# UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

ANTONIO RAMOS NETO

# ESTUDO DA DEGRADAÇÃO CAUSADA PELA RADIAÇÃO GAMA EM POLÍMEROS UTILIZADOS EM SERVIÇOS DE RADIOTERAPIA

DISSERTAÇÃO

CURITIBA 2013

# ANTONIO RAMOS NETO

# ESTUDO DA DEGRADAÇÃO CAUSADA PELA RADIAÇÃO GAMA EM POLÍMEROS UTILIZADOS EM SERVIÇOS DE RADIOTERAPIA

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Danyel Scheidegger Soboll Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elaine Cristina Azevedo

CURITIBA 2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R175 Ramos Neto, Antonio

Estudo da degradação causada pela radiação gama em polímeros utilizados em serviços de radioterapia / Antonio Ramos Neto. - 2013.

112 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Danyel Scheidegger Soboll.

Co-orientadora: Elaine Cristina Azevedo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, Curitiba, 2013. Bibliografia: f. 107-112.

1. Polímeros. 2. Radioterapia. 3. Radiação gama. 4. Biodegradação. 5. Engenharia biomédica – Dissertações. I. Soboll, Danyel Scheidegger, orient. II. Azevedo, Elaine Cristina. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 610.28

Biblioteca Central da UTFPR, Campus Curitiba

# UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Campus Curitiba





Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica

Título da Dissertação Nº 015

# "Estudo da degradação causada pela radiação ionizante em polímeros utilizados em serviços de radioterapia"

por

# **Antonio Ramos Neto**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)** – Área de Concentração: Física Médica, pelo **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica (PPGEB)**, – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (**UTFPR**), *Campus* Curitiba, às **10h** do dia **28 de novembro de 2013**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Elaine Cristina Azevedo, Dr. (Presidente – UTFPR)

Prof. Salvador Claro Neto, Dr. (USP)

Charlie Antoni Miquelin, Dr. (UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Bertoldo Schneider Jr., Dr. (Coordenador do PPGEB)

Dedico este trabalho a todos que estiveram envolvidos me ajudando e me apoiando.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Danyel Scheidegger Soboll e Elaine Azevedo por todo o auxílio e apoio prestado.

Ao prof. João Floriano da UTFPR, pelo uso do equipamento de infravermelho.

Ao Prof. José Fernando Fragalli da UDESC, pela utilização do equipamento de Ângulo de Contato.

Prof. Salvador Claro Neto da USP, do Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros, pelas Análises Térmicas.

Ao prof. Carlos Lepienski e a MSc. Sara Blunk do Laboratório de Propriedades Nanomecânicas da UFPR pelas medidas de Indentação Instrumentada.

Aos alunos do grupo de materiais do DAMEC Jefferson Boiczuk, Luis Stocco, Marcus Baratieri e Marina Vasco, que me ajudaram a preparar amostras e realizar alguns ensaios.

Agradeço aos colegas e professores que conheci e tive contato durante todas as fases do curso.

A empresa Embrarad pelas irradiações realizadas.

Ao Prof. Cezar Lúcio e ao Sr. Tancredo, ambos da ENGISA LTDA., pela ajuda ao me disponibilizar todo tempo que precisei me ausentar do trabalho para me dedicar ao curso, além de todo o apoio prestado.

Agradeço também aos meus familiares, principalmente a José, Izaura e Leandro (pai, mãe e irmão), assim como Beatriz e meus amigos sempre presentes durante todo o período do curso.

Obrigado.

### RESUMO

RAMOS NETO, Antonio. **ESTUDO DA DEGRADAÇÃO CAUSADA PELA RADIAÇÃO GAMA EM POLÍMEROS UTILIZADOS EM SERVIÇOS DE RADIOTERAPIA**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) -Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Em serviços de radioterapia são utilizados acessórios confeccionados com diversos tipos de polímeros para auxiliar no posicionamento dos pacientes durante o tratamento e na execução das rotinas de trabalho. A radiação gama pode causar nos polímeros degradação de sua estrutura molecular que além de reduzir sua eficiência na assepsia e seu tempo de vida útil, pode também eliminar compostos orgânicos nocivos ao ambiente de trabalho. Neste trabalho é apresentado o estudo da degradação causada pela exposição à radiação gama em polímeros utilizados em serviços de radioterapia. Amostras de policarbonato (PC), polipropileno (PP), polimetilmetacrilato (PMMA) e compósito de poliuretana derivada de óleo de mamona com juta (PU-Juta), foram expostas a doses de radiação gama de 5 kGy (dose de algumas semanas de rotinas de radioterapia) a 25 kGy (dose de esterilização), sendo analisadas por espectrometria de absorção na região do infravermelho, indentação instrumentada, ângulo contato de е análise termogravimétrica. O PU-Juta mostrou-se o mais adequando para utilização, pois apresenta fragilização no material somente com doses acima de 20 kGy, por não perder sua característica hidrofílica permitindo assepsia de forma eficiente e por não possuir compostos orgânicos voláteis nocivos em sua composição. O PC apresentou indícios de fragilização a partir de 5 kGy, reduzindo drasticamente o tempo de vida útil e sendo o menos indicado em serviços onde haja exposição à radiação ionizante.

Palavras-chave: Polímeros. Radioterapia. Radiação gama. Degradação.

## ABSTRACT

RAMOS NETO, Antonio. **STUDY OF DEGRADATION CAUSED BY GAMMA RADIATION IN POLYMERS USED IN RADIOTHERAPY SERVICES**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Radiotherapy Services uses many different types of polymeric accessories to assist in the positioning of patients during treatment and work routines. Gamma radiation can cause material degradation and allow that harmful compounds are released into the air. Also can harm the efficiency of sterilization and reduce the accessories useful life. This paper presents the study of the degradation caused by exposure to gamma radiation in polymers used in radiotherapy services. Samples of polycarbonate (PC), polypropylene (PP), polymethylmethacrylate (PMMA) and a composite of polyurethane derived from castor oil with Jute (PU-Jute) were exposed to gamma radiation doses of 5 kGy (few weeks of routines radiotherapy) to 25 kGy (sterilization dose) and analyzed by infrared spectroscopy, instrumented indentation, contact angle and thermal analysis. The PU-Jute samples proved to be the most fitting for use in places with radiation exposure. The material embrittlement was detected above 20 kGy doses. Also does not change their hydrophilic characteristic allowing aseptic procedures efficiently and has no harmful volatile compounds in the composition. The PC samples showed signs of embrittlement with 5 kGy reducing drastically their lifetime. Therefore is not suited for radiotherapy services.

Keywords: Polymers. Radiotherapy. Gamma radiation. Degradation.

# LISTA DE ABREVIATURAS

PC	_	Policarbonato
PP	_	Polipropileno
PMMA	_	Polimetilmetacrilato
PU	_	Poliuretana
ANVISA	_	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
PU-Juta	_	Compósito de poliuretana derivada do óleo de mamona com
		juta
MDI	—	Difenil metano di-isocianato
PVC	—	Policloreto de vinila
TGA	_	Análise termogravimétrica
UTFPR	_	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ATR	_	Reflexão total atenuada
DAQBI-UTFPR	_	Departamento Acadêmico de Química e Biologia da UTFPR
UDESC	_	Universidade do Estado de Santa Catarina
UFPR	_	Universidade Federal do Paraná
IQSC	_	Instituto de Química de São Carlos
USP	_	Universidade de São Paulo
MEV	_	Microscopia eletrônica de varredura

## LISTA DE FIGURAS

Figura	01.a	_	Estrutura Química do PC	17
Figura	01.b	_	Acessório de PC Utilizado em Salas de Radioterapia	17
Figura	02.a	_	Estrutura Química do PMMA	18
Figura	02.b	_	Acessório de PMMA Utilizado em Salas de Radioterapia	18
Figura	03.a	_	Estrutura Química do PP	19
Figura	03.b	_	Cesto de Lixo Fabricado em PP	19
Figura	04	_	Reação de Um Poliol e Um Di-isocianato para Obtenção de	_
	• ·		Poliuretana	19
Figura	05	_	Estrutura Química da Molécula da Triglicéride do Ácido	
0			Ricinoléico	20
Figura	06	_	Compósito PU-Juta	21
Figura	07	_	Esquema de funcionamento de um espectrômetro	
	•		infravermelho	23
Figura	08	_	Esquema da medida do ângulo de contato	25
Figura	09	_	Amostras dos Polímeros Enviadas para Irradiação	27
Figura	10 a	_	Pacotes Senarados e Identificados Conforme a Dose	28
Figura	10.u	_	Pacotes Eechados Prontos nara Serem Enviados nara	20
i iguia	10.0		Irradiação	28
Figura	11		Amostras Embaladas Sob o Bólus	20
Figura	12	_	Equipamento Infravermelho com suporte de ATP	20
Figura	12	_	Equipamento utilizado para a medida de ângulo de contato	30
Figura	13	_	Equipamento utilizado para a medida do angulo de contato	20
Figura	14	_		21
Figura	10	_	Equipamento TA Instruments Q800	১∠ ১∡
Figura	10	_	Espectro da Amostra de PC Não Inadiada	34
Figura	17	_	Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e	05
<b>-</b> ·	4.0			35
Figura	18	_	Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e	~~
<u>-</u> .	4.0		Irradiada com 10 kGy	36
Figura	19	_	Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e	~-
	~ ~		Irradiada com 15 kGy	37
Figura	20	_	Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e	
			Irradiada com 20 kGy	38
Figura	21	_	Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e	
			Irradiada com 25 kGy	39
Figura	22	—	Gráfico do Angulo de Contato em Função das Doses nas	
			Amostras de PC	40
Figura	23	—	Curva de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do	
			PC Não Irradiado	41
Figura	24	_	Curva de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
-			Penetração do PC Não Irradiado	42
Figura	25	_	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	
Ũ			do PC Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy	43
Figura	26	_	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
5 -			Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 5 kGv	43
Figura	27	_	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	_
0			do PC Não Irradiado e Irradiado com 10 kGv	44

Figura 28	_	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	45
Figura 29	_	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	45
5		do PC Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy	46
Figura 30	_	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	40
Figura 31	_	Curvas de Dureza em Eunção da Profundidade de Penetração	40
i igula o i		do PC Não Irradiado e Irradiado com 20 kGv	47
Figura 32	_	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
		Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy	48
Figura 33	_	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	40
Figura 3/		Curvas de Módulo Elástico em Euroão da Profundidade de	49
i iyula 54	_	Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 25 kGv	49
Figura 35	_	Espectro da amostra de PMMA não irradiada	51
Figura 36	_	Espectros das Amostras de PMMA Não Irradiada e	• ·
0		Irradiada com 5 kGy	52
Figura 37	_	Espectros das Amostras de PMMA Não Irradiada e	
		Irradiada com 10 kGy	53
Figura 38	-	Espectros das Amostras de PMMA Não Irradiada e	- 4
Eigura 20		Irradiada com 15 kGy	54
Figura 59	_	Irradiada com 20 kGy	55
Figura 40	_	Espectros das Amostras de PMMA Não Irradiada e	00
ga. ae		Irradiada com 25 kGy	56
Figura 41	_	Gráfico do Ângulo de Contato em Função das Doses nas	
Figure 42		Amostras de PMMA.	57
Figura 42	_	PMMA Não Irradiado	58
Figura 43	_	Curva de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	00
i igaia io		Penetração do PMMA Não Irradiado	59
Figura 44	_	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	
		do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy	60
Figura 45	-	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
<b>E</b> :		Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy	60
Figura 46	_	do PMMA Não Irradiado o Irradiado com 10 kGy	61
Figura 47	_	Curvas de Módulo Elástico em Euncão da Profundidade de	01
i igula +i		Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 10 kGv	62
Figura 48	_	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	-
U		do PMMA Não Irradiado e Írradiado com 15 kGy	63
Figura 49	_	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
		Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy	63
Figura 50	_	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	~ 4
Eiguro 51		uo rivilvia Nao irradiado e irradiado com 20 KGy	64
i iyula bil	_	Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy	65
Figura 52	_	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	50
		do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy	66

Figura 5	53	_	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
U U			Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy	66
Figura 5	54	—	Espectro da Amostra de PP Não Irradiada	68
Figura 8	55	—	Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e	
			Irradiada com 5 kGy	69
Figura 5	56	_	Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e	
			Irradiada com 10 kGy	70
Figura 8	57	—	Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e	
			Irradiada com 15 kGy	71
Figura 8	58	—	Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e	
			Irradiada com 20 kGy	72
Figura 8	59	—	Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e	
			Irradiada com 25 kGy	73
Figura 6	60	—	Gráfico do Ângulo de Contato em Função das Doses nas	
			Amostras de PP	74
Figura 6	61	—	Curva de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do	
			PP Não Irradiado	75
Figura 6	62	—	Curva de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
			Penetração do PP Não Irradiado	75
Figura 6	63	—	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	
			do PP Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy	76
Figura 6	64	_	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
			Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy	77
Figura 6	65	—	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	
			do PP Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy	78
Figura 6	66	—	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
			Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy	78
Figura 6	67	—	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	
			do PP Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy	79
Figura 6	68	—	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
			Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy	80
Figura 6	69	—	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	
			do PP Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy	81
Figura 7	70	—	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
			Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy	81
Figura 7	71	—	Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	
			do PP Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy	82
Figura 7	72	—	Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de	
			Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy	83
Figura 7	73	-	Curva TG/DTG da amostra de PP não irradiada	84
Figura 7	74	-	Sobreposição das curvas TG das amostras de PP irradiada e	
			não irradiada	85
Figura /	/5	—	Espectro da Amostra de PU-Juta Não Irradiada	87
Figura /	/6	—	Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e	~~
F			Irradiada com 5 kGy	88
⊢igura 7	( (	—	Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e	00
<b>-</b>	70		Irradiada com 10 kGy	89
⊢igura 7	78	—	Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e	~~
			Irradiada com 15 KGy	90

<ul> <li>Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e Irradiada com 20 kGy</li> </ul>	91
<ul> <li>Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e</li> </ul>	0.
Irradiada com 25 kGy	92
- Gratico do Angulo de Contato em Função das Doses has	as
<ul> <li>Curva de Dureza em Funcão da Profundidade de Penetração do</li> </ul>	30
PU-Juta Não Irradiado	94
<ul> <li>Curva de Módulo Elástico em Função da Profundidade de</li> </ul>	
Penetração do PU-Juta Não Irradiado	94
- Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	05
do PU-Juta Nao Irradiado e Irradiado com 5 KGy	95
Penetração do PLL luta Não Irradiado e Irradiado com 5 kGv	96
<ul> <li>Curvas de Dureza em Euncão da Profundidade de Penetração</li> </ul>	00
do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 10 kGv	97
<ul> <li>Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de</li> </ul>	
Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy	97
<ul> <li>Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração</li> </ul>	
do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy	98
<ul> <li>Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de</li> </ul>	
Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy	99
- Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração	100
do PU-Juta Nao Irradiado e Irradiado com 20 kGy	100
Penetração do PL luta Não Irradiado e Irradiado com 20 kCv	100
<ul> <li>Curvas de Dureza em Euncão da Profundidade de Penetração</li> </ul>	100
do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 25 kGv	101
<ul> <li>Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de</li> </ul>	
Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy	102
	<ul> <li>Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e Irradiada com 20 kGy</li> <li>Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e Irradiada com 25 kGy</li> <li>Gráfico do Ângulo de Contato em Função das Doses nas Amostras de PU-Juta</li></ul>

# LISTA DE TABELAS

Tabela 01	<ul> <li>Grupos funcionais encontrados em polímeros e suas</li> </ul>	
	respectivas faixas de número de onda características	24
Tabela 02	– Resultados dos ensaios realizados nas amostras de PC	50
Tabela 03	– Resultados dos ensaios realizados nas amostras de PMMA	67
Tabela 04	– Resultados dos ensaios realizados nas amostras de PP	86
Tabela 05	- Resultados dos ensaios realizados nas amostras de PU-Juta	103

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 POLÍMEROS	16
2.1.1 Policarbonato (PC)	17
2.1.2 Polimetilmetacrilato (PMMA)	17
2.1.3 Polipropileno (PP)	18
2.1.4 Compósito de Poliuretana Derivado de Óleo de Mamona	19
	21
2.3 ENSAIOS EM POLÍMEROS	21
2.3 1 Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho	22
2.3.2 Indentação Instrumentada	20
2 3 3 Ângulo de Contato	2 <del>4</del> 25
2 3 4 Análise Tármica	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3 1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	27
	28
3.3 ΕΩΡΕΛΤΡΩΜΕΤΡΙΑ DE ΔΒΩΩΡΩÃO ΝΑ ΡΕΩΙÃO DO	20
INERAVERMELHO	20
	29
	30
	31
	33
	22
4.1 FOLICARDONATO (FC)	33 33
4.1.1 Especiromenta de Absorção na Região do Initavermento	33
4.1.2 Aliguio de Collidio	40 41
4.1.3 Indeniação Instrumentada.	4 I 50
	50
4.2 FOLIMETILMETAGRILATO (FIMMA)	51
4.2.1 Espectrometría de Absorção na Região do Initavermento	51 57
4.2.2 Aliguio de Collidio	57
4.2.3 Internação Instrumentados do DMMA	00 67
	60
4.3 POLIPROPILENO (PP)	00 69
4.3.1 Especiromenta de Absorção na Região do Initavermento	74
4.3.2 Aliguio de Collidio	74
4.3.4 Análico Tormogravimátrica	75 QA
4.3.4 Analise Termoyravimetrica	04 06
	00
4.4 COMPOSITO DE POLIURETANA DERIVADO DE OLEO DE MAMONA	96
4 1 Espectrometria de Absorção na Bagião de Infravormelho	96
4.4.1 Espectrometria de Absorção na Região do Initavermento	00
4.4.2 Allyulu ut collialu	93 04
4.4.3 INUERIAÇÃO INSTRUMENTADA do DEL Juito	94 102
	103
	104 105
	100
	100

### 1 INTRODUÇÃO

Objetos fabricados com polímeros são utilizados em larga escala em serviços hospitalares, devido à facilidade de confecção em diversos formatos, proporcionando uma infinidade de aplicações e terem um baixo custo de fabricação [1]. Alguns dos polímeros utilizados nestes ambientes são: o policarbonato (PC), polipropileno (PP), polimetilmetacrilato (PMMA) e poliuretanas (PU).

Em serviços de radioterapia são utilizados posicionadores de membros, como cabeça e pescoço, para garantir a eficiência da execução das irradiações nas regiões de interesse médico, preservando os tecidos sadios [2]. Além destes acessórios, os polímeros são facilmente encontrados em uma variedade de objetos como cadeiras, roupas, mesas, lixeiras, entre outros.

Os simuladores de dose, conhecidos como *phantoms*, são construídos com materiais poliméricos que absorvem e espalham as radiações ionizantes de forma similar ao corpo humano, possibilitando a avaliação e aplicação de técnicas específicas de tratamento [3]. Estes processos de absorção e espalhamento ocorrem quando as altas energias provenientes das irradiações interagem com a estrutura polimérica, causando excitações e ionizações nas moléculas provocando reações de decomposição e adição nas cadeias [4].

A interação das radiações ionizantes com os polímeros provoca efeitos como cisão e entrecruzamento de cadeias [5], alterando a estrutura molecular e suas propriedades mecânicas e térmicas [6], podendo comprometer a utilização do material nestes ambientes devido a efeitos de endurecimento e fragilização dos materiais, diminuindo a vida útil e gerando custos na reposição destes. A região superficial, onde há a ocorrência dos primeiros efeitos das radiações [4], pode ser afetada de forma que os procedimentos padrões de assepsia adotados nos serviços médicos não tenham eficiência garantida.

As modificações da estrutura molecular dos polímeros podem causar efeitos indesejáveis como a eliminação de solventes voláteis nocivos no ambiente hospitalar, podendo causar danos à saúde e ao meio ambiente, mesmo em pequenas quantidades devido a propriedades cancerígenas [7]. A ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária), através da Resolução 176 [8], sugere a procura por substitutos para materiais que possuam compostos orgânicos voláteis. As poliuretanas derivadas do óleo de mamona são uma solução para este problema por não utilizarem solventes orgânicos em sua produção.

Alterações na estrutura química dos polímeros podem ser detectados através da espectrometria de absorção da região do infravermelho, a partir da análise de espectros formados por picos de intensidade de absorção em função dos números de onda da região do infravermelho [9].

Alterações superficiais podem ser detectadas através da análise do ângulo de contato e da nanodureza [10]. O ângulo de contato fornece dados referentes à energia de superfície e caracteriza a molhabilidade da amostra avaliada [11]. A indentação instrumentada fornece resultados de dureza e módulo elástico das amostras, podendo detectar alterações que provocam fragilização do material [12], reduzindo seu tempo de vida útil.

O estudo das propriedades térmicas pode ser feito através da análise termogravimétrica, que resulta na caracterização das temperaturas em que ocorrem eventos térmicos nos materiais [13].

Este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da radiação gama nos polímeros com exposição a doses normalmente praticadas em serviços de radioterapia, de forma a simular sua utilização na rotina comum dos serviços. A partir dos ensaios que fornecem dados referentes à degradação dos materiais a cada acréscimo de dose, é possível propor qual dos polímeros estudados apresenta os requisitos mais favoráveis para sua utilização, considerando a diminuição do tempo de vida útil, a eficiência dos procedimentos de assepsia, a possibilidade de esterilização por radiação gama (dose de 25 kGy) e a possível eliminação de compostos voláteis nocivos ao ser humano e ao ambiente.

No capítulo 2 são apresentadas as principais características dos polímeros estudados, os conceitos necessários para o entendimento do comportamento mecânico destes materiais, da interação da radiação com os polímeros e os ensaios realizados para a caracterização das amostras. No capítulo 3 são detalhados os materiais e métodos utilizados para a irradiação das amostras e a realização dos ensaios. No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais e as discussões. No capítulo 5 apresentam-se as conclusões dos resultados obtidos e no capítulo 6 são sugeridas algumas propostas de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos envolvendo polímeros, classificação, propriedades mecânicas e a descrição dos polímeros estudados neste trabalho, bem como os ensaios realizados para a caracterização e interação da radiação ionizante com estes materiais.

#### 2.1 POLÍMEROS

Polímeros são moléculas formadas pela repetição de uma combinação de átomos, em longas cadeias, resultando num material com propriedades específicas [4, 14]. A extensa variedade de materiais poliméricos e suas distintas possibilidades de uso possibilitaram sua aplicação em diversas áreas [1].

Os polímeros ideais para utilização em serviços de radioterapia são aqueles que apresentam as menores modificações em suas propriedades mecânicas quando expostos às radiações ionizantes, com pouca alteração em sua rigidez, dureza, rugosidade, facilidade de assepsia e que não exalem compostos orgânicos voláteis [15].

Os polímeros podem ser classificados de diversas maneiras, seja pela sua estrutura química [4], seu comportamento mecânico [1] e, ainda, quanto ao seu desempenho mecânico [16].

A classificação através de sua estrutura química se faz por duas divisões: polímeros de cadeia carbônica, quando apresentam somente carbono na sua cadeia principal e polímeros de cadeia heterogênea, quando existem outros átomos na cadeia principal [17]. Quanto ao comportamento mecânico os polímeros podem ser classificados como: plásticos, elastômeros ou fibras [1].

Quanto ao comportamento térmico podem ser termoplásticos ou termorrígidos [18]. Os termoplásticos possuem temperatura de fusão, ou seja, podem assumir outros estados físicos em certas condições de temperatura e pressão sem que transformem em outros materiais devido à quebra das cadeias, e

podem ser conformados após aquecimento [6], já os termorrígidos não possuem temperatura de fusão e após aquecimento não são moldáveis [17].

2.1.1 Policarbonato (PC)

Utilizado em serviços de radioterapia como posicionadores [19], o PC é um polímero termoplástico convencional de cadeira heterogênea que possui alta resistência mecânica de tração e impacto e é visualmente transparente [18, 20]. A Figura 01 mostra a estrutura química do PC e um acessório de PC utilizado em salas de radioterapia.



(a)



(b)

Figura 01 – (a) Estrutura Química do PC [21] (b) Acessório de PC Utilizado em Salas de Radioterapia [22]

Fonte: (a) Tudo Sobre Plásticos - Policarbonato (2013) (b) LMS BioMedical - Produtos Médicos Hospitalares (2013).

#### 2.1.2 Polimetilmetacrilato (PMMA)

Este polímero é classificado como um termoplástico especial de cadeia heterogênea. Possui características mecânicas de resistência, tração e impacto superiores aos termoplásticos convencionais, porém apresenta comercialmente um custo mais elevado [1]. São utilizados em colimadores e posicionadores de cabeça e

pescoço em salas de radioterapia [23]. A Figura 02 mostra a estrutura química do PMMA e um colimador utilizado em sala de radioterapia.



Figura 02 – (a) Estrutura Química do PMMA [24] (b) Acessório de PMMA Utilizado em Salas de Radioterapia [25]

Fonte: (a) Tudo Sobre Plásticos - Acrílico (2013) (b) Medintec (2013).

2.1.3 Polipropileno (PP)

É classificado como termoplástico de cadeia carbônica e possui alta produtividade por ser facilmente processado, exigindo métodos mecânicos pouco complexos e custo reduzido [18, 20]. Estão presentes em salas de radioterapia em suportes, roupas, cadeiras, cestos de lixo, entre outros objetos. Também são encontrados imobilizadores e apoiadores de cabeça e pescoço fabricados em PP [26]. A Figura 03 mostra a estrutura química do PP



(a)

Figura 03 – (a) Estrutura Química do PP [27] (b) Cesto de Lixo Fabricado em PP [28] Fonte: (a) Tudo Sobre Plásticos - Polipropileno (2013) (b) Lixeiras, Polipropileno e -Derivados - Metal Pan (2013).

(b)

2.1.4 Compósito de Poliuretana Derivado de Óleo de Mamona com Juta (PU-Juta)

A poliuretana é obtida através da reação de um poliol e um diisocianato, conforme pode ser visto na Figura 04.



Figura 04 – Reação de Um Poliol e Um Di-isocianato para Obtenção de ------Poliuretana [29] Fonte: Silva *et al.* (2003).

Podendo ser produzido em diversas combinações, indo de espumas [30] a adesivos [31], a PU derivada do óleo de mamona tem as vantagens de não utilizar compostos orgânicos voláteis na sua composição [32, 33] e de ser obtido a partir de matéria-prima de fonte renovável [34].

O óleo de mamona possui um poliéster natural derivado do ácido ricinoléico (89% de sua composição) que pode ser considerado um poliol, e este em reação com o difenil metano di-isocianato (MDI) possibilita a obtenção da poliuretana derivada do óleo de mamona [32, 35]. A Figura 05 mostra a estrutura química do ácido ricinoléico.



Figura 05 – Estrutura Química da Molécula da Triglicéride do Ácido Ricinoléico [36] Fonte: Azevedo (2009).

A PU derivada do óleo de mamona produzida com o tecido de Juta (PU-Juta) forma um compósito que fornece maior resistência à PU [34]. Está sendo desenvolvido e estudado com o objetivo de substituir outros materiais, como a madeira, na confecção de acessórios em serviços de radioterapia e radiodiagnóstico, apresentando propriedades mecânicas similares à da madeira [26, 37, 38]. A Figura 06 apresenta uma amostra do compósito PU-Juta.



Figura 06 – Compósito PU-Juta Fonte: Autoria própria.

#### 2.2 EFEITO DA RADIAÇÃO IONIZANTE EM POLÍMEROS

Radiações ionizantes são ondas eletromagnéticas de alta energia que têm a capacidade de interagir com a matéria, provocando alterações nas propriedades físicas e químicas quando a energia dessas radiações é grande o suficiente para quebrar as energias de ligação das moléculas do material irradiado, provocando excitando e ionização [4]. Os efeitos desta interação e as mudanças causadas nos materiais dependem da composição química e da natureza da radiação aplicada [6].

Nos polímeros, a radiação ionizante pode formar grupos moleculares que agem como reagentes químicos, formando sítios ativos que podem provocar cisão de cadeias, reticulação, despolimerização, moléculas insaturadas e grupos oxigenados [4] causando alterações em propriedades químicas, físicas e mecânicas [5].

O entrecruzamento caracteriza-se pela formação de ligações cruzadas em cadeias poliméricas que resultam em aumento de peso molecular, resistência mecânica e dureza, fragilizando o material com a diminuição da elasticidade da amostra. Já a cisão é caracterizada pela quebra da cadeia principal polimérica e resulta na diminuição do peso molecular, resistência mecânica, dureza e elasticidade resultando em fragilização do material [6].

Azevedo *et al.* [36, 39] estudou os efeitos da radiação gama em amostras de PU derivado do óleo de mamona, relatando que não houve alterações em suas propriedades mecânicas, até a dose de 100 kGy, e verificando que o material é viável para utilização em locais onde há exposição à radiação gama.

Ferrazza *et al.* [37] avaliaram os efeitos da radiação gama com dose única de 25 kGy em amostras do compósito PU-Sisal, constatando que houve cisão de cadeias poliméricas, comprometendo o desempenho mecânico das amostras.

Ribeiro [40] relatou cisão de cadeias e reticulações em um copolímero bioabsorvível irradiado com doses de 15kGy a 35 kGy de radiação gama causando alterações nas propriedades mecânicas, como resistência e microdureza.

Schneider *et al.* [41] estudaram os efeitos da radiação gama, com doses de até 100 kGy, na superfície de amostras de PP e PMMA utilizados em radioterapia analisando suas características hidrofílicas, antes e após a irradiação, através da análise do ângulo de contato.

Weber *et al.* [42] estudaram os efeitos da radiação gama com dose de 340 kGy em amostras de PC relatando que não houve entrecruzamento e cristalização nas cadeias, porém houve aumento de processos de cisão.

Perera *et al.* [43] e Zhou *et al.* [44] também relataram cisão de cadeias em PP irradiados com radiação gama com doses de 100 kGy e 50 kGy, respectivamente, através da espectrometria de absorção da região do infravermelho e de ensaios térmicos.

Pezzin [45] estudou os efeitos provocados pela radiação gama em um simulador de tecido em radioterapia à base de PVC e relatou, a partir da dose de 75 kGy, a formação de grupos cromóforos provocando o amarelecimento do material. Também relatou a cisão no grupo carbonila e formação de polienos.

## 2.3 ENSAIOS EM POLÍMEROS

As possíveis alterações nas propriedades e na estrutura química dos polímeros durante seu uso em salas de radioterapia podem ser caracterizadas através de diversas técnicas e testes experimentais, conhecidos como ensaios [46, 6]: análise do espectro de absorção na região do infravermelho [9, 10], indentação instrumentada [12, 47], determinação do ângulo de contato [11, 48] e a análise termogravimétrica (TGA) [19, 13].

#### 2.3.1 Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho

Esta técnica tem por objetivo obter informações das ligações químicas existentes na cadeia molecular do material a partir da análise de espectros gerados que apresentam picos de absorção em função da faixa de números de onda da região do infravermelho, que fornece informações de quais ligações químicas estão presentes na amostra [46, 9]. A Figura 07 mostra o esquema de funcionamento do espectrômetro infravermelho.



Figura 07 – Esquema de funcionamento de um espectrômetro infravermelho [9]

Fonte: Adaptado de Silverstein (2005).

As transições entre estados quânticos correspondentes a duas energias distintas dentro de uma molécula são detectadas pela emissão ou absorção destas energias. As freqüências de infravermelho na faixa de número de onda entre 500 cm<sup>-1</sup> e 4000 cm<sup>-1</sup> fornecem informações referentes a vibrações moleculares e movimentos de vibração e rotação das moléculas presentes em polímeros [49].

Durante a execução do ensaio, a presença de gás carbônico ( $CO_2$ ) no local gera um pico de absorção na faixa de número de onda entre 2280 cm<sup>-1</sup> e 2390 cm<sup>-1</sup> no espectro da amostra e este deve ser desconsiderado [17]. A Tabela 01 mostra alguns grupos funcionais encontradas em polímeros e suas respectivas faixas de número de onda características.

Grupo Funcional	Número de Onda (cm <sup>-1</sup> )
O–H	3600 – 3200
N–H	3500 – 3070
C–H	3030 – 2850
C=O	1750 – 1700
C=C	1675 – 1645
C=C de aromáticos	1600, 1580, 1500 e 1450
CH <sub>2</sub>	1470 – 1420
C–O	1420 – 1050
CH <sub>3</sub>	1390 – 1370
N–C	1280 – 1180

Tabela 01 – Grupos Funcionais Encontrados em Polímeros e suas Respectivas Faixas de Número de Onda Características

Fonte: Koenig (1999).

#### 2.3.2 Indentação Instrumentada

O ensaio de indentação instrumentada ou nanoindentação fornece informações das propriedades mecânicas da superfície do material [10]. Através da penetração de uma ponta com diferentes geometrias, o equipamento coleta simultaneamente dados relativos aos parâmetros de força aplicada e profundidade de penetração, possibilitando avaliar a resposta do material em função do tempo, podendo se determinar a dureza e o módulo elástico desses materiais [46, 12]. Essas medidas, de dureza e módulo elástico, podem ser obtidas pelo método de Oliver-Pharr [50], a qual se baseia na recuperação elástica que ocorre na fase inicial do descarregamento da força aplicada. Azevedo *et al.* [47] utilizaram a técnica para

caracterizar amostras de poliuretana derivada do óleo de mamona, utilizando formatos diferentes de penetradores.

Como os materiais poliméricos submetidos a feixes de radiação sofrem alterações estruturais inicialmente na região superficial [4], a indentação instrumentada aplicada com parâmetros de forças da ordem de nanonewtons e de profundidade de nanometros fornece dados da dureza, módulo elástico e rugosidade da região superficial da amostra estudada.

2.3.3 Ângulo de Contato

O ângulo de contato é definido pelo ângulo formado pela intersecção da interface sólido-líquido e líquido-vapor [20], conforme visto na Figura 08.



Figura 08 – Esquema da medida do ângulo de contato [51] Fonte: Ângulo de contato e energia de superfície (2013)

Um ângulo de contato maior ou igual a 90° indica uma superfície hidrofóbica [52], ou seja, aquela que possuí baixo grau de molhabilidade, enquanto que um ângulo de contato abaixo de 90° indica uma superfície hidrofílica, apresentando alto grau de molhabilidade.

A molhabilidade de uma superfície depende da sua estrutura química e rugosidade [10]. Nos acessórios confeccionados com polímeros este problema pode se agravar, pois as radiações ionizantes atuam como agentes de degradação da superfície desses materiais [2, 36]. Para se estudar a molhabilidade de uma

superfície coloca-se uma gota sobre a mesma e determina-se o ângulo de contato. Este ângulo representa uma medida quantitativa do processo de molhabilidade [11].

Em salas de radioterapia, assim como em quaisquer serviços hospitalares, a assepsia dos materiais é fundamental para garantir que possíveis processos infecciosos não se espalhem pelos pacientes expostos a estes acessórios e equipamentos. Desta forma a medida do ângulo de contato pode ser útil para avaliar a eficácia de um procedimento de limpeza de superfícies visando executar assepsia de forma eficiente [41].

#### 2.3.4 Análise Térmica

A análise térmica em polímeros tem como finalidade obter informações de características como variação de massa, estabilidade térmica, pureza, temperaturas, transição vítrea. A variedade de comportamentos dos polímeros é estudada para selecionar qual o melhor material para uma dada aplicação [6].

A análise termogravimétrica (TGA) mede a variação da massa da amostra estudada em função da temperatura ao longo do tempo [13].

Polímeros irradiados com radiação gama podem apresentar alterações em suas propriedades térmicas, como relatado por Azevedo *et al.* [36], através do ensaio de DSC, o aumento da temperatura de transição vítrea em amostras de adesivo de PU após irradiação gama com dose de 100 kGy. Melo [19] estudou resultados de TGA em amostras de PC irradiadas com doses entre 25 kGy e 125 kGy, concluindo que não houve alterações significativas nas temperaturas iniciais de degradação das amostras irradiadas dentro da faixa de dose estudada.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são descritos os métodos de preparação das amostras de PP, PMMA, PP e PU-Juta, a irradiação com radiação gama, espectroscopia de absorção na região do infravermelho, ângulo de contato, indentação instrumentada e análise termogravimétrica.

## 3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de PC, PMMA, PP foram fornecidas pela empresa Nital. As amostras de compósito PU-Juta foram fornecidas pelo Laboratório de Compósitos e Polímeros da UTFPR. A Figura 09 apresenta as amostras enviadas para irradiação.



Figura 09 – Amostras dos Polímeros Enviadas para Irradiação Fonte: Autoria própria.

As amostras cortadas em formatos quadrados, porém sem tamanho exatamente padronizado, e organizadas em pacotes distintos identificados com as doses de radiação que receberão, para serem enviados para irradiação. Nestes pacotes também foram incluídas algumas amostras de outros polímeros que não foram utilizadas neste trabalho. A Figura 10.a mostra os pacotes separados e identificados conforme a dose. A Figura 10.b mostra os pacotes fechados prontos para serem enviados.



(a) (b)
 Figura 10 - (a) Pacotes Separados e Identificados Conforme a Dose (b) Pacotes Fechados
 Prontos para Serem Enviados para Irradiação
 Fonte: Autoria própria.

## 3.2 IRRADIAÇÃO

A irradiação gama em doses de 5 kGy, 10 kGy, 15 kGy, 20 kGy e 25 kGy foram realizadas pela empresa Embrarad – Cotia-SP, com uma fonte industrial de cobalto-60 MDS Nordion's JS-9600, utilizada para esterilização de materiais poliméricos de uso médico. Cada pacote recebeu sua respectiva dose de forma única, visando a tentativa de simular doses comuns utilizadas em radioterapia e de forma escalonada.

Para evitar o efeito *build-up*, responsável por um possível aumento de dose devido ao espalhamento das radiações que ocorrem principalmente nas camadas iniciais do material irradiado, todos os pacotes receberam um bólus de 0,5 cm de espessura sobre as amostras [3], conforme pode ser visto na Figura 11.



Figura 11 – Amostras Embaladas Sob o Bólus Fonte: Autoria própria.

## 3.3 ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO

Para as caracterizações das amostras, a partir dos espectros de absorção na região do infravermelho, foi usado um espectrômetro infravermelho VARIAN, Modelo FT-IR 640-IR, com resolução de 4 cm<sup>-1</sup>, faixa de operação de número de onda entre 11000 cm<sup>-1</sup> e 735 cm<sup>-1</sup>, com suporte de ATR, do DAQBI-UTFPR. A Figura 12 mostra o equipamento para Infravermelho com suporte de ATR.



Figura 12 – Equipamento Infravermelho com suporte de ATR Fonte: Autoria própria.

# 3.4 ÂNGULO DE CONTATO

As medidas de ângulo de contato foram realizadas no Departamento de Materiais da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) com o equipamento KSV CAM101, com faixa de operação para medidas de ângulos de 0° a 180° e velocidade de obtenção de imagens de 30 quadros por segundo. A Figura 13 mostra o equipamento utilizado para medida do ângulo de contato.



Figura 13 – Equipamento utilizado para a medida do ângulo de contato Fonte: Autoria própria.

## 3.5 INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA

A indentação instrumentada foi utilizada para medir a dureza e o módulo elástico, usando o método de Oliver-Pharr [50] com a ponta *Berkovich*. As cargas aplicadas variaram de 0,1 a 400 nN, utilizando um *Nanoindenter XP MTS System*, da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A Figura 14 mostra o aparelho usado para realização da indentação instrumentada.



Figura 14 – Equipamento *Nanoindenter XP* Fonte: Autoria própria.

# 3.6 ANÁLISE TÉRMICA

Para análise termogravimétrica (TGA) foi utilizado o equipamento *TA Instruments*, modelo Q800, do Instituto de Química de São Carlos (IQSC), da Universidade de São Paulo (USP), nas seguintes condições:

- Massa da amostra: 8,0 a 10,0 mg.
- Faixa de temperatura: 30°C a 800°C.
- Razão de aquecimento: 10°C/min.
- Atmosfera de N<sub>2</sub>: 100 ml/min.

A Figura 15 mostra o equipamento utilizado para realização da análise termogravimétrica.



Figura 15 – Equipamento TA *Instruments* Q800 Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são descritos os resultados e as discussões dos dados obtidos pelos ensaios de espectrometria de absorção na região do infravermelho, ângulo de contato, nanoindentação nas amostras de PC, PMMA, PP e PU-Juta e os dados de TGA das amostras de PP.

#### 4.1 POLICARBONATO (PC)

Os resultados dos ensaios de espectrometria de absorção na região do infravermelho, ângulo de contato e indentação instrumentada realizados nas amostras de PC irradiadas e não irradiada e as discussões destes resultados estão apresentados a seguir.

4.1.1 Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho

A Figura 16 mostra o espectro da amostra de PC não irradiada.



Figura 16 – Espectro da Amostra de PC Não Irradiada Fonte: Autoria própria.

É possível identificar um forte pico em 1774 cm<sup>-1</sup> relativo ao grupo carbonila (C=O), porém os picos mais fortes de absorção de infravermelho no PC ocorrem nos estiramentos das ligações C–O sendo possíveis visualizar 3 picos em 1222 cm<sup>-1</sup>, 1188 cm<sup>-1</sup> e 1161 cm<sup>-1</sup> e outro pico, menos intenso, em 1015 cm<sup>-1</sup>. Aos anéis aromáticos da estrutura química atribui-se o pico mais forte em 1510 cm<sup>-1</sup>. Os estiramentos simétricos e assimétricos do grupo C–H são vistos na região entre 2970 cm<sup>-1</sup> e 2850 cm<sup>-1</sup>.
A Figura 17 mostra os espectros das amostras de PC não irradiada e irradiada com 5 kGy.



Figura 17 – Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e Irradiada com 5 kGy Fonte: Autoria própria.

Na sobreposição destes espectros é possível destacar o aparecimento de uma banda de absorção com pico em 3305 cm<sup>-1</sup>, referente grupo OH; diminuição da intensidade de absorção dos picos referentes ao grupo CH, entre 2970 cm<sup>-1</sup> e 2850 cm<sup>-1</sup>; diminuição intensidade de absorção dos picos em 1774 cm<sup>-1</sup> e 1704 cm<sup>-1</sup>, referentes ao grupo C=O; diminuição intensidade de absorção do pico em 1510 cm<sup>-1</sup> referente aos anéis aromáticos; diminuição da intensidade de absorção dos picos em 1222 cm<sup>-1</sup>, 1188 cm<sup>-1</sup> e 1161 cm<sup>-1</sup>, do grupo das ligações C–O; aparecimento de um pico em 1653 cm<sup>-1</sup> e 923 cm<sup>-1</sup> indicando a formação de ligações C=C, possivelmente devido à quebra das ligações do grupo C–H.

A Figura 18 mostra os espectros das amostras de PC não irradiada e irradiada com 10 kGy.



Figura 18 – Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e Irradiada com 10 kGy Fonte: Autoria própria.

Comparando o espectro da amostra irradiada com 10 kGy e a não irradiada é possível destacar o aparecimento de uma banda de absorção com pico em 3320 cm<sup>-1</sup>, referente grupo OH; aumento nas intensidades de absorção dos picos referentes ao grupo CH, entre 2970 cm<sup>-1</sup> e 2850 cm<sup>-1</sup>; diminuição do pico em 1704 cm<sup>-1</sup>, referente ao grupo C=O; aumento da absorção do pico em 1510 cm<sup>-1</sup> referente aos anéis aromáticos; aumento na absorção dos picos característicos em 1222 cm<sup>-1</sup>, 1188 cm<sup>-1</sup> e 1161 cm<sup>-1</sup>, do grupo das ligações C–O; aparecimento de um pico em 1653 cm<sup>-1</sup> e 923 cm<sup>-1</sup> indicando a formação de ligações C=C, possivelmente devido a quebras nas ligações do grupo C–H.

A Figura 19 mostra os espectros das amostras de PC não irradiada e irradiada com 15 kGy.



Figura 19 – Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e Irradiada com 15 kGy Fonte: Autoria própria.

A análise do espectro da amostra irradiada com 15 kGy, mostra que os mesmos picos apresentados no espectro da amostra irradiada com 10 kGy continuam presentes, somente aumentaram suas intensidades de absorção e não houve o aparecimento de novos picos.

A Figura 20 mostra os espectros das amostras de PC não irradiada e irradiada com 20 kGy.



Figura 20 – Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e Irradiada com 20 kGy Fonte: Autoria própria.

A análise do espectro da amostra irradiada com 20 kGy mostra os mesmos picos apresentados no espectro da amostra irradiada com 15 kGy, apresentando diminuição de intensidade de absorção quando comparado com a amostra não irradiada, em todos os grupos identificados.

A Figura 21 mostra os espectros das amostras de PC não irradiada e irradiada com 25 kGy.



Figura 21 – Espectros das Amostras de PC Não Irradiada e Irradiada com 25 kGy Fonte: Autoria própria.

A análise do espectro da amostra irradiada com 25 kGy identifica resultados semelhantes ao espectro da amostra de 20 kGy, com a diminuição das intensidades de absorção em todos os picos identificados.

É possível dizer que em todas as amostras houve o aparecimento de uma larga banda de absorção na região referente ao grupo OH, ocorreu quebras nas ligações C–H e, desta forma, o aparecimento de ligações C=C, diminuição da intensidade de absorção do grupo C=O. Nas amostras irradiadas com 5 kGy, 20 kGy e 25 kGy, houve a diminuição de absorção dos picos referentes aos grupos C–O e C=C de aromáticos. Enquanto que nas amostras com 10 kGy e 15 kGy ocorreu o inverso.

Melo [19] também relatou através da análise por espectrometria de absorção na região do infravermelho que a degradação do PC irradiado com doses de 25 kGy a 125 kGy ocorre devido a cisões nas cadeias no grupo carbonila, provocando a diminuição do peso molecular.

4.1.2. Ângulo de Contato

Os resultados obtidos através da análise do ângulo de contato podem ser vistos na Figura 22.



Figura 22 – Gráfico do Ângulo de Contato em Função das Doses nas Amostras de PC Fonte: Autoria própria.

Assim como nos trabalhos de Subedi [53] e Cho [54], com medidas de ângulos de contato de 70° e 78° respectivamente, valores que caracterizam superfícies hidrofílicas, o valor do ângulo de contato da amostra de policarbonato não irradiada foi de 77,4°.

As medidas das amostras irradiadas indicam a diminuição do ângulo de contato, que resulta em características hidrofílicas superiores à amostra não irradiada. O PC após irradiações até 25 kGy não perde sua característica hidrofílica e continua apto a assepsia [11].

4.1.3 Indentação Instrumentada

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração do PC não irradiado são apresentados nas Figura 23 e 24.



Figura 23 – Curva de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PC Não Irradiado Fonte: Autoria própria.



Figura 24 – Curva de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PC Não ---Irradiado Fonte: Autoria própria.

Observa-se que os valores da dureza e do módulo elástico diminuem com o aumento da profundidade de penetração. O valor da dureza é 0,20 GPa e o módulo elástico é de 3,15 GPa para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 6000 nm, a dureza é 0,16 GPa e o modulo elástico é 2,70 GPa. A dispersão dos valores é maior para profundidades menores, devido à rugosidade da superfície [55].

Amostras de policarbonato não irradiado foram medidas pelo ensaio de indentação instrumentada em diversos estudos. Azevedo [36] relatou a dureza e o módulo elástico de 0,18 GPa e 3,10 GPa, respectivamente.

Bourmaud *et al.* [56] relatou a dureza de 3,20 GPa e o módulo elástico de 0,22 GPa. Beyaoui *et al.* [57] mediram 2,61 GPa e 0,15 GPa.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PC não irradiado e irradiado com 5 kGy são apresentados na Figura 25 e 26.



Figura 25 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy

Fonte: Autoria própria.



Figura 26 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PC Não -Irradiado e Irradiado com 5 kGy

Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 5 kGy o valor da dureza é de 0,22 GPa e o módulo elástico é de 3,44 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 5500 nm, a dureza é 0,18 GPa e o modulo elástico é 3,13 GPa.

Os valores de dureza são maiores na amostra irradiada quando comparado com a amostra não irradiada, possivelmente devido ao entrecruzamento de cadeias.

As dispersões dos valores de dureza são maiores na superfície do material. As dispersões dos valores de módulo elástico, diferentemente da amostra não irradiada, mantêm-se constante em toda a profundidade medida, possivelmente a amostra sofreu tensão provocando aumento de rugosidade.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PC não irradiado e irradiado com 10 kGy são apresentados nas Figuras 27 e 28.



Figura 27 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PC ----Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 28 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 10 kGy o valor da dureza é de 0,23 GPa e o módulo elástico é de 3,30 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 6000 nm, a dureza é 0,15 GPa e o modulo elástico é 2,68 GPa.

Os valores de dureza e módulo elástico foram maiores até a profundidade de 600 nm. Após a profundidade de 1450 nm os valores de dureza e módulo elástico são menores quando comparados com a amostra não irradiada. Possivelmente o material sofreu cisão de cadeias após a irradiação.

As dispersões dos valores também são maiores até a profundidade de 600 nm, possivelmente devido ao aumento da rugosidade.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PC não irradiado e irradiado com 15 kGy são apresentados nas Figuras 29 e 30.



Figura 29 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 30 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 15 kGy o valor da dureza é de 0,28 GPa e o módulo elástico é de 3,79 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 5500 nm, a dureza é 0,19 GPa e o modulo elástico é 3,15 GPa.

Os valores medidos são maiores do que os valores medidos na amostra não irradiada, possivelmente devido ao entrecruzamento de cadeias.

As dispersões dos valores da dureza e do módulo elástico são maiores nas profundidades iniciais, indicando aumento da rugosidade.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PC não irradiado e irradiado com 20 kGy são apresentados nas Figuras 31 e 32.



Figura 31 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 32 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 20 kGy o valor da dureza é de 0,22 GPa e o módulo elástico é de 3,26 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 6000 nm, a dureza é 0,15 GPa e o modulo elástico é 2,68 GPa.

Os valores de dureza e módulo elástico foram maiores até a profundidade de 2000 nm. Após esta profundidade os valores de dureza e módulo de elasticidade são menores quando comparados com a amostra não irradiada, indicando possíveis processos de cisão.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PC não irradiado e irradiado com 25 kGy são apresentados nas Figuras 33 e 34.



Figura 33 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy

Fonte: Autoria própria.



Figura 34 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PC Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 25 kGy o valor da dureza é de 0,23 GPa e o módulo elástico é de 3,18 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 6000 nm, a dureza é 0,16 GPa e o modulo elástico é 2,70 GPa.

Os valores de dureza e módulo elástico foram maiores até a profundidade de 3000 nm. Após esta profundidade os valores de dureza e módulo elástico são semelhantes aos valores da amostra não irradiada, indicando que o material irradiado foi mais afetado na região superficial próxima.

As dispersões dos valores também são maiores nas profundidades iniciais, possivelmente devido ao aumento da rugosidade do material na superfície.

## 4.1.4 Resumo dos Resultados do PC

A Tabela 02 apresenta os resultados dos ensaios realizados nas amostras de PC.

Ensaio	Resultados
Espectrometria de	Indicou a formação de ligações C=C, atribuído a quebras nas ligações do
Infravermelho	grupo C–H. Também é possível identificar cisão das cadeias do grupo carbonila em todas as amostras irradiadas.
Ângulo de Contato	O comportamento hidrofílico tornou-se mais acentuado nas amostras irradiadas.
Indentação	Comparando com a amostra não irradiada, as amostras irradiadas com 5 kGy
Instrumentada	e 15 kGy apresentaram valores maiores de dureza e módulo elástico em toda
	a profundidade medida, possivelmente evidenciando a ocorrência de
	As amostras irradiadas com 10 kGy a 20 kGy aprosentaram valeros majoros
	As amostras inaciacis com 10 kGy e 20 kGy apresentaram valores maiores
	nas profundidades iniciais porem com valores menores com o aumento da
	A amostra irradiada com 25 kCv foi prodominantomento afotada nas regiões
	A amostra inaciada com 25 kGy foi predominantemente aletada has regiões
	mais proximas da supernole.

## Tabela 02 - Resultados dos ensaios realizados nas amostras de PC

Fonte: Autoria Própria

## 4.2 POLIMETILMETACRILATO (PMMA)

Os resultados dos ensaios de espectrometria de absorção na região do infravermelho, ângulo de contato e indentação instrumentada realizados nas amostras de PMMA irradiadas e não irradiada e as discussões destes resultados estão apresentados a seguir.

4.2.1 Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho





Figura 35 – Espectro da amostra de PMMA não irradiada Fonte: Autoria própria.

É possível identificar um pico intenso em 1727 cm<sup>-1</sup>, referente ao grupo carbonila C=O, os estiramentos do grupo C–O são visíveis em 3 picos em 1253 cm<sup>-1</sup>, 1189 cm<sup>-1</sup> e um mais forte em 1142 cm<sup>-1</sup>. Estiramentos simétricos e assimétricos do grupo CH são visíveis em 3 picos fracos entre 3050 cm<sup>-1</sup> e 2830 cm<sup>-1</sup>.

A Figura 36 mostra os espectros das amostras de PMMA não irradiada e irradiada com 5 kGy.



Figura 36 – Espectros das Amostras de PMMA Não Irradiada e Irradiada com 5 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com o espectro da amostra não irradiada é possível identificar o aparecimento de uma banda de absorção com pico em 3331 cm<sup>-1</sup>, referente grupo OH. Não houve aumento ou diminuição significativos da intensidade dos picos característicos apresentados no espectro, indicando que não ocorreram alterações significativas no material para a dose de 5 kGy.

A Figura 37 mostra os espectros das amostras de PMMA não irradiada e irradiada com 10 kGy.



Figura 37 – Espectros das Amostras de PMMA Não Irradiada e Irradiada com 10 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com o espectro da amostra não irradiada é possível identificar o aparecimento de uma banda de absorção com pico em 3331 cm<sup>-1</sup>, referente grupo OH. Não houve aumento ou diminuição significativos da intensidade dos picos característicos apresentados no espectro, indicando que não ocorreram alterações significativas no material para a dose de 10 kGy.

A Figura 38 mostra os espectros das amostras de PMMA não irradiada e irradiada com 15 kGy.



Figura 38 – Espectros das Amostras de PMMA Não Irradiada e Irradiada com 15 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com o espectro da amostra não irradiada é possível identificar o aparecimento de uma banda de absorção com pico em 3331 cm<sup>-1</sup>, referente grupo OH. Não houve aumento ou diminuição significativos da intensidade dos picos característicos apresentados no espectro, indicando que não ocorreram alterações significativas no material para a dose de 15 kGy

A Figura 39 mostra os espectros das amostras de PMMA não irradiada e irradiada com 20 kGy.



Figura 39 – Espectros das Amostras de PMMA não Irradiada e Irradiada com 20 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com o espectro da amostra não irradiada é possível identificar o aparecimento de uma banda de absorção com pico em 3331 cm<sup>-1</sup>, referente grupo OH. Não houve aumento ou diminuição significativos da intensidade dos picos característicos apresentados no espectro, indicando que não ocorreram alterações significativas no material para a dose de 20 kGy.

A Figura 40 mostra os espectros das amostras de PMMA não irradiada e irradiada com 25 kGy.



Figura 40 – Espectros das Amostras de PMMA Não Irradiada e Irradiada com 25 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com os espectros das amostras irradiadas foi possível identificar o aparecimento de uma banda de absorção com pico em 3331 cm<sup>-1</sup>, referente grupo OH. Os picos referentes ao grupo carbonila apresentaram um aumento de 2% na intensidade de absorção, porém o restante das informações presentes nos espectros, indicando que não ocorreram alterações significativas no material para a dose de 25 kGy.

É possível dizer que todas as amostras irradiadas não apresentaram alterações significativas na faixa de dose estudada. Somente houve o aparecimento de uma banda de absorção com pico em 3331 cm<sup>-1</sup>, indicação da ocorrência de processos oxidativos [49].

Aquino [58] relatou que doses de esterilização de 25 kGy causam cisão da cadeia principal e quebra das ligações do grupo metila em amostras de PMMA.

4.2.2. Ângulo de Contato

Os resultados obtidos através da análise do ângulo de contato podem ser vistos na Figura 41.



Figura 41 – Gráfico do Ângulo de Contato em Função das Doses nas Amostras de PMMA Fonte: Autoria própria.

Assim como nos trabalhos de Schneider [41] e Padilha *et al.* [59], com medidas de ângulos de contato de 84,5° e 74,0° respectivamente, valores que caracterizam superfícies hidrofílicas, o valor medido do ângulo de contato da amostra de PMMA não irradiada foi de 75,9°.

As medidas das amostras irradiadas indicam a diminuição do ângulo de contato, que resulta em características hidrofílicas superiores à amostra não irradiada. O PMMA, após irradiações até 25 kGy não perde sua característica hidrofílica e continua apto a assepsia [11].

4.2.3 Indentação Instrumentada

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração do PC não irradiado são apresentados nas Figura 42 e 43.



Figura 42 – Curva de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado

Fonte: Autoria própria.



Figura 43 – Curva de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado Fonte: Autoria própria.

O valor da dureza é de 0,25 GPa na profundidade de 400 nm e os valores diminuem para 0,22 GPa em 5000 nm. O valor do módulo elástico é de 4,04 GPa na profundidade de penetração de 200 nm e diminui até 3,79 GPa em 5000 nm.

As dispersões dos valores de dureza são maiores nas profundidades iniciais, devido à rugosidade da superfície. As dispersões dos valores de módulo elásticas mantêm valores próximos em toda a profundidade estudada.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PMMA não irradiado e irradiado com 5 kGy são apresentados na Figura 44 e 45.



Figura 44 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 45 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 5 kGy o valor da dureza é de 0,25 GPa e o módulo elástico é de 4,20 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 5000 nm, a dureza é 0,22 GPa e o modulo elástico é 3,82 GPa.

Os valores de dureza medidos são menores do que os valores medidos na amostra não irradiada, indicando possíveis processos de cisão de cadeias. Os valores de módulo elástico até a profundidade de 2500 nm são menores, porém após esta profundidade é constado um aumento nos valores.

As dispersões dos valores de dureza e módulo elástico apresentaram mudanças significativas somente na superfície do material e indicando alterações nessa região.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PMMA não irradiado e irradiado com 10 kGy são apresentados nas Figuras 46 e 47.



Figura 46 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 47 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de ---Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 10 kGy o valor da dureza é de 0,26 GPa e o módulo elástico é de 4,13 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 5000 nm, a dureza é 0,22 GPa e o modulo elástico é 3,84 GPa.

Os valores de dureza medidos são maiores do que os valores medidos na amostra não irradiada até a profundidade de penetração de 400 nm, porém tornamse menores na continuidade da penetração, indicando possíveis processos de cisão de cadeias. Da mesma forma os valores de módulo elástico são menores até a profundidade de 2500 nm, porém após esta profundidade é constatado o aumento dos valores.

As dispersões dos valores de dureza e módulo elástico são maiores na superfície do material, indicando aumento de rugosidade.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PMMA não irradiado e irradiado com 15 kGy são apresentados nas Figuras 48 e 49.



Figura 48 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 49 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 15 kGy o valor da dureza é de 0,27 GPa e o módulo elástico é de 4,21 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 5000 nm, a dureza é 0,21 GPa e o modulo elástico é 3,81 GPa.

Os valores de dureza medidos são maiores do que os valores medidos na amostra não irradiada até a profundidade de penetração de 400 nm, e tornam-se menores após esta profundidade. Os valores de módulo elástico, comparados com a amostra não irradiada, são maiores até 1250 nm de profundidade de penetração.

As dispersões dos valores de dureza e módulo elástico são maiores na superfície do material, indicando aumento de rugosidade.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PMMA não irradiado e irradiado com 20 kGy são apresentados nas Figuras 50 e 51.



Figura 50 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 51 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy Fonte: Autoria própria.

A amostra irradiada com 20 kGy tem o valor da dureza de 0,25 GPa e o módulo elástico de 4,05 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 5000 nm, a dureza é 0,21 GPa e o modulo elástico é 3,76 GPa.

Os valores de dureza medidos são semelhantes aos valores medidos na amostra não irradiada até a profundidade de penetração de 2500 nm, quando passam a ser menores. Os valores de módulo elástico, comparados com a amostra não irradiada, são maiores até 1250 nm de profundidade de penetração.

As dispersões dos valores de dureza são maiores na superfície do material, indicando que a superfície está rugosa. Nos valores de módulo elástico, as dispersões permanecem semelhantes a amostra não irradiada.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PMMA não irradiado e irradiado com 25 kGy são apresentados nas Figuras 52 e 53.



Figura 52 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 53 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PMMA Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy Fonte: Autoria própria.

A amostra irradiada com 25 kGy tem o valor da dureza de 0,26 GPa e o módulo elástico de 4,17 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 5000 nm, a dureza é 0,22 GPa e o modulo elástico é 3,87 GPa.

Os valores de dureza e módulo elástico são maiores do que os valores medidos na amostra não irradiada em toda profundidade de penetração estudada, indicando possíveis entrecruzamento de cadeias, podendo fragilizar o material. As dispersões dos valores são maiores na superfície do material, indicando que a superfície está rugosa.

4.2.4 Resumo dos Resultados do PMMA

A Tabela 03 apresenta os resultados dos ensaios realizados nas amostras de PMMA.

Ensaio	Resultados
Espectrometria de	Indicou a formação de uma banda de absorção com pico em 3331 cm <sup>-1</sup> em
Infravermelho	todos os espectros de amostras irradiadas, atribuído ao grupo O–H, relacionado com processos oxidativos.
Ângulo de Contato	O comportamento hidrofílico tornou-se mais acentuado nas amostras
	irradiadas.
Indentação	Comparando com a amostra não irradiada, as amostras irradiadas com 5
Instrumentada	kGy, 10 kGy, 15 kGy e 20 kGy apresentaram valores de dureza e módulo elástico maiores na superfície e menores com o aumento da profundidade,
	indicando que a superfície foi a parte mais afetada com essas doses. Os
	possíveis processos oxidativos constatados com a espectrometria de
	infravermelho podem estar relacionados com esse aumento da dureza e
	módulo elástico nas regiões mais superficiais do material.
	A amostra irradiada com 25 kGy apresentou valores maiores em toda a
	profundidade de penetração, evidenciando que o material possivelmente
	sofreu processos de entrecruzamento de cadeias.

## Tabela 03 – Resultados dos ensaios realizados nas amostras de PMMA

Os resultados dos ensaios de espectrometria de absorção na região do infravermelho, ângulo de contato e indentação instrumentada realizados nas amostras de PP irradiadas e não irradiada e as discussões destes resultados estão apresentados a seguir.

4.3.1 Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho

A Figura 54 mostra o espectro da amostra de PP não irradiada.



Figura 54 – Espectro da Amostra de PP Não Irradiada Fonte: Autoria própria.

É possível identificar os picos característicos do PP referentes aos estiramentos simétricos e assimétricos do grupo C–H entre 2870 cm<sup>-1</sup> e 2950 cm<sup>-1</sup>, e às deformações simétricas e assimétricas, também do grupo C–H, nos picos 1455 cm<sup>-1</sup> e 1372 cm<sup>-1</sup>.

A Figura 55 mostra os espectros das amostras de PP não irradiada e irradiada com 5 kGy.



Figura 55 – Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e Irradiada com 5 kGy Fonte: Autoria própria.

Quando comparado com o espectro da amostra irradiada com 5 kGy é possível destacar o aparecimento de uma banda de absorção com pico 3336 cm<sup>-1</sup>, referente grupo O–H; aparecimento de um pico de baixa intensidade na região de 1647 cm<sup>-1</sup> e outros picos na região entre 1164 cm<sup>-1</sup> e 926 cm<sup>-1</sup> atribuídos à deformações axiais nas ligações do grupo C=C, possivelmente devido à quebra de ligações terminais, que favorecem a formação deste grupo; aumento da intensidade de absorção nos picos em 1455 cm<sup>-1</sup> e 1372 cm<sup>-1</sup> referentes ao grupo C–H.

A Figura 56 mostra os espectros das amostras de PP não irradiada e irradiada com 10 kGy.



Figura 56 – Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e Irradiada com 10 kGy Fonte: Autoria própria.

A análise do espectro da amostra irradiada com 10 kGy, mostra que os mesmos picos apresentados no espectro da amostra irradiada com 5 kGy continuam presentes, somente aumentaram suas intensidades de absorção e sem o aparecimento de novos picos.
A Figura 57 mostra os espectros das amostras de PP não irradiada e irradiada com 15 kGy.



Figura 57 – Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e Irradiada com 15 kGy Fonte: Autoria própria.

A análise do espectro da amostra irradiada com 15 kGy, mostra que os mesmos picos apresentados no espectro da amostra irradiada com 10 kGy continuam presentes, somente aumentaram suas intensidades de absorção e sem o aparecimento de novos picos.

A Figura 58 mostra os espectros das amostras de PP não irradiada e irradiada com 20 kGy.



Figura 58 – Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e Irradiada com 20 kGy Fonte: Autoria própria.

A análise do espectro da amostra irradiada com 20 kGy, mostra que os mesmos picos apresentados no espectro da amostra irradiada com 15 kGy continuam presentes, somente aumentaram suas intensidades de absorção e sem o aparecimento de novos picos.

A Figura 59 mostra os espectros das amostras de PP não irradiada e irradiada com 25 kGy.



Figura 59 – Espectros das Amostras de PP Não Irradiada e Irradiada com 25 kGy Fonte: Autoria própria.

A análise do espectro da amostra irradiada com 25 kGy, mostra que os mesmos picos apresentados no espectro da amostra irradiada com 20 kGy continuam presentes, somente aumentaram suas intensidades de absorção e sem o aparecimento de novos picos.

Sinha [60], estudou efeitos de doses na ordem de 100 kGy e da mesma forma identificou o aparecimento da banda atribuída aos estiramentos do grupo O–H e relatou a formação de picos de absorção atribuídos ao grupo C=O.

### 4.3.2. Ângulo de Contato

Os resultados obtidos através da análise do ângulo de contato podem ser vistos na Figura 60.



Figura 60 – Gráfico do Ângulo de Contato em Função das Doses nas Amostras de PP Fonte: Autoria própria.

Assim como nos trabalhos de Schneider *et al*. [41] e Campos *et al*. [61], com medidas de ângulos de contato de 75° e 89° respectivamente, valores que caracterizam superfícies hidrofílicas, o valor do ângulo de contato da amostra de PP não irradiada foi de 82,1°.

As medidas das amostras irradiadas indicam a diminuição do ângulo de contato, que resulta em características hidrofílicas superiores à amostra não irradiada. O PP, após irradiações até 25 kGy não perde sua característica hidrofílica e continua apto a assepsia [11].

#### 4.3.3 Indentação Instrumentada

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração do PP não irradiado são apresentados nas Figura 61 e 62.



Figura 61 – Curva de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado

Fonte: Autoria própria.



Figura 62 – Curva de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que os valores da dureza e do módulo elástico diminuem com o aumento da profundidade de penetração. O valor da dureza é 0,068 GPa e o módulo elástico é de 1,268 GPa para a profundidade de penetração de 370 nm. Na profundidade de 9100 nm, a dureza é 0,066 GPa e o modulo elástico é 1,237 GPa. A dispersão dos valores é maior para profundidades menores, devido à rugosidade da superfície.

Amostras de PP não irradiado foram medidas pelo ensaio de indentação instrumentada em diversos estudos. Azevedo *et al.* [47] relatou a dureza e o módulo elástico em 0,09 GPa e 1,80 GPa, respectivamente. Ahmeda *et al.* [62] mediram dureza de 0,11 GPa e módulo elástico de 1,75 GPa.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PP não irradiado e irradiado com 5 kGy são apresentados na Figura 63 e 64.



Figura 63 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 64 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 5 kGy o valor da dureza é de 0,048 GPa e o módulo elástico é de 0,922 GPa, para a profundidade de penetração de 440 nm. Na profundidade de 7600 nm a dureza é 0,047 GPa e o modulo elástico é 1,011 GPa.

Os valores medidos são menores do que os valores medidos na amostra não irradiada, o que indica possíveis processos de cisão de cadeias. Após 2000 nm os valores são maiores do que nas profundidades iniciais, porém continuam menores quando comparados com a amostra não irradiada.

As dispersões dos valores de dureza e módulo elástico também são menores quando comparadas com a amostra irradiada.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PP não irradiado e irradiado com 10 kGy são apresentados nas Figuras 65 e 66.



Figura 65 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy

Fonte: Autoria própria.



Figura 66 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 10 kGy o valor da dureza é de 0,053 GPa e o módulo elástico é de 1,048 GPa, para a profundidade de penetração de 440 nm. Na profundidade de 7600 nm a dureza é 0,051 GPa e o modulo elástico é 1,078 GPa.

Os valores medidos são menores do que os valores medidos na amostra não irradiada, o que indica possíveis processos de cisão de cadeias. Após 2000 nm os valores são maiores do que nas profundidades iniciais, porém continuam menores quando comparados com a amostra não irradiada.

Após 2000 nm os valores são maiores do que nas profundidades iniciais, porém continuam menores quando comparados com a amostra não irradiada.

As dispersões dos valores de dureza e módulo elástico também são menores quando comparadas com a amostra irradiada.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PP não irradiado e irradiado com 15 kGy são apresentados nas Figuras 67 e 68.



Figura 67 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração -do PP Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 68 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de -Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 15 kGy o valor da dureza é de 0,076 GPa e o módulo elástico é de 1,302 GPa, para a profundidade de penetração de 440 nm. Na profundidade de 9500 nm a dureza é 0,062 GPa e o modulo elástico é 1,166 GPa.

A amostra irradiada tem valores iniciais de dureza e módulo elástico maiores do que os valores medidos na amostra não irradiada, porém após 800 nm de profundidade os valores são menores o que indica que esta dose induziu possíveis entrecruzamentos de cadeias na superfície do material. As barras de dispersão das medidas iniciais indicam uma superfície com aumento de rugosidade. Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PP não irradiado e irradiado com 20 kGy são apresentados nas Figuras 69 e 70.



Figura 69 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 70 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 20 kGy o valor da dureza é de 0,070 GPa e o módulo elástico é de 1,219 GPa, para a profundidade de penetração de 700 nm. Na profundidade de 9500 nm a dureza é 0,062 GPa e o modulo elástico é 1,161 GPa.

A amostra irradiada tem valor inicial de dureza maior do que o valor medido na amostra não irradiada, porém após 1550 nm de profundidade os valores são menores.

Os valores de módulo elástico são menores quando comparado com a amostra não irradiada após 700 nm.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PP não irradiado e irradiado com 25 kGy são apresentados nas Figuras 71 e 72.



Figura 71 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 72 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PP Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 25 kGy o valor da dureza é de 0,077 GPa e o módulo elástico é de 1,440 GPa, para a profundidade de penetração de 350 nm. Na profundidade de 9000 nm, a dureza é 0,069 GPa e o modulo elástico é 1,297 GPa.

Os valores medidos são maiores do que os valores medidos na amostra não irradiada, possivelmente devido ao entrecruzamento de cadeias em toda a profundidade estudada.

As dispersões dos valores da dureza e do módulo elástico são maiores nas profundidades iniciais, indicando aumento de rugosidade do material.

### 4.3.4 Análise Termogravimétrica



A Figura 73 mostra a curva TG/DTG da amostra de PP não irradiada.

Figura 73 – Curva TG/DTG da amostra de PP não irradiada Fonte: Autoria própria.

A amostra de PP não irradiada mostra-se sem perda de massa até a temperatura de 208 °C. A partir desta temperatura, onde começa uma única etapa de decomposição até 400 °C, apresenta perda de massa de 96,7% da massa inicial. Em seguida há perda de 2,6% de massa até a temperatura de 540 °C.

A Figura 74 mostra a sobreposição das curvas TG das amostras de PP irradiada e não irradiada.



Figura 74 – Sobreposição das curvas TG das amostras de PP irradiada e não irradiada Fonte: Autoria própria.

Em todas as amostras irradiadas não foram observadas mudanças significativas, tanto na temperatura inicial de perda de massa de aproximadamente 208 °C, assim como o final do evento térmico de perda aproximada de 97% na temperatura de 400 °C e a temperatura final de degradação próxima de 540 °C. Isto mostra que a interação da radiação gama, até a dose de 25 kGy, com o PP não provoca alterações no comportamento térmico de degradação em função da temperatura.

A Tabela 04 apresenta os resultados dos ensaios realizados nas amostras de PP.

## Tabela 04 – Resultados dos ensaios realizados nas amostras de PP

Ensaio	Resultados
Espectrometria de	Indicou em todos os espectros de amostras irradiadas a formação de uma
Infravermelho	banda de absorção com pico em 3336 cm <sup>-1</sup> atribuído ao grupo O-H e
	relacionado com processos oxidativos. Houve também o surgimento de um
	pico de baixa intensidade na região de 1647 cm-1 e outros na região entre
	1164 cm <sup>-1</sup> e 926 cm <sup>-1</sup> evidenciando deformações axiais nas ligações do grupo
	C=C.
Ângulo de Contato	O comportamento hidrofílico tornou-se mais acentuado nas amostras
	irradiadas.
Indentação	Comparando com a amostra não irradiada, as amostras irradiadas com 5 kGy
Instrumentada	e 10 kGy apresentaram valores de dureza e módulo elástico menores, porém
	com o aumento destes valores ao longo da profundidade de penetração.
	As amostras irradiadas com 15 kGy e 20 kGy apresentaram valores iniciais
	de dureza e módulo elástico maiores do que a amostra não irradiada, porém
	ao longo na profundidade de penetração os valores tornaram-se menores.
	A amostra irradiada com 25 kGy apresentou valores de dureza e módulo
	elástico maiores que a amostra não irradiada, indicando o entrecruzamento
	das cadeias.
TGA	Não houve alterações nas propriedades de degradação térmica das amostras
	irradiadas, dentro da faixa de dose estudada, quando comparada com a
	amostra não irradiada.

Fonte: Autoria Própria

4.4 COMPÓSITO DE POLIURETANA DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA COM JUTA (PU-JUTA)

Os resultados dos ensaios de espectrometria de absorção na região do infravermelho, ângulo de contato e indentação instrumentada realizados nas amostras de PU-Juta irradiadas e não irradiada e as discussões destes resultados estão apresentados a seguir.

4.4.1 Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho

A Figura 75 mostra o espectro da amostra de PU-Juta não irradiada.



Figura 75 – Espectro da Amostra de PU-Juta Não Irradiada Fonte: Autoria própria.

É possível observar uma banda de absorção com pico em 3322 cm<sup>-1</sup> e outro pico em 1520 cm<sup>-1</sup> referentes aos estiramentos N–H; os picos atribuídos aos estiramentos do grupo C–H podem ser vistos em 2913 cm<sup>-1</sup> e 2849 cm<sup>-1</sup>; observa-se outro pico em 1710 cm<sup>-1</sup> indicando o grupo C=O; um pico em 1216 cm<sup>-1</sup> atribuído aos estiramentos de N–C, e em 1040 cm<sup>-1</sup> dos estiramentos do grupo C–O.

A Figura 76 mostra os espectros das amostras de PU-Juta não irradiada e irradiada com 5 kGy.



Figura 76 – Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e Irradiada com 5 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com o espectro da amostras irradiada é possível identificar o aparecimento de uma banda de absorção com pico em 3322 cm<sup>-1</sup> e um novo pico em 913 cm<sup>-1</sup>, ambos referentes ao grupo O–H, atribuídos a processos oxidativos. Esta nova banda de absorção sobrepõe a banda de absorção identificada anteriormente e atribuída aos estiramentos do grupo N–H, porém o outro pico em 1520 cm-1, também atribuído a este grupo, aumentou sua intensidade de absorção.

Os mesmo picos identificados no espectro da amostra não irradiada apresentaram aumento das suas intensidades de absorção no espectro da amostra irradiada com 5 kGy, indicando que para esta dose houve alterações na amostra.

A Figura 77 mostra os espectros das amostras de PU-Juta não irradiada e irradiada com 10 kGy.



Figura 77 – Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e Irradiada com 10 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com o espectro da amostras irradiada também é possível identificar o aparecimento da banda de absorção com pico em 3335 cm<sup>-1</sup>, sobrepondo a banda referente ao grupo N–H, e do pico em 913 cm<sup>-1</sup>, ambos referentes ao grupo OH. Os mesmo picos identificados no espectro da amostra não irradiada apresentaram aumento das suas intensidades de absorção no espectro da amostra irradiada com 10 kGy, indicando que para esta dose houve alterações na amostra.

A Figura 78 mostra os espectros das amostras de PU-Juta não irradiada e irradiada com 15 kGy.



Figura 78 – Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e Irradiada com 15 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com o espectro da amostras irradiada também é possível identificar o aparecimento da banda de absorção com pico em 3335 cm<sup>-1</sup>, sobrepondo a banda referente ao grupo N–H, e do pico em 913 cm<sup>-1</sup>, ambos referentes ao grupo OH. Os mesmo picos identificados no espectro da amostra não irradiada apresentaram aumento das suas intensidades de absorção no espectro da amostra irradiada com 15 kGy, indicando que para esta dose houve alterações na amostra.

A Figura 79 mostra os espectros das amostras de PU-Juta não irradiada e irradiada com 20 kGy.



Figura 79 – Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e Irradiada com 20 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com o espectro da amostras irradiada também é possível identificar o aparecimento da banda de absorção com pico em 3335 cm<sup>-1</sup>, sobrepondo os picos referentes ao grupo N–H, e do pico em 913 cm<sup>-1</sup>, ambos referentes ao grupo OH. Os mesmo picos identificados no espectro da amostra não irradiada apresentaram aumento das suas intensidades de absorção no espectro da amostra irradiada com 20 kGy, indicando que para esta dose houve alterações na amostra.

A Figura 80 mostra os espectros das amostras de PU-Juta não irradiada e irradiada com 25 kGy.



Figura 80 – Espectros das Amostras de PU-Juta Não Irradiada e Irradiada com 25 kGy Fonte: Autoria própria.

Na comparação com o espectro da amostras irradiada também é possível identificar o aparecimento da banda de absorção com pico em 3335 cm<sup>-1</sup>, sobrepondo a banda referente ao grupo N–H, e do pico em 913 cm<sup>-1</sup>, ambos referentes ao grupo OH. Os mesmo picos identificados no espectro da amostra não irradiada apresentaram aumento das suas intensidades de absorção no espectro da amostra irradiada com 10 kGy, indicando que para esta dose houve alterações na amostra.

Os resultados obtidos através da análise do ângulo de contato podem ser vistos na Figura 81.



Figura 81 – Gráfico do Ângulo de Contato em Função das Doses nas Amostras de PU-Juta Fonte: Autoria própria.

O ângulo de contato da amostra não irradiada foi de 78,1°, caracterizando uma superfície hidrofílica. As medidas das amostras irradiadas indicam a diminuição do ângulo de contato, que resulta em características hidrofílicas superiores à amostra não irradiada. Conclui-se que o compósito PU-Juta, após irradiações até 25 kGy, não perde sua característica hidrofílica e continua apto a assepsia [11].

Silva Junior *et al.* [63] determinaram uma superfície hidrofóbica em amostras de PU à base de óleo de mamona, medindo ângulo de 92°. Azevedo [36] mediu ângulo de 88,0° em amostra de adesivo de PU à base de mamona.

#### 4.4.3 Indentação Instrumentada

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração do PU-Juta não irradiado são apresentados nas Figura 82 e 83.



Figura 82 – Curva de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado

Fonte: Autoria própria.



Figura 83 – Curva de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que os valores da dureza e do módulo elástico diminuem com o aumento da profundidade de penetração. O valor da dureza é 0,15 GPa e o módulo elástico é de 2,39 GPa para a profundidade de penetração de 250 nm. Na profundidade de 7300 nm, a dureza é 0,11 GPa e o modulo elástico é 1,68 GPa.

A dispersão dos valores da dureza é maior para profundidades iniciais, devido à rugosidade da superfície. Para o módulo elástico, a dispersão dos valores aumenta quanto maior a profundidade de penetração.

Azevedo *et al.* [47] relataram a dureza e o módulo elástico de 0,14 GPa e 2,5 GPa, respectivamente. Silva [34] relatou o módulo elástico de 3,0 GPa para o compósito de PU-Sisal.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PU-Juta não irradiado e irradiado com 5 kGy são apresentados na Figura 84 e 85.



Figura 84 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 85 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 5 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 5 kGy o valor da dureza é de 0,06 GPa e o módulo elástico é de 1,58 GPa, para a profundidade de penetração de 350 nm. Na profundidade de 7800 nm, a dureza é 0,09 GPa e o modulo elástico é 1,75 GPa.

Os valores de dureza medidos são menores do que os valores medidos na amostra não irradiada, indicando possíveis processos de cisão de cadeias. Com o aumento da profundidade, os valores aumentam, porém continuam menores quando comparados com a amostra não irradiada. Os valores de módulo elástico são menores até a profundidade de 4000 nm, após está profundidade os valores são próximos dos obtidos a partir da amostra não irradiada. Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PU-Juta não irradiado e irradiado com 10 kGy são apresentados nas Figuras 86 e 87.



Figura 86 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração -do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 87 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 10 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 10 kGy o valor da dureza é de 0,11 GPa e o módulo elástico é de 1,94 GPa, para a profundidade de penetração de 300 nm. Na profundidade de 7500 nm, a dureza é 0,09 GPa e o modulo elástico é 1,86 GPa.

Os valores de dureza medidos são menores do que os valores medidos na amostra não irradiada, possivelmente devido à cisão de cadeias. Os valores de módulo elástico são menores até a profundidade de 3500 nm, após está profundidade os valores são maiores quando comparado com a amostra irradiada.

Diferentemente da amostra não irradiada, as dispersões dos valores de dureza e módulo elástico não apresentaram alterações significativas.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PU-Juta não irradiado e irradiado com 15 kGy são apresentados nas Figuras 88 e 89.



Figura 88 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 89 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 15 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 15 kGy o valor da dureza é de 0,07 GPa e o módulo elástico é de 1,50 GPa, para a profundidade de penetração de 350 nm. Na profundidade de 8000 nm, a dureza é 0,08 GPa e o modulo elástico é 1,75 GPa.

Os valores de dureza medidos são menores do que os valores medidos na amostra não irradiada, possivelmente devido à cisão de cadeias. Com o aumento da profundidade, os valores aumentam, porém continuam menores quando comparados com a amostra não irradiada. Os valores de módulo elástico são menores até a profundidade de 4000 nm, após está profundidade os valores são próximos aos obtidos a partir da amostra não irradiada. Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PU-Juta não irradiado e irradiado com 20 kGy são apresentados nas Figuras 90 e 91.



Figura 90 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 91 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 20 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 20 kGy o valor da dureza é de 0,27 GPa e o módulo elástico é de 4,18 GPa, para a profundidade de penetração de 200 nm. Na profundidade de 5000 nm, a dureza é 0,21 GPa e o modulo elástico é 3,76 GPa.

Os valores de dureza e módulo elástico medidos são maiores do que os valores medidos na amostra não irradiada, possivelmente devido ao entrecruzamento de cadeias. Com o aumento da profundidade esses valores diminuem, porém continuam maiores que os valores da amostra não irradiada.

As dispersões dos valores de dureza e módulo elástico não apresentaram alterações significativas durante a penetração.

Os gráficos de dureza e módulo elástico em função da profundidade de penetração para o PU-Juta não irradiado e irradiado com 25 kGy são apresentados nas Figuras 92 e 93.



Figura 92 – Curvas de Dureza em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy Fonte: Autoria própria.



Figura 93 – Curvas de Módulo Elástico em Função da Profundidade de Penetração do PU-Juta Não Irradiado e Irradiado com 25 kGy Fonte: Autoria própria.

Na amostra irradiada com 25 kGy o valor da dureza é de 0,08 GPa e o módulo elástico é de 1,51 GPa, para a profundidade de penetração de 350 nm. Na profundidade de 7300 nm, a dureza é 0,10 GPa e o modulo elástico é 1,97 GPa.

Os valores de dureza medidos são menores do que os valores medidos na amostra não irradiada. Com o aumento da profundidade, os valores aumentam, porém continuam menores quando comparados com a amostra não irradiada. Os valores de módulo elástico são menores até a profundidade de 3000 nm, após está profundidade os valores são maiores quando comparados com a amostra não irradiada.

# 4.4.4 Resumo dos Resultados do PU-Juta

A Tabela 05 apresenta os resultados dos ensaios realizados nas amostras de PU-Juta.

## Tabela 05 – Resultados dos ensaios realizados nas amostras de PU-Juta

Ensaio	Resultados
Espectrometria de	Indicou em todos os espectros de amostras irradiadas a formação de uma
Infravermelho	banda de absorção com pico em 3335 cm <sup>-1</sup> e um outro pico em 913 cm <sup>-1</sup> ,
	ambos atribuídos ao grupo O–H e relacionado com processos oxidativos.
	Houve, também para todas as doses estudadas, o aumento de intensidade
	de absorção de todos os picos presentes no espectro da amostra não
	irradiada.
Ângulo de Contato	O comportamento hidrofílico tornou-se mais acentuado nas amostras
	irradiadas.
Indentação	Comparando com a amostra não irradiada, as amostras irradiadas com 5
Instrumentada	kGy, 15 kGy e 25 kGy apresentaram valores de dureza menores, porém com
	o aumento destes valores ao longo da profundidade de penetração. O
	módulo elástico inicial é menor. Porém após a profundidade de 4000 nm,
	tornam-se maiores que a amostra não irradiada.
	A amostra irradiada com 10 kGy também apresentou valores menores de
	dureza, porém os valores diminuíram ao longo da profundidade. O módulo
	elástico iniciou com valor menor, porém apresentou valores maiores após a
	profundidade de 4000 nm.
	A amostra irradiada com 20 kGy apresentou valores maiores tanto para
	dureza como para o módulo elástico em toda a profundidade estudada.
	Indicando a possibilidade de entrecruzamento das cadeias.

Fonte: Autoria Própria

### **5 CONCLUSÃO**

Este trabalho avaliou os efeitos da radiação gama nos polímeros com exposição a doses normalmente praticadas em serviços de radioterapia, de forma a simular sua utilização na rotina comum dos serviços.

O PC apresentou alterações em baixas doses de radiação. A análise de ângulo de contato mostrou que a superfície continua hidrofílica, facilitando a assepsia, porém com dose de 5 kGy foi constatado o aumento na dureza e no módulo elástico, possivelmente por entrecruzamento de cadeias, fragilizando o material e podendo diminuir seu tempo de vida útil. A espectrometria por infravermelho detectou quebra de ligações em todas as doses, o que pode causar a eliminação de compostos voláteis nocivos.

O PMMA mostrou-se adequado para utilização em serviços de radioterapia. A análise do ângulo de contato mostrou que a característica hidrofílica do material foi acentuada, facilitando a assepsia. A indentação instrumentada identificou indícios de entrecruzamento de cadeias somente com a dose de 25 kGy. A desvantagem encontrada foi com a espectrometria por infravermelho que detectou quebra de ligações em todas as amostras irradiadas, o que pode causar a eliminação de compostos voláteis nocivos.

O PP também se mostrou como alternativa para utilização em ambientes com exposição à radiação gama, porém com um tempo de vida útil menor do que o PMMA. O ângulo de contato mostrou que a superfície permanece hidrofílica, facilitando a assepsia, porém a indentação instrumentada identificou indícios de fragilidade com dose de 15 kGy, devido aos possíveis entrecruzamento de cadeia. O infravermelho identificou processos oxidativos superficiais e a análise térmica não constatou alterações em propriedades térmicas na faixa de dose estudada.

O PU-Juta mostrou ser uma alternativa como substituição de outros polímeros em serviços de radioterapia. O ângulo de contato mostrou que a superfície continua hidrofílica, garantindo sua assepsia. Apresentou aumento na dureza e no módulo elástico com dose de 20 kGy, tornando-o mais frágil e diminuindo sua vida útil, entretanto, por não conter compostos voláteis nocivos em sua composição, justifica-se sua utilização mesmo com menor tempo de durabilidade que o PMMA, que apresentou indícios de fragilidade com 25 kGy.

# 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar a possível existência de microtrincas nas amostras irradiadas com a faixa de dose estudada.
- Realização dos ensaios nas amostras após irradiações com doses acumulativas, ou seja, irradia-se a amostra com 5 kGy e realizam-se os ensaios, após este passo irradia-se a mesma amostra com mais 5 kGy e realizam-se os mesmo ensaios a fim de estudar o comparativo dos resultados das diferentes doses.
- Realização do ensaio de TGA nas amostras de PC, PMMA e PU-Juta irradiadas com a faixa de dose utilizada neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

1 CANEVAROLO, Sebastião V. Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Editora Artliber, 2006.

2 LOCH, C. P; LIMA, M. F. S., **Estudo da degradação dos imobilizadores utilizados em pacientes submetidos à radioterapia de cabeça e pescoço**. Matéria (Rio J.), vol. 15, n. 3, Rio de Janeiro, 2010.

3 SCAFF, Luiz A. Física da Radioterapia. São Paulo: Editora Savier, 1997.

4 CHARLESBY, Arthur. Atomic Radiation and Polymer. London: Editora Pergamom, 1960.

5 KIRCHER, John F.; BOWMAN, Richard E. **Effects of Radiation on Materials and Components**. New York: Editora Reinholds, 1964.

6 SCHNABEL, Wolfram. **Polymer Degradation - Principles and Practical Applications**. Munich: Ed. Hanser International, 1981.

7 INTERNACIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **Pressrelease 153**, 2004.

8 AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução 176, 2000.

9 SILVERSTEIN, Robert M.; WEBSTER, Francis X.; KIEMLE, David J. **Spectrometric Identification of Organic Compounds**, 7 ed. New Jersey: Ed. Wiley, 2005.

10 STAMM, Manfred. **Polymer Surfaces and Interfaces:** Characterization, Modification and Applications. New York: Springer, 2010.

11 KO, Y. C.; RATNER B. D.; HOFFMAN, A. S. Characterization of hydrophilichydrophobic polymeric surfaces by contact angle measurements. Journal of Colloid and Interface Science, 82, 25-37, 1984.

12 FISCHER-CRIPPS, Anthony C., **A simple phenomenological approach to nanoindentation creep**. Materials Science Engineering, 385, 74-82, 2004.
13 HAINES, Peter J., **Principles of Thermal Analysis And Calorimetry**. Cambridge: Ed. Lynx, 1992.

14 CALLISTER, William D., **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5 ed. Rio de Janeiro. Editora LTC, 2002.

15 INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER, **Curso para técnicos em radioterapia**. Programa de Qualidade em Radioterapia. Rio de Janeiro: INCA, 2000.

16 RUDIN, Alfred, **The Elements of Polymer Science and Engineering**. London: Academic Press, 1982.

17 SILVEIRA, Ana J. A., Química Orgânica Teórica. Belém: UFPA, 2010.

18 MANO, Eloisa B., **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1991.

19 MELO, Naylor S., **Comportamento mêcanico do policarbonato exposto à radiação gama**. 2004. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2004.

20 MANO, Eloisa B.; MENDES, Luis C.; **Introdução a Polímeros**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1999.

21 **Tudo Sobre Plásticos - Policarbonato**. Disponível em: <a href="http://www.tudosobreplasticos.com/policarbonato.html">http://www.tudosobreplasticos.com/policarbonato.html</a>>. Acesso em: 02 set. 2013.

22 LMS BioMedical - Produtos Médicos Hospitalares. Disponível em: <a href="http://www.lmsbiomedical.com/produtos.html">http://www.lmsbiomedical.com/produtos.html</a> Acesso em: 02 set. 2013.

23 PIANOSCHI, Thatiane A.; ALVA, Mirko; NICOLUCCI, Patrícia. Estudo de diferentes materiais para realização de radioterapia conformacional com feixes de elétrons utilizando o código de simulação Monte Carlo PENELOPE. Revista Brasileira de Física Médica. 4, 23-27, 2011.

24 **Tudo Sobre Plásticos - Acrílico**. Disponível em: <a href="http://www.tudosobreplasticos.com/materiais/acrilico.asp">http://www.tudosobreplasticos.com/materiais/acrilico.asp</a>. Acesso em: 02 set. 2013.

25 **Medintec**. Disponível em: <a href="http://www.medintec.com.br/medintec\_radio\_posicionadores.php">http://www.medintec.com.br/medintec\_radio\_posicionadores.php</a>>. Acesso em: 02 set. 2013.

26 LANGMACK, Keith A., The use of an advanced composite material as an alternative to carbon fibre in radiotherapy. Radiography. 18, 74-77, 2012.

27 Tudo Sobre Plásticos - Polipropileno. Disponível em: <a href="http://www.tudosobreplasticos.com/">http://www.tudosobreplasticos.com/</a> polipropileno.html>. Acesso em: 09 set. 2013.

28 **Lixeiras, Polipropileno e Derivados - Metal Pan**. Disponível em: <a href="http://www.metalpan.com.br/subcategorias.aspx?idsubcategoria=4">http://www.metalpan.com.br/subcategorias.aspx?idsubcategoria=4</a>. Acesso em: 09 set. 2013.

29 SILVA, Denise D. *et al.*, **Quantificação do linalol no óleo essencial da Aniba** *duckei* Korstermans utilizando uma nova coluna capilar POLYH4-MD em Cromatografia Gasosa. Química Nova, 26, 4, 461-465, 2003.

30 - CARDOSO, Grace T., **Caracterização da espuma rígida de poliuretano (PU) derivada de óleo de mamona para isolamento térmico na construção civil**. 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

31 ANTONIAZZI, Stefanie H. *et al.*, **Estudo do adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona com diferentes velocidades no ensaio de compressão.** CBECIMAT - 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, ref. 402-334, Joinville, 2012.

32 CANGEMI, José M., **Biodegradação de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2006. 143 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Química de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

33 CLARO NETO, Salvador, **Caracterizações físico-química de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos**. 1997. 127f. Tese (Doutorado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

34 SILVA, Rosana V., **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 140 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

35 CANGEMI, José M.; CLARO NETO, Salvador; SANTOS, Antonia M., **Biodegradation: An alternative for minimizing the impacts from plastic residues**. Química Nova na Escola, v. 22, p. 17-21, São Paulo, 2006.

36 AZEVEDO, Elaine C., **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona**. 2009, 134 f. Tese (Doutorado) Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal do Paraná, UFPR/PIPE-PR, Curitiba, 2009.

37 FERRAZZA, Jessica F., **Comportamento à flexão de composito sisal/ poliuretano à base de óleo de mamona após a radiação gama**. CBECIMAT - 20° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, ref. 206-081, Joinville, 2012.

38 JAKUBIAK, Rosangela R. *et al.*, **Compósito polímero sisal utilizado em acessório para a uti do hospital de clínicas de Curitiba**. XXXV Congresso Brasileiro de Radiologia. Curitiba, 2006.

39 AZEVEDO, Elaine C. *et al.*, **UV and Gamma Irradiation Effects on Surface Properties of Polyurethane Derivate from Castor Oil**. Revista Polímeros, 23, 3, 305-311, São Carlos, 2013.

40 RIBEIRO, Rodrigo P. - **Efeito da radiação gama no comportamento in vitro de um copolímero bioabsorvível**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.

41 SCHNEIDER, J. O. *et al.*, **Estudo do ângulo de contato em polímeros após irradiação com radiação gama e feixe de elétrons**. CBECIMAT - 20° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, ref. 402-037, Joinville, 2012.

42 WEBER, Ricardo P.; VECCHIO, Keneth S.; SUAREZ, João C. M., **Dynamic behavior of gamma-irradiated polycarbonate** - Matéria (Rio J.), 15, 2, Rio de Janeiro, 2010.

43 PERERA, Rosestela, **The effect of gamma radiation on the properties of polypropylene blends with styrene–butadiene–styrene copolymers**. Polymer Degradation and Stability, 85, 2, 741-750, Caracas, 2004.

44 ZHOU, Lijuan *et al.*, **Investigation on degradation of polypropylene/ stabilizers composites irradiated by gamma rays.** Spectroscopy and Spectral Analysis, 10, 2671-2675, Beijing, 2010.

45 PEZZIN, Ana P. T., **Efeito da radiação ionizante sobre plastissol de DOP/PVC utilizada como simulador de tecido em radioterapia**. 1997. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

46 CANEVAROLO, Sebastião V., **Técnicas de Caracterização de Polímeros**, São Paulo: Editora Artliber, 2004.

47 AZEVEDO, Elaine C., Aplicação de indentação instrumentada na caracterização mecânica de poliuretana derivada de óleo de mamona. Polímeros, 19, 4, 336-343, São Carlos, 2009.

48 MANO, Eloisa B. *et al.*, **Química experimental de polímeros**, ed. 1, São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

49 KOENIG, Jack L., **Spectroscopy of Polymers**. ed. 2, Cleveland: Elsevier Science, 1999.

50 OLIVER W. C.; PHARR, G. M., **Improved technique for determining hardness** and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, Journal of Materials Research, 7, 6, 1564-1580, 1992.

51 Ângulo de contato e energia de superfície. Disponível em: <http://www2.soro caba.unesp.br/gpm/angulo%20cont%20energia%20superf.htm>. Acesso em: 16 set. 2013.

52 FÖRCH, Renate; SCHÖNHERR, Holger; JENKINS, A. T. A., **Surface design:** applications in bioscience and nanotechnology. Weinheim: Ed. Wiley-VCH, 2009.

53 SUBEDI, D. P., Contact Angle Measurement for The Surface Characterization of Solids. Himalayan Physics, 2, 2, Kathmandu, 2011.

54 CHO, J. A. *et al.*, **Adhesion Aspects of Thin Films**, v. 2, K.L. Mittal, ed. VSP, 105-121, Utrecht, 2005.

55 BALTA CALLEJA, F. J.; SANDITOV, D. S.; PRIVALKO, V. P., **Review: the microhardness of non-crystalline materials**. Journal of Material Science, 37 4507-4516, 2002.

56 BOURMAUD, A. *et al.*, **Investigation of the polycarbonate/crushed-rubberparticle interphase by nanoindentation**. Journal of Applied Polymer Science, 103, 4, 2687-2694, 2007.

57 BEYAOUI, Moez *et al.*, **Analysis of nanoindentation curves in the case of bulk amorphous polymers**. International Journal of Materials Research, 100, 7; 943-949, Alemanha, 2009.

58 AQUINO, Kátia A. S., **Sterilization by Gamma Irradiation**. In: Feriz Adrovic, Gamma Irradiation, 1, 171-206, Croácia: InTech, 2012.

59 PADILHA, Giovana S.; GIACON, Virgínia M.; BARTOLI, Júlio R., **Modificação da superfície dos filmes de PMMA por plasma de CHF3**. Exacta, 8, 1, 13-18, São Paulo, 2010.

60 SINHA, Dipak, **Structural Modifications of Gamma Irradiated Polymers: An FT-IR Study**. Advances in Applied Science Research, 3, 3, 1365-1371, Índia, 2012.

61 CAMPOS, João S. C.; RODRIGUES DA SILVA, Alexandre C.; **Efeito do Segundo Tratamento Corona em Filmes de Polipropileno**. Científico Nacional, IX Congresso Interno de Iniciação Científica, 1, 197-197, Campinas, 2001.

62 AHMEDA, Sk. Faruque - Nano-embossed structure on polypropylene induced by low energy Ar ion beam irradiation. Surface and Coatings Technology, 205, 1, 104-108, Seoul, 2010.

63 SILVA JUNIOR, R. B.; MULINARI, D. R., **Determinação do ângulo de contato em PU derivado do óleo de mamona para sorção de petroleo**. CBECIMAT - 20° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, ref. 406-080, Joinville, 2012.