pm$ 37
C13	5,53	2066 $\pm$ 11	C34	5,13	2011 $\pm$ 27
C14	5,29	2018 $\pm$ 29	C35	5,42	2022 $\pm$ 45
C15	5,57	2009 $\pm$ 58	C36	5,50	1951 $\pm$ 24
C16	5,60	2185 $\pm$ 63	C37	5,23	2047 $\pm$ 62
C17	5,83	2361 $\pm$ 41	C38	5,36	2009 $\pm$ 24
C18	5,54	2246 $\pm$ 44	C39	5,38	1955 $\pm$ 20
C19	5,56	2119 $\pm$ 20	C40	5,39	1973 $\pm$ 25
C20	5,69	2117 $\pm$ 30			
C21	5,61	2014 $\pm$ 26	Média	5,43 $\pm$ 0,22	2084 $\pm$ 91

## 5.4. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS DE DESCONTAMINAÇÃO

### 5.4.1. Descontaminação com água.

As amostras contaminadas com  $100 \text{ mm}^3$  de solução de nitrato de urânio com  $334 \text{ g.dm}^{-3}$  de U foram guardadas por mais de um ano. Cinco amostras foram submetidas à nova contagem e descontaminadas de uma só vez em  $400 \text{ cm}^3$  de água destilada durante 10 minutos, à temperatura ambiente e sob agitação mecânica. A seguir, as amostras foram secadas em estufa e submetidas à segunda contagem. As taxas de contagem determinadas antes ( $\hat{X}_i$ ) e depois ( $\hat{X}_f$ ) da descontaminação e a razão entre elas ( $FD_e$ ) estão apresentadas na tabela 5.5.

TABELA 5.5. Resultado da descontaminação das amostras de tecido de algodão com água destilada, efetuada durante 10 minutos.

Amostra	$\hat{X}_i$ (cpm)	$\hat{X}_f$ (cpm)	$FD_e$
D1	$2076 \pm 25$	$1177 \pm 19$	$1,764 \pm 0,036$
D2	$2013 \pm 25$	$1236 \pm 20$	$1,629 \pm 0,033$
D3	$2140 \pm 26$	$1170 \pm 19$	$1,829 \pm 0,037$
D4	$2129 \pm 25$	$1223 \pm 19$	$1,741 \pm 0,034$
D5	$2088 \pm 25$	$1224 \pm 19$	$1,706 \pm 0,033$
Média	$2089 \pm 50$	$1206 \pm 30$	$1,734 \pm 0,074$

Outras seis amostras foram descontaminadas nas mesmas condições anteriores, porém o tempo de descontaminação de cada amostra foi diferenciado, de 1 até 30 minutos. As taxas de contagens calculadas e os valores de  $FD_e$  estão na tabela 5.6.

TABELA 5.6. Resultado da descontaminação das amostras de tecido de algodão com água destilada, efetuada durante tempos diferentes.

Amostra	Tempo (minutos)	$\hat{x}_i$ (cpm)	$\hat{x}_f$ (cpm)	FDe
E1	1	2180 $\pm$ 26	1382 $\pm$ 21	1,577 $\pm$ 0,030
E2	2	2168 $\pm$ 26	1388 $\pm$ 21	1,562 $\pm$ 0,030
E3	5	2166 $\pm$ 26	1534 $\pm$ 22	1,412 $\pm$ 0,026
E4	10	2164 $\pm$ 26	1461 $\pm$ 21	1,481 $\pm$ 0,028
E5	20	2126 $\pm$ 26	1496 $\pm$ 21	1,421 $\pm$ 0,026
E6	30	2177 $\pm$ 26	1397 $\pm$ 21	1,558 $\pm$ 0,030

#### 5.4.2. Descontaminação com soluções de substâncias diferentes.

As amostras contaminadas e guardadas por mais de um ano foram descontaminadas duas a duas com soluções de diferentes substâncias, durante 10 minutos, à temperatura ambiente. As soluções foram preparadas na concentração de 2 g.dm<sup>-3</sup>.

Os reagentes testados foram designados por códigos segundo as indicações da tabela 5.1. Os resultados desta série de experimentos foram apresentados na tabela 5.7.

#### 5.4.3. Descontaminação sequencial com água e com citrato de sódio a 0,5%.

Cinco amostras de tecido foram contaminadas com 100mm<sup>3</sup> de solução de nitrato de uranilo contendo 330 g.dm<sup>-3</sup> de U. As amostras foram deixadas às condições do laboratório durante 8 dias e, então, contadas por meio do sistema de detecção.

Após a contagem, as amostras foram submetidas à descontaminação em 400 cm<sup>3</sup> de água deionizada durante 10 minutos, à temperatura ambiente, com agitação mecânica. Após a descontaminação, o excesso de água foi removido, estendendo as amostras sobre um papel absorvente. As amostras úmidas foram levadas para a secagem

TABELA 5.7. Resultado da descontaminação das amostras de tecido de algodão com soluções de substâncias diferentes, na concentração de  $2 \text{ g.dm}^{-3}$ .

Amostra	Reagente	$\bar{x}_i$ (cpm)	$\bar{x}_f$ (cpm)	$FD_e$
F01	ÁGUA	2138 ± 26	1391 ± 21	1,537 ± 0,030
F02	ÁGUA	2203 ± 26	1333 ± 20	1,653 ± 0,032
F03	ACIT	2223 ± 26	483 ± 13	4,60 ± 0,14
F04	ACIT	2310 ± 27	415 ± 12	5,57 ± 0,17
F05	ACOX	2165 ± 26	366 ± 11	5,92 ± 0,19
F06	ACOX	2178 ± 26	382 ± 11	5,70 ± 0,18
F07	BICS	2195 ± 26	1295 ± 20	1,695 ± 0,033
F08	BICS	2204 ± 26	1383 ± 21	1,594 ± 0,031
F09	CITS	2156 ± 26	452 ± 12	4,77 ± 0,14
F10	CITS	2123 ± 25	411 ± 12	5,17 ± 0,16
F11	DIET	2209 ± 26	1311 ± 20	1,685 ± 0,032
F12	DIET	2151 ± 26	1384 ± 21	1,554 ± 0,030
F13	EDTA	2031 ± 25	380 ± 11	5,35 ± 0,17
F14	EDTA	2140 ± 26	355 ± 11	6,03 ± 0,20
F15	HEXA	2242 ± 26	1131 ± 19	1,982 ± 0,040
F16	HEXA	2181 ± 26	1157 ± 19	1,985 ± 0,038
F17	HIDS	2082 ± 25	1364 ± 21	1,526 ± 0,030
F18	HIDS	2119 ± 25	1355 ± 20	1,564 ± 0,030
F19	LAUS	2126 ± 26	1235 ± 20	1,721 ± 0,035
F20	LAUS	2035 ± 26	1143 ± 19	1,780 ± 0,037
F21	TARS	2175 ± 26	582 ± 14	3,74 ± 0,10
F22	TARS	2150 ± 26	553 ± 13	3,89 ± 0,10

em estufa durante uma hora à  $90$  a  $100^\circ \text{C}$ . Depois de secas, as amostras foram analisadas pelo sistema de detecção.

As mesmas amostras que foram descontaminadas com água foram submetidas à descontaminação com  $400 \text{ cm}^3$  de solução contendo  $0,5\%$  de citrato de sódio, à temperatura ambiente, sob agitação mecânica. Após a descontaminação com a solução, as amostras foram secadas e submetidas à nova contagem.

Os dados estão apresentados na tabela 5.8,  $\bar{x}_1$  refere-se à taxa de contagem antes da descontaminação,  $\bar{x}_2$  é a taxa de contagem após a descontaminação com água e  $\bar{x}_3$  a taxa de contagem após a descontaminação com a solução de citrato de sódio.

TABELA 5.8. Resultado da descontaminação seqüencial de amostras de tecido com água e com citrato de sódio a 0,5%.  $\bar{x}_1$  representa a taxa de contagem antes da descontaminação,  $\bar{x}_2$  após a descontaminação com água e  $\bar{x}_3$  após a descontaminação com a solução de citrato de sódio.

Amostra	$\bar{x}_1$ (cpm)	$\bar{x}_2$ (cpm)	$\bar{x}_3$ (cpm)
G1	2029 ± 26	1248 ± 21	740 ± 16
G2	2030 ± 26	1137 ± 20	714 ± 16
G3	1936 ± 26	1320 ± 21	913 ± 18
G4	1994 ± 26	1230 ± 21	877 ± 17
G5	1869 ± 25	1325 ± 21	903 ± 18
Média	1972 ± 69	1252 ± 77	829 ± 95

#### 5.4.4. Descontaminação comparativa com citratos.

Dez amostras de tecido foram contaminadas com 100 mm<sup>3</sup> de solução de nitrato de urânio contendo 330g de U por dm<sup>3</sup>. As amostras contaminadas foram deixadas de um dia para outro, nas condições do laboratório e colocadas em estufa por uma hora à temperatura entre 90 e 100°C.

As soluções dos reagentes ácido cítrico (ACIT), citrato de amônio (CITA) e citrato de sódio (CITS) foram preparadas na concentração de 0,02 M. Preparou-se, ainda, uma solução composta de 0,02 M de ácido cítrico e 5 g.dm<sup>-3</sup> de um produto tensoativo comercial (ACTE).

A descontaminação das amostras foi feita duas a duas com as soluções previamente preparadas, durante dez minutos, à temperatura ambiente. A seguir, as amostras foram enxaguadas por 2 minutos com água, enxugadas sobre um papel absorvente e secadas em estufa durante uma hora à temperatura entre 90 e 100°C. Duas outras amostras foram descontaminadas só com água e nas mesmas condições para serem usadas como referência.

A contagem de cada amostra foi feita durante 3 minutos e os resultados estão apresentados na tabela 5.9.

TABELA 5.9. Comparação da eficiência de descontaminação do ácido cítrico (ACIT), citrato de amônio (CITA), citrato de sódio (CITS) e de uma mistura do ácido cítrico com um produto tensoativo (ACTE).

Amostra	Reagente	$\bar{X}_i$ (cpm)	$\bar{X}_f$ (cpm)	$FD_e$
H01	ÁGUA	2040 ± 26	903 ± 18	2,26 ± 0,05
H02	ÁGUA	2054 ± 26	925 ± 18	2,22 ± 0,05
H03	ACIT	2025 ± 26	101 ± 7	20,0 ± 1,4
H04	ACIT	2031 ± 26	78 ± 6	26 ± 2
H05	CITA	2064 ± 26	78 ± 6	27 ± 2
H06	CITA	1948 ± 26	74 ± 6	26 ± 2
H07	CITS	2088 ± 27	115 ± 7	18,2 ± 1,1
H08	CITS	2002 ± 26	116 ± 7	17,3 ± 1,1
H09	ACTE	2056 ± 26	81 ± 6	25 ± 2
H10	ACTE	1992 ± 26	81 ± 6	25 ± 2

5.4.5. Descontaminação com carbonato de sódio em diferentes concentrações.

Doze amostras de tecido foram contaminadas segundo os procedimentos do item 5.4.4. Prepararam-se cinco soluções de carbonato de sódio com 0,2%, 0,5%, 1,0%, 2,0% e 3,0% do soluto em massa, correspondente a 2,37 g; 5,90 g; 11,83 g; 23,65 g e 35,45 g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  com 99% de pureza por  $\text{dm}^3$  de solução.

Os procedimentos de descontaminação e de contagem foram as mesmas adotadas no item anterior e os resultados estão mostrados na tabela 5.10.

TABELA 5.10. Eficiência de descontaminação de carbonato de sódio em diferentes concentrações.

Amostra	Concentração %	$\bar{x}_i$ (cpm)	$\bar{x}_f$ (cpm)	$\text{FD}_e$
I01	0	1965 ± 26	1056 ± 19	1,861 ± 0,042
I02	0	1909 ± 25	1024 ± 19	1,864 ± 0,042
I03	0,2	1934 ± 26	1066 ± 19	1,814 ± 0,040
I04	0,2	1926 ± 26	1109 ± 20	1,737 ± 0,039
I05	0,5	1957 ± 26	1060 ± 19	1,846 ± 0,041
I06	0,5	1973 ± 26	1136 ± 20	1,737 ± 0,038
I07	1,0	1944 ± 26	1186 ± 20	1,639 ± 0,035
I08	1,0	1937 ± 26	1105 ± 19	1,753 ± 0,038
I09	2,0	1950 ± 26	1030 ± 19	1,893 ± 0,043
I10	2,0	1939 ± 26	982 ± 18	1,98 ± 0,05
I11	3,0	1900 ± 25	929 ± 18	2,05 ± 0,05
I12	3,0	1945 ± 26	861 ± 17	2,26 ± 0,05

5.4.6. Descontaminação com produtos comerciais de limpeza.

Com os mesmos procedimentos adotados nos itens 5.4.4. e

5.4.5. testaram-se quatro produtos comerciais de limpeza. As soluções descontaminantes foram preparadas na concentração de 2% em volume de produtos líquidos e 2% em peso no caso de produto sólido.

Os produtos comerciais foram indicados por códigos: PC01 representa um detergente líquido com ação germicida, contendo cloreto de benzalcônio; PC02 indica um detergente líquido para a limpeza de materiais de laboratório, contendo agentes tensoativos e fosfatos complexos; PC03 refere-se a um produto líquido para a descontaminação de objetos; PC04 indica um detergente em pó para a pré-lavagem de roupa com sujeira pesada. Os resultados estão na tabela 5.11.

TABELA 5.11. Comparação da eficiência de descontaminação de produtos comerciais de limpeza.

Amostra	Produto	$\bar{x}_i$ (cpm)	$\bar{x}_f$ (cpm)	$FD_e$
J01	ÁGUA	1898 ± 25	867 ± 17	2,19 ± 0,05
J02	ÁGUA	1941 ± 26	907 ± 18	2,14 ± 0,05
J03	PC01	1892 ± 25	683 ± 15	2,77 ± 0,07
J04	PC01	1967 ± 26	697 ± 16	2,82 ± 0,08
J05	PC02	1948 ± 26	595 ± 14	3,27 ± 0,09
J06	PC02	1885 ± 25	608 ± 15	3,10 ± 0,09
J07	PC03	1888 ± 25	564 ± 14	3,35 ± 0,09
J08	PC03	1904 ± 25	592 ± 14	3,22 ± 0,09
J09	PC04	1910 ± 25	1087 ± 19	1,757 ± 0,038
J10	PC04	1915 ± 26	1155 ± 20	1,658 ± 0,036

## 6. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

### 6.1. OBSERVAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Os resultados foram apresentados em termos de taxas de contagem (cpm) das amostras de tecido contaminadas e das razões das taxas de contagem ( $FD_e$ ), conforme as indicações do item 5.3.2.

Os fatores de descontaminação experimentais ( $FD_e$ ) foram determinados a fim de simplificar o método de avaliação. A determinação dos fatores de descontaminação (FD) por meio das atividades absolutas dos contaminantes da amostra é complexa, necessitando-se introduzir fatores de correção às taxas de contagem como foi indicado no item 4.7. É importante ressaltar que a solução de urânio utilizada como contaminante contém produtos do decaimento radioativo dos isótopos naturais do urânio e que as contagens com o detector foram feitas sem as discriminações das radiações alfa, beta e gama. Portanto, o valor de  $FD_e$  representa um valor da diminuição da radioatividade geral associado à contaminação de urânio e não à diminuição da atividade de um radionuclídeo ou de um elemento em particular.

Observa-se na tabela 5.2. que o diâmetro da mancha da contaminação e a respectiva taxa de contagem não apresentam relações simples de proporcionalidade com o volume do contaminante deposi

tado.

Tomando-se a taxa de contagem da amostra  $A_1$  que apresenta o diâmetro da mancha de 2,0 cm por base e supondo que as manchas das outras amostras tenham o mesmo diâmetro, as taxas de contagem das outras amostras deviam ser os seus múltiplos. Considerando as taxas de contagem determinadas experimentalmente ( $\dot{\lambda}$ ) e as estimadas a partir da amostra  $A_1$  ( $\dot{\lambda}_e$ ), obtém-se os seguintes dados:

Amostra	$\bar{\lambda}$ (cpm)	$\dot{\lambda}_e$ (cpm)	$\dot{\lambda}_e - \bar{\lambda}$ (cpm)
$A_1$	830	830	0
$A_2$	1480	1660	180
$A_3$	1926	2490	564
$A_4$	2173	3320	1147
$A_5$	2562	4150	1588
$A_6$	2754	4980	2226

A diferença  $\dot{\lambda}_e - \dot{\lambda}$  é atribuída à absorção das radiações na amostra, no percurso entre a amostra e o detector e no detector e, principalmente, às contagens perdidas pelo fato de as manchas se tornarem maiores que a área sensível do detector, com o aumento do volume do contaminante depositado.

A tabela 5.3. mostra que, uma vez fixado o volume do contaminante depositado, a taxa de contagem mantém uma relação linear com a concentração da solução contaminante, ou com a quantidade do contaminante na amostra. Essa relação pode ser expressa pela equação:

$$\dot{\lambda} = K \cdot C$$

onde,

$\dot{\lambda}$  é a taxa de contagem em cpm,

$C$  é a concentração do contaminante em  $\text{g.dm}^{-3}$  e

$K$  é a constante que vale aproximadamente  $6,64 \text{ cpm.g}^{-1}.\text{dm}^3$ .

Com o intuito de comparar os valores das taxas de contagem determinados e os das taxas de contagem obtidos pela equação da reta ( $\dot{x}_e$ ), apresenta-se o quadro seguinte:

Amostra	C (g.dm <sup>-3</sup> )	$\bar{x}$ (cpm)	$\dot{x}_e$
B <sub>1</sub>	334	2397	2218
B <sub>2</sub>	167	1095	1109
B <sub>3</sub>	111	739	737
B <sub>4</sub>	84	551	558
B <sub>5</sub>	67	445	445
B <sub>6</sub>	56	372	372

Embora não tenha sido observado experimentalmente, entende-se que quanto mais concentrado for o contaminante, maior será a perda de contagens por absorção na amostra de tecido e por coincidência de contagem no sistema de detecção. Por outro lado, as soluções contaminantes muito diluídas podem resultar em taxas de contagem baixas e podem comprometer a precisão dos fatores de descontaminação a serem determinados.

Assim, das análises dos dados das tabelas 5.2. e 5.3. , conclui-se que as manchas da contaminação devem ser obtidas com uma solução contaminante não muito concentrada nem muito diluída, e devem ter um diâmetro pequeno para evitar as perdas de contagens. Portanto, estabeleceu-se que as amostras contaminadas com 100 mm<sup>3</sup> da solução de nitrato de urânio com 334 g.dm<sup>-3</sup>, que apresentam as taxas de contagem aproximada de 2000 cpm, são ideais para as condições experimentais deste trabalho.

A tabela 5.4. mostra que as amostras contaminadas conforme as descrições anteriores podem ser obtidas com uma boa reprodutibilidade. Na mesma tabela, observa-se que a média das massas do contaminante depositado nas amostras foi de  $(5,43 \pm 0,22) \cdot 10^{-2}$  g e que apenas a amostra C06 apresentou o resultado fora dos limi

tes do intervalo de confiança de 95%, porém não a taxa de contagem. A média das taxas de contagem foi  $\bar{X} = 2084 \pm 91$  cpm e duas amostras, C17 e C25, apresentaram a taxa de contagem média acima do limite do intervalo de confiança de 95%. A discrepância no valor da massa da amostra C06 provavelmente se deve à perda de massa durante a manipulação da amostra. As discrepâncias nas taxas de contagens das amostras C17 e C25 são atribuídas às flutuações estatísticas das contagens e às irregularidades das manchas da contaminação.

As tabelas 5.5. e 5.6. mostram que a água por si só possui a capacidade de remover uma parcela da contaminação. A média dos fatores de descontaminação experimentais da tabela 5.5. foi  $\overline{FD}_e = 1,734 \pm 0,074$ . Isto significa que a parcela solúvel corresponde a cerca de 42%.

A tabela 5.6. mostra que a remoção da parte solúvel é relativamente rápida e que isso se verifica em um tempo inferior a um minuto.

Tomando-se as médias dos valores de  $FD_e$  da tabela 5.7. e calculando os valores de  $PD_e$  e IEL obtêm-se os seguintes dados:

Reagente	$\overline{FD}_e$	$PD_e$ (%)	IEL
ÁGUA	1,60	37,5	-
ACIT	5,09	80,4	+ 6,86
ACOX	5,81	82,8	+ 7,25
BICS	1,64	39,0	+ 0,24
CITS	4,97	79,9	+ 6,78
DIET	1,62	38,3	+ 1,13
EDTA	5,69	82,4	+ 7,18
HEXA	1,93	48,2	+ 1,76
HIDS	1,55	35,5	- 0,32
LAUS	1,75	42,9	+ 0,86
TARS	3,82	73,8	+ 5,76

Observa-se que as substâncias mais eficientes na descontaminação de amostras de tecido contaminadas com nitrato de urânio são, em ordem decrescente de IEL, o ácido oxálico (ACOX), o EDTA, o ácido cítrico (ACIT), o citrato de sódio (CITS), que apresentam as eficiências praticamente iguais; seguidos por tartarato de sódio (TARS) e o hexametáfosfato de sódio (HEXA).

O bicarbonato de sódio (BICS), a dietanolamina (DIET), o hidróxido de sódio (HIDS) e o laurilsulfato de sódio (LAUS) não se mostraram eficientes na remoção da radioatividade das amostras e seus valores de  $PD_e$  obtidos foram muito próximos aos da água. Observa-se que o hidróxido de sódio apresenta um valor negativo de IEL, significando que a solução deste reagente removeu menos radioatividade que a água. Explicações químicas mais detalhadas estão no item 6.2.

O experimento, cujos resultados estão na tabela 5.8., foi realizado para estimar as frações da contaminação, a saber, a percentagem da contaminação livre (CL), da contaminação solta (CS) e da contaminação fixa (CF), conforme os critérios do item 4.7.

Tendo-se as médias das taxas de contagens  $\bar{x}_1 = (1972 \pm 69) \text{cpm}$ ,  $\bar{x}_2 = (1252 \pm 77) \text{cpm}$  e  $\bar{x}_3 = (829 \pm 95) \text{cpm}$  que se referem respectivamente, à taxa de contagem inicial, à taxa de contagem após a descontaminação com água e à taxa de contagem após a descontaminação com a solução de citrato de sódio, obtêm-se:

$$CL = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \bar{x}_1^{-1} \cdot 100 = 37\%$$

$$CS = (\bar{x}_2 - \bar{x}_3) \bar{x}_1^{-1} \cdot 100 = 21\%$$

$$CF = \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_1^{-1} \cdot 100 = 42\%$$

Os valores médios de  $FD_e$  e os respectivos valores de  $PD_e$

e IEL, obtidos da tabela 5.9., são:

Reagente	$\overline{FD}_e$	$PD_e$ (%)	IEL
ÁGUA	2,24	55	-
ACIT	23	96	9,1
CITA	27	96	9,1
CITS	18	94	8,6
ACTE	25	96	9,1

Esses valores indicam que as soluções de ácido cítrico (ACIT), de citrato de amônio (CITA), de citrato de sódio (CITS) e da mistura de ácido cítrico e um produto tensoativo comercial (ACTE) apresentam bons resultados na descontaminação de tecido contaminado com nitrato de urânio.

Da tabela 5.10. obtêm-se os seguintes valores de  $\overline{FD}_e$ ,  $PD_e$  e IEL:

Concentração (%)	$\overline{FD}_e$	$PD_e$ (%)	IEL
0	1,86	46,2	-
0,2	1,78	43,8	- 0,45
0,5	1,79	44,1	- 0,39
1,0	1,70	41,2	- 0,93
2,0	1,94	48,5	+ 0,43
3,0	2,16	53,7	+ 1,39

Observa-se que o carbonato de sódio não apresentou resultados satisfatórios de descontaminação, nas condições testadas. Nas concentrações até 1%, verifica-se que o reagente dificultou a remoção da radioatividade, apresentando uma eficiência menor que a da água.

Os valores de  $\overline{FD}_e$ ,  $PD_e$  e IEL dos produtos comerciais de limpeza, obtidos a partir da tabela 5.11., são apresentados a seguir:

Produto	FD <sub>e</sub>	PD <sub>e</sub> (%)	IEL
ÁGUA	2,17	53,9	-
PC01	2,80	64,3	+ 2,26
PC02	3,19	68,7	+ 3,21
PC03	3,29	69,6	+ 3,41
PC04	1,71	41,5	- 2,69

Os produtos de limpeza testados não apresentaram bons resultados. Os produtos PC01, PC02 e PC03 podem ser considerados razoáveis, porém, o PC04 mostrou-se menos eficiente na descontaminação que a água.

Neste trabalho, procurou-se manter as mesmas condições experimentais para a obtenção dos resultados apresentados em cada tabela. Portanto, a comparação dos resultados de uma tabela é direta, entretanto, para comparar os dados de uma tabela com os de outra, deve-se verificar as condições em que as amostras foram contaminadas e descontaminadas.

Por exemplo, os fatores de descontaminação da água das tabelas 5.5., 5.7., 5.9., 5.10. e 5.11. diferem entre si. Essas diferenças são atribuídas

- a) ao estado do tecido - o grau de desgaste do tecido devido ao uso pode induzir a maior ou menor fixação dos contaminantes;
- b) ao contaminante utilizado - as amostras das tabelas 5.5. e 5.7. foram contaminadas com soluções de nitrato de urânio com  $334 \text{ g.dm}^{-3}$  de U e as das tabelas 5.9., 5.10. e 5.11. , com soluções de  $330 \text{ g.dm}^{-3}$  de U;
- c) ao tempo durante o qual as amostras foram deixadas contaminadas - as amostras das tabelas 5.5. e 5.7. foram deixadas por mais de um ano, enquanto que as outras por apenas um dia. A contaminação tende a se fixar com o passar do tempo; e
- d) às condições de descontaminação - as amostras da tabela 5.5. fo

ram agitadas com agitador mecânico enquanto as outras foram a gitadas manualmente. As amostras das tabelas 5.9., 5.10 e 5.11. foram submetidas ao enxaguamento, após a descontaminação com o reagente.

Comparando-se os valores de  $FD_e$  da água das diferentes ta-  
belas, tem-se

TABELA	5.5.	5.7.	5.9.	5.10.	5.11.
$FD_e$	1,73	1,60	2,24	1,86	2,17

Tomando-se o menor valor ( $FD_e = 1,60$ ) e o maior ( $FD_e = 2,24$ ), pode-se afirmar que a água remove de 37,5% a 55,4% da radioativi-  
dade do tecido contaminado com a solução de nitrato de urânio.

Para comparar as eficiências dos reagentes apresentadas em tabelas diferentes, devem-se considerar as concentrações das solu-  
ções utilizadas, além dos fatores anteriormente discutidos para a água.

O ácido cítrico e o citrato de sódio foram utilizados em concentrações diferentes; a tabela 5.7. apresenta os valores de  $FD_e$  referentes à concentração de  $2 \text{ g.dm}^{-3}$  e a tabela 5.9. na de 0,02 M. A concentração 0,02 M corresponde a  $3,8 \text{ g.dm}^{-3}$  de ácido cítrico e  $5,5 \text{ g.dm}^{-3}$  de citrato de sódio. Os valores de  $FD_e$  res-  
pectivos são maiores na tabela 5.9. e isto está de acordo com o raciocínio de que os reagentes são mais eficientes em concentra-  
ções mais elevadas.

No caso da tabela 5.8., quando o citrato de sódio foi uti-  
lizado na concentração de 0,5% ( $5 \text{ g.dm}^{-3}$ ), a eficiência global da descontaminação realizada primeiro com água e depois com a solu-  
ção de citrato de sódio resultou em 58%, enquanto a percentagem de descontaminação estimada da tabela 5.7. foi 79,9% e da tabela 5.9. foi 94%. Isto indica que a seqüência das operações de descon-  
taminação é muito importante. Nesse caso, é sugerível que se fi-  
zesse a descontaminação, primeiramente com a solução de citrato

de sódio e depois com a água.

## 6.2. INTERPRETAÇÃO RADIOQUÍMICA<sup>(31)</sup>

A solução de nitrato de urânio utilizada na contaminação das amostras de tecido de algodão contém os isótopos naturais do urânio e os seus produtos filhos.

Considerando que o urânio natural é composto por 99,276% de  $^{238}\text{U}$ , 0,7196% de  $^{235}\text{U}$  e 0,0057% de  $^{234}\text{U}$  e as respectivas meias-vidas são  $4,51 \cdot 10^9$  anos,  $7,1 \cdot 10^8$  anos e  $2,47 \cdot 10^5$  anos<sup>(4)</sup>, calcula-se que um grama de urânio natural contém aproximadamente, logo após a sua purificação,  $1,2 \cdot 10^4 \text{Bq}$  ( $3,3 \cdot 10^{-7} \text{Ci}$ ) de  $^{238}\text{U}$ ,  $5,7 \cdot 10^2 \text{Bq}$  ( $1,5 \cdot 10^{-8} \text{Ci}$ ) de  $^{235}\text{U}$  e  $1,3 \cdot 10^4 \text{Bq}$  ( $3,5 \cdot 10^{-7} \text{Ci}$ ) de  $^{234}\text{U}$ . Portanto, a atividade específica do urânio natural é  $2,6 \cdot 10^4 \text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  ( $7,0 \cdot 10^{-7} \text{Ci} \cdot \text{g}^{-1}$ ), considerando apenas as desintegrações alfa dos isótopos do urânio, sem incluir a contribuição dos produtos filhos.

Após a purificação, a atividade do urânio será acrescida com as atividades principalmente dos primeiros produtos filhos, a saber,  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{Pa}^m$  e  $^{231}\text{Th}$ . Com o passar dos anos, eles tendem a entrar em equilíbrio radioativo e as suas atividades aproximam-se das atividades dos radionuclídeos genitores, embora as massas desses radionuclídeos filhos sejam muito pequenas em comparação com a do urânio.

Os elementos químicos U, Pa e Th, aos quais pertencem os principais radioisótopos contaminantes citados, são de transição do grupo dos actínídeos. Acredita-se que esses elementos estão presentes na solução de nitrato de urânio, na forma de cátions  $\text{UO}_2^{++}$ ,  $\text{Th}^{4+}$  e  $\text{PaO}(\text{OH})_2^+$ , ou nas respectivas formas hidratadas.

Na contaminação, esses cátions ocupam os sítios reativos das fibras de algodão, especialmente os de troca iônica, como os grupos carboxilas citados no item 4.6. Com a evaporação do sol

vente, o nitrato de uranilo tende a concentrar-se e cristalizar-se nas fibras do tecido.

Durante a descontaminação, uma grande parte do nitrato de uranilo é dissolvida pela água, porém alguns cátions radioativos permanecem ligados nos sítios de troca iônica.

O ácido cítrico e o ácido oxálico apresentaram-se bastante eficientes na descontaminação das amostras de tecido porque fornecem ions  $H^+$  à solução, que removem os cátions radioativos do tecido por troca iônica.

A matéria exposta no item 4.5.2. e os resultados experimentais indicam que a descontaminação é facilitada pelos agentes complexantes. As tabelas 5.7., 5.8. e 5.9. indicam a remoção dos contaminantes pela formação de complexos de cátions radioativos com os ânions citrato, oxalato, tartarato e EDTA.

Os íons de metais pesados como os do U, Th e Pa induzem a hidrólise em soluções aquosas e a formação de partículas coloidais ou compostos pouco solúveis, especialmente em valores de pH mais elevados. Os reagentes tais como  $NaHCO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $(NaPO_3)_n$ , NaOH e dietanolamina, que produzem soluções aquosas alcalinas, não se mostraram eficientes, provavelmente por causa da formação de produtos pouco solúveis nos interstícios das fibras têxteis. No entanto, o carbonato e o bicarbonato de sódio foram citados como bons agentes de descontaminação de tecido pela sua propriedade de complexar e solubilizar os íons de  $U^{(1,5)}$ , ao contrário do que foi observado na remoção da radioatividade (tabelas 5.7. e 5.10.). Portanto, a radioatividade remanescente na amostra após a descontaminação com essas substâncias se deve provavelmente aos seus produtos filhos, principalmente ao  $^{234}Th$  e  $^{234}Pa^m$ ; porém, a comprovação experimental exige outros métodos de análise.

Os agentes tensoativos como o laurilsulfato de sódio (tabela 5.7.) e o produto comercial associado ao ácido cítrico (tabela

la 5.9.) mostraram-se pouco eficientes na remoção dos contaminantes catiônicos. Porém, deve-se enfatizar que os agentes tensoativos possuem a propriedade de atuar sobre as sujidades de natureza oleosa ou gordurosa que ocorrem na prática juntamente com a contaminação radioativa (item 4.5.1.).

Os produtos comuns de limpeza disponíveis no comércio geralmente são misturas de substâncias, cuja composição não é conhecida pelo usuário. Porém, considerando os resultados experimentais e a matéria desenvolvida no item 4.5.3., conclui-se que os sabões e detergentes comuns são pouco eficientes para, ou mesmo dificultam, a remoção de certos cátions de metais pesados, a não ser que a sua composição seja incrementada com agentes complexantes.

### 6.3. INTERPRETAÇÃO SOB O PONTO DE VISTA DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.

A contaminação causada por 100 mm<sup>3</sup> da solução de nitrato de urânio com 330 g.dm<sup>-3</sup> de U, que resultou numa mancha com 3,6 cm de diâmetro em tecido de algodão, corresponde a uma contaminação de superfície com 8,4.10 Bq.cm<sup>-2</sup> (2,3.10<sup>-3</sup> μCi.cm<sup>-2</sup>) de emissores alfa. Este nível de contaminação é bastante representativo dos verificados nos aventais contaminados na prática, nas áreas de trabalho do ciclo de combustível nuclear do IPEN.

Se a atividade da mancha for tomada como média em 100 cm<sup>2</sup> da roupa, conforme recomendado nacional<sup>(9,10)</sup> e internacionalmente<sup>(8)</sup> pela Proteção Radiológica, a contaminação será equivalente a 8,68q.cm<sup>-2</sup> (2,3.10<sup>-4</sup> μCi.cm<sup>-2</sup>).

O limite de contaminação atualmente recomendado para o urânio natural é 3.10 Bq.cm<sup>-2</sup> (8,1.10<sup>-4</sup> μCi.cm<sup>-2</sup>) para as roupas de proteção individual das áreas restritas (tabela 3.3.).

Supondo que a contaminação de 8,4.10 Bq.cm<sup>-2</sup> deva ser re

duzida pelo menos até o limite de  $3.10 \text{ Bq.cm}^{-2}$ , o processo de descontaminação deve apresentar um fator de descontaminação maior ou igual a 2,8, isto é:

$$FD \geq \frac{8,4 \cdot 10}{3 \cdot 10} = 2,8$$

Embora haja a ressalva de que os valores de  $FD$  e  $FD_e$  não sejam correspondentes, como foi observado no item 6.1., presume-se que os agentes complexantes que apresentaram os valores de  $FD_e$  maiores que 2,8 sejam os reagentes indicados para a descontaminação de roupas de tecido de algodão contaminadas com nitrato de urânio. Incluem-se, nesta categoria, os seguintes reagentes:

Reagente	Concentração
ácido cítrico	2 g.dm <sup>-3</sup>
ácido oxálico	2 g.dm <sup>-3</sup>
citrato de sódio	2 g.dm <sup>-3</sup>
EDTA	2 g.dm <sup>-3</sup>
tartarato de sódio	2 g.dm <sup>-3</sup>
ácido cítrico	0,02 M
citrato de amônio	0,02 M
citrato de sódio	0,02 M
ácido cítrico/tensoativo	0,02 M/5 g.dm <sup>3</sup>
produto comercial PC01	2%
produto comercial PC02	2%
produto comercial PC03	2%

#### 6.4. FONTES DE ERROS.

Os resultados foram apresentados com os respectivos desvios padrões estimados pelas flutuações estatísticas das contagens, conforme as considerações do item 5.3.2.

Descrevem-se, a seguir, os prováveis erros associados ao método de avaliação, à parte das flutuações estatísticas das contagens. Esses erros estão associados à técnica de contaminação

das amostras, aos procedimentos de descontaminação e à contagem.

Durante a contaminação das amostras, deve-se obter manchas uniformes pela pipetagem e deposição do volume do contaminante sobre os retalhos de tecido. As diferenças nas taxas de contagem de uma amostra para a outra, incluem a não uniformidade das manchas da contaminação produzidas no tecido e os erros de contagem. Isto pode ser observado na tabela 5.4. onde a média das taxas de contagem,  $\bar{X} = 2084 \pm 91$  cpm, apresenta um desvio padrão maior que o desvio da taxa de contagem média de cada amostra.

Muitos fatores, além das características das soluções dos contaminantes, podem influir na descontaminação das amostras. A somatória dos erros cometidos, por exemplo, no preparo das soluções, na agitação e no manuseio da amostra contribui para o erro das medidas das taxas de contagem após a descontaminação. Além disso, a mancha da contaminação está sujeita a alterações durante a descontaminação, o que acarreta uma diferença na geometria de contagem.

Por exemplo, o aumento relativo dos desvios padrões das médias das taxas de contagem após cada etapa da descontaminação da tabela 5.8. (o desvio relativo de  $\hat{X}_1$  é 3,5%, de  $\hat{X}_2$  é 6,2% e o de  $\hat{X}_3$  é 11,4%) é atribuído a esses fatores.

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 7.1. COMENTÁRIOS GERAIS

Evitar a contaminação radioativa deve ser um cuidado constante de qualquer indivíduo que manuseia materiais radioativos , principalmente na forma de fontes não seladas.

As roupas protetoras exercem a importante função de proteger os indivíduos da contaminação pessoal, porém a simples utilização não soluciona em definitivo os problemas decorrentes da contaminação radioativa. Para isto, outras medidas adicionais devem ser providenciadas, simultaneamente ao uso adequado das roupas protetoras. Inferem-se três princípios dos estudos realizados concernentes à contaminação de roupas protetoras de tecido habitualmente utilizadas em condições normais de trabalho.

Relacionam-se, a seguir:

- a) prevenir a contaminação por meio do planejamento racional das áreas de trabalho e pelos procedimentos corretos e seguros durante o manuseio de materiais radioativos;
- b) controlar a contaminação por meio da monitoração e do arranjo metódico das roupas protetoras, para que os limites recomendados não sejam ultrapassados; e

c) descontaminar as roupas protetoras por meio de procedimentos , reagentes e equipamentos adequados.

Observou-se que o sucesso de um processo de descontaminação de roupas em meio aquoso requer a utilização de reagentes eficientes, em condições apropriadas. Os testes experimentais desenvolvidos neste trabalho permitiram a avaliação da eficiência dos reagentes para remover a radioatividade das amostras de tecido de algodão contaminado com solução de nitrato de urânio. Entre os reagentes mais eficientes testados, citam-se o ácido oxálico , o ácido cítrico e seus sais de sódio e de amônio e o EDTA.

A parte experimental apresenta muitos pontos a serem desenvolvidos e aprimorados. Os efeitos dos vários fatores que influenciam a descontaminação de roupas, tais como a forma química do contaminante, a temperatura da solução descontaminante e a sequência das operações de lavagem, poderão ser investigados. Além disso, os resultados experimentais poderão ser melhorados com a redução das fontes de erros, estabelecendo-se os procedimentos nas condições bem controladas.

Dada a variedade de tecidos de fibras naturais e artificiais e os diversos tipos de materiais radioativos atualmente produzidos e manuseados, a contaminação e a descontaminação de roupas são assuntos bastante extensos e que podem ser pesquisados e desenvolvidos. As sugestões para estudos posteriores estão apresentadas no item seguinte.

## 7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.

Enumeram-se a seguir, as sugestões para trabalhos posteriores.

a) Desenvolvimento e padronização de métodos para avaliar as eficiências dos reagentes de descontaminação e para avaliar a fa

cidade de descontaminação das superfícies.

- b) Seleção e formulação de reagentes de descontaminação específicos para determinados contaminantes radioativos e superfícies.
- c) Especificação de materiais para a confecção de roupas protetoras, pouco susceptíveis à fixação de contaminantes e fáceis de descontaminar.
- d) Estudo da contaminação radioativa de roupas por meio de outros métodos físicos ou químicos de análise, por exemplo, via detecção de partículas alfa ou via espectrometria gama para a identificação e avaliação dos radionuclídeos residuais, após a descontaminação.
- e) Desenvolvimento de métodos para a detecção e avaliação prática da contaminação de roupas, visando a monitoração e a classificação das mesmas.
- f) Estudo e desenvolvimento dos processos para a descontaminação de roupas de tecido, incluindo a aplicação do método seco citado no item 4.2.
- g) Estudo para a descontaminação de outros tipos de indumentária, tais como roupas impermeáveis, luvas, botas e máscaras de respiração.
- h) Planejamento da lavanderia para a descontaminação de roupas, considerando as condições ótimas de descontaminação, os possíveis riscos associados ao manuseio das roupas contaminadas, os equipamentos e os maquinários necessários.
- i) Controle e tratamento dos efluentes gerados na descontaminação de roupas.
- j) Estudos alternativos à descontaminação de roupas, considerando as roupas descartáveis e a melhoria dos dispositivos de contenção de material radioativo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMALRAJ, R. V.; KHARBANDA, J. L.; SIRIAH, H. N.; RAMASWAMY, V. Physicochemical methods of decontamination-evaluation of some procedures and practices followed in Atomic Energy Establishment, Trombay, India. In: BLYTHE, H. J. ed. Decontamination of nuclear installations: proceedings of the 1st international symposium held in Harwell, 4 - 6 May 1966. Cambridge, Mass., Cambridge University, 1967. p.199-211.
2. ARRIS, B. W. & THOMAS, C. R. Principles involved in the formulation of decontamination reagents. In: BLYTHE, H. J. ed. Decontamination of nuclear installations: proceedings of the 1st international symposium held in Harwell, 4 - 6 May 1966. Cambridge, Mass., Cambridge University, 1967. p. 3-10.
3. BARRY, P. J. Some general considerations in chemical decontamination. Health Phys., 1:184-88, 1958.
4. BUREAU OF RADIOLOGICAL HEALTH. Radiological health handbook. Rockville, Maryland, U.S. Department of Health, Education and Welfare, 1970.
5. CARLSON, A. B. & NEUMAN, W. F. The removal uranium compounds from cloth, a laundry problem. Oak Ridge, Tenn., USAEC, May 1950. (UR-108).
6. CHABEREK, S. & MARTELL, A. E. Organic sequestering agents: a discussion of the chemical behavior and applications of metal chelate compounds in aqueous systems. New York, N. Y., Wiley, 1959.

7. CHECOSLOVÁQUIA. CS Patent 239018/81. Organic liquid for decontamination of clothing, underwear and textiles. SEVERA, J. & BAR, J. 1981. apud INIS ATOMINDEX, 19:RN076818 , 1988.
8. CLAYTON, R. F. Monitoring of radioactive contamination of surfaces. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1970. (Technical report series, 120).
9. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Diretrizes básicas de radioproteção. Rio de Janeiro, Nov. 1986 (CNEN-NE-3.01).
10. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. DEPARTAMENTO DE FISCALIZAÇÃO DE MATERIAL RADIOATIVO. Normas básicas de proteção radiológica. 19 set. 1973. (CNEN-06/73) (Publicado no D.O. nº 180, Brasília, seção I, Pt. II).
11. DUNSTER, H. J. The application and interpretation of ICRP recommendations in the United Kingdom Atomic Energy Authority. 3.ed. Harwell, Berkshire, UKAEA, 1968.
12. FIESER, L. F. & FIESER, M. Organic chemistry. 3. ed. New York, N.Y., Reinhold, 1956.
13. HUGHES, D. C.; PARTHUM JR., A. H.; JAMES, H.; McWHORTER JR., J. C. Clothing decontamination and evaluation of laundry methods. Washington, D. C.; Office of Quartermaster General, 1952. (WT-347).
14. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Basic principles for occupational radiation monitoring. Vienna, 1987. (IAEA-SS-84).
15. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Basic safety standards for radiation protection. Vienna, 1967. (IAEA-SS-9).

16. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Manual on decontamination of surfaces. Vienna, 1979. (IAEA-SS-48)
17. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Manual on safety aspects of the design and equipment of hot laboratories. Vienna , 1981. (IAEA-SS-30).
18. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation protection procedures. Vienna, 1973. (IAEA-SS-38).
19. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Respirators and protective clothing. Vienna, 1967. (IAEA-SS-22).
20. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safe handling of radionuclides. Vienna, 1973. (IAEA-SS-1).
21. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Radiation quantities and units. Washington, D.C., 1980. (ICRU-33).
22. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, 1966. (ICRP-9).
23. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, 1977. (ICRP-26).
24. KONING, C. The decontamination of large components at ECN . In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Decommissioning of nuclear facilities: proceedings of a symposium held in Vienna, 13-17 November, 1978. Vienna, 1979. p.517-27.
25. MARTELL, A. E. Complexing agent. In: MARK, H. H.; MCKETTA JR., J. J. ; OTHMER, D. F.; STANDEN, A. eds. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. 2.ed. New York, N. Y., John Wiley, 1965. v.6, p.1-24.

26. McALFUFF JR., H. J. Review and outline of present laundry procedure at ORNL. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., 1950. (ORNL-600).
27. MIURA, T. & ISHIDA, Y. Contamination by radioactive material and its removal. In: RADIOISOTOPES: proceedings of the 2nd Japan conference, February 1958. Washington, D.C., USAEC, 1961. (AEC-Tr-4482). p.661-81.
28. MORISHIMA, H.; KOGA, T.; NIWA, T.; KAWAI, H.; FUKAGAWA A. Studies on the radioactive decontamination, I. Decontamination effect of various types of cloth material. apud INIS ATOMINDEX, 14: RN742188, 1983.
29. MOSSELMANS, G. & NIENHAUS, J. Reinigung und dekontamination radioaktiv verseuchter kleidung. Europäische Atomgemeinschaft, EURATOM, 1968. (EUR-4187d.).
30. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. Control and removal of radioactive contamination in laboratories. s.d. (NBS - handbook, 48).
31. NESMEYANOV, A. N. Radiochemistry. Moscow, MIR Pub., 1974.
32. NISHIWAKI, Y. & NISHIOKA, H. On the removal of the radioactive surface contaminations. In: FISH, B. R. ed. Surface Contamination: proceedings of a symposium held at Gatlinburg, June 1964. Oxford, Pergamon, 1967. P. 377-89.
33. NORWOOD, J. L. A study of the effectiveness of decontaminating agents on contaminated protective clothing. Richland, General Electric, 1955. (HW-38218 (Rev.)).
34. OUSEPH, P. J. Introduction to nuclear radiation detectors. In: EWING, G. W. ed. Laboratory instrumentation and techniques. New York, N.Y., Plenum, 1975. v.2.

35. PEARSALL, S. G.; GEMMEL, L.; BRESLIN, A. Possible health hazards associated with the laundering of radioactively contaminated protective clothing. Health Phys., 1:176-83, 1958.
36. REIFF, F.; SCHUSTER, K.; SPOOR, H.; STOEPLER, M. Comparative literature study on the problems of the decontamination of radioactively contaminated textiles. Brussels, Commission of the European Communities, 1967. (EUR-3276e).
37. SCHWARTZ, A. M. Detergency. In: MARK, H. F.; McKETTA JR., J. J.; OTHMER, D. F.; STANDEN, A. eds. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. 2.ed. New York, N.Y., John Wiley, 1965. v.6, p.853-95.
38. SLEEP, W. H. Soap and synthetic detergents. In: COOD, L. W. ed. Materials and technology. London, Longman, 1972. v. 5, p.271-316.
39. SORON, E. R. Material decontamination at Nevada test site. Las Vegas, Nevada, Reynolds Electrical and Engineering, 1960. (TID-19108).
40. STEVENS, C. E. Surfactants. In: MARK, H. F.; McKETTA JR., J. J.; OTHMER, D. F.; STANDEN, A. eds. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. 2.ed. New York, N. Y., John Wiley, 1969. v. 19, p.507-93.
41. STEVENSON, D. G. Detergency in the atomic energy industry. In: DANIELLI, J. F.; PANKHURST, K. G. A.; RIDDIFORD, A. C. eds. Surface phenomena in chemistry and biology. London, Pergamon, 1958. p. 140-56.
42. TALBOYS, A. P. & BUCKINGHAM, R. A. Contamination and decontamination properties of textiles fibres with respect to I<sup>131</sup>. New York, USAEC, 1952. (NYO-4520).

43. TALBOYS, A. P. & SPRATT, E. C. An evaluation of laundering agents and techniques used in the decontamination of cotton clothing. New York, USAEC, 1954. (NYO-4990).
44. TOMPKINS, P. C. Surface contamination and decontamination. In: BLATZ, H. ed. Radiation hygiene handbook. New York, McGraw-Hill, 1959. p. 18-2 - 18-23.
45. WRIXON, A. D.; LINSLEY, G. S.; BINNS, K. C.; WHITE, D. F. Derived limits for surface contamination. Harwell, National Radiological Protection Board, 1979. (NRPB-DL2).