



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Tecnologia de plasma para redução volumétrica de rejeitos radioativos**

**Eduardo Sant'Ana Petraconi Prado**

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

**Orientador:  
Prof. Dr. Ademar José Potiens Júnior**

**São Paulo  
2020**



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Tecnologia de plasma para redução volumétrica de rejeitos radioativos**

**Versão Corrigida**

**Versão Original disponível no IPEN**

**Eduardo Sant'Ana Petraconi Prado**

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

**Orientador:  
Prof. Dr. Ademar José Potiens Júnior**

**São Paulo  
2020**

Fonte de Financiamento: CNPq

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,  
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

PRADO, E. S. P. **Tecnologia de plasma para redução volumétrica de rejeitos radioativos**. 2020. 60 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Prado, Eduardo Sant'Ana Petraconi  
Tecnologia de plasma para redução volumétrica de rejeitos  
radioativos / Eduardo Sant'Ana Petraconi Prado; orientador  
Ademar José Potiens Júnior. -- São Paulo, 2020.  
60 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

1. rejeito radioativo. 2. tratamento. 3. redução  
volumétrica. 4. tecnologia de plasma. I. Potiens Júnior,  
Ademar José, orient. II. Título.

***Dedico este trabalho a minha família.***  
*A minha mãe Dulcinéia Petraconi, meu pai Osmir Prado e meu irmão Heitor por sempre me darem forças para continuar, me apoiando e sempre me incentivando a continuar lutando pelos meus objetivos. A Náthali minha futura esposa por me amar, entender e estar ao meu lado em todas as dificuldades ao longo desses anos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Desafio maior que o desenvolvimento do projeto e escrita da dissertação é conseguir agradecer a todos que me ajudaram e apoiaram nesses dois anos de mestrado.

Primeiramente agradecerei as pessoas mais importantes da minha vida, meu pai Osmir Prado e minha mãe Dulcinéia Petraconi que sempre demonstraram força, garra e perseverança para enfrentar todas as dificuldades que a vida impôs servindo como inspiração e exemplo para a minha vida. Obrigado por sempre me apoiar, incentivar e me dar forças para nunca desistir dos meus sonhos.

Ao meu irmão Heitor, quero ser um bom exemplo e lutar também pelos seus sonhos. Para mim você sempre será uma criança, aquele irmão mais novo ao qual devo toda proteção. E quanto ao amor que nos une esse já é mais que eterno.

A Náthali minha amiga, namorada e futura esposa por sempre me apoiar e compreender em todos esses anos que estamos juntos. Sempre com palavras positivas para não me deixar desanimar. Amo-te todos os dias e todos os dias muito mais!

Aos meus amigos e companheiros da SEGRR-IPEN e LPP-ITA.

Ao professor Dr. Ademar José Potiens Júnior por me aceitar como aluno e por me orientar e dar todo o suporte necessário para a realização desse projeto.

Ao professor e tio Dr. Gilberto Petraconi por acreditar no meu trabalho e disponibilizar seu laboratório que foi tão essencial para a realização dos meus experimentos.

Ao Dr. Felipe Miranda pelo apoio e parceria, sempre dando conselhos e ensinamentos que foram essenciais para ao desenvolvimento do trabalho, além dos momentos de descontração e companheirismo.

Ao professor MSc. Roberto Carlos dos Santos pelos conselhos e por ser o primeiro a confiar no meu potencial.

Agradeço ao IPEN pela oportunidade e ao CNPq pelo apoio financeiro (Processo: 130201/2018-9) ao longo do meu mestrado.

E por fim a todos que de alguma forma contribuíram para que essa pesquisa fosse possível.

*“Eu aprendi com o meu pai, que o único jeito de provar se algo é real, é viajando até lá.”*

Bjorn



## RESUMO

PRADO, E. S. P. **Tecnologia de plasma para redução volumétrica de rejeitos radioativos.** 2020. 60 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

Usinas nucleares, hospitais, indústrias e institutos de pesquisa geram quantidades consideráveis de rejeitos radioativos todos os dias. A deposição segura destes rejeitos deve ser realizado immobilizando os radionuclídeos e, para melhor capacidade de armazenamento, este deve ser volumetricamente reduzido o máximo possível. Neste preceito, a tecnologia de plasma térmico se demonstra uma tecnologia promissora para tratamento de rejeitos radioativos, converte os rejeitos radioativos expostos a temperaturas elevadas nos chamados gases e sólidos resultantes do processo (particulados e escória vitrificada), reduzindo substancialmente seu volume. No presente estudo, foi desenvolvido um sistema experimental empregando um eletrodo de grafite como catodo da descarga de arco transferido para o processamento de rejeitos sólidos compactáveis e não compactáveis. Os rejeitos foram simulados por meio da inserção de isótopos estáveis de césio, cobalto e chumbo, césio e cobalto. Os estudos foram focados no efeito do tempo de processo sobre o fator de redução volumétrica, na fração de radiosótopos retidos na escória vitrificada e na linha de gases de exaustão. Os resultados mostram que após 30 minutos de tratamento com operação em potência da ordem de 10 kW, obtem-se fatores de redução volumétrica de 1:99 e 1:77, para resíduos sólidos compactáveis e não compactáveis, respectivamente. Nos rejeitos não compactáveis, e, portanto, com maior fração de elementos inorgânicos, a porcentagem dos isótopos estáveis retidos na escória foi mais elevada, inferindo maior atividade do traçador neste tipo de rejeito. Considerando os aspectos regulatórios, econômicos e ambientais, uma análise mais geral das pesquisas indica elevado potencial do emprego desta tecnologia no processamento e gerenciamento de resíduos radioativos.

Palavras-chave: rejeitos radioativos; tratamento; redução volumétrica; tecnologia de plasma.

## ABSTRACT

PRADO, E. S. P. **Plasma technology for volumetric reduction of radioactive waste.** 2020. 60 p. Master Thesis. (Master's Degree in Nuclear Technology) – Nuclear and Energy Research Institute – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

Nuclear power plants, hospitals, industries and research institutes generate considerable amounts of radioactive waste every day. The safe deposition of these wastes must be performed by immobilizing the radionuclides and, for better storage capacity, it must be reduced by volume as much as possible. In this context, thermal plasma technology proves to be a promising technology for the treatment of radioactive waste, converts radioactive waste exposed to high temperatures into so-called gases and solids resulting from the process (particulates and vitrified slag), substantially reducing its volume. In the present study, an experimental system was developed using a graphite electrode as a transferred arc discharge cathode for the processing of compactable and non-compactable solid waste. The wastes were simulated through the insertion of stable isotopes of lead, cesium, and cobalt. The studies were focused on the effect of process time on the volumetric reduction factor, on the fraction of radiosotopes retained in the vitrified slag and in the exhaust gas line. The results show that after 30 minutes of treatment operating at a power of 10 kW, volume reduction factors of 1:99 and 1:77 are obtained for compactable and non-compactable solid waste, respectively. In non-compactable wastes, and therefore, with a higher fraction of inorganic elements, the percentage of retention of stable isotopes in the slag is higher. Considering the regulatory, economic and environmental aspects, a more general analysis of the research indicates a high potential for the use of this technology in the processing and management of radioactive waste.

Keywords: radioactive waste; treatment; volumetric reduction; plasma technology.

## LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - RDM e RC no Brasil. ....	9
Tabela 2 - Aplicabilidade das tecnologias de tratamento para vários tipos de rejeitos radioativos.....	10
Tabela 3 - Comparação entre os processos de incineração e gaseificação por plasma para tratamento de rejeitos.....	11
Tabela 4 - Principais plantas de tratamento de resíduos por plasma térmico em operação no mundo ou projetos. ....	18
Tabela 5 - Relação dos materiais que compõe os rejeitos sólidos utilizados neste trabalho. ...	23
Tabela 6 - Características físicas e químicas dos isótopos estáveis empregados neste trabalho. ....	24
Tabela 7 - Análises efetuadas para a caracterização das amostras. ....	25
Tabela 8 - Valores medidos de volume dos rejeitos sólidos compactáveis (RSC) e não compactáveis (RNC) antes e depois do processamento.....	44
Tabela 9 - Composição elementar e concentração dos elementos no filtro de amostragem de gás do processamento de rejeitos sólidos compactáveis.....	49
Tabela 10 - Composição elementar e concentração dos elementos no filtro de amostragem de gás do processamento de rejeitos sólidos não compactáveis. ....	50
Tabela 11 - Estimativa da atividade em relação à massa de isótopo. ....	52

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Fluxograma das etapas de gerenciamento de rejeitos radioativos, considerando as alternativas de D&D – diluir e dispensar; R&R – reter e retardar a liberação; e C&C concentrar e confinar. ....	6
Figura 2 - Plasma. ....	12
Figura 3 - Comportamento da temperatura dos elétrons no plasma em função da pressão.....	13
Figura 4 - Diagrama esquemático de uma tocha linear de arco não transferido.....	15
Figura 5 - Diagrama esquemático de uma tocha linear de arco transferido. ....	16
Figura 6 - Diagrama de processo a plasma térmico de rejeitos radioativos da ZWILAG, Suíça. ....	21
Figura 7 - Reator de processo da ZWILAG.....	21
Figura 8 - Sistema experimental de processo de rejeitos a plasma térmico. ....	28
Figura 9 - Diagrama esquemático dos sistemas para ensaios de processamento de rejeitos a plasma. ....	28
Figura 10 - Diagrama de processamento de rejeitos a plasma.....	29
Figura 11 - Desenhos esquemáticos, vista externa e interna, do reator de processo. ....	30
Figura 12 - Representação da degradação dos cadinhos após processamento a plasma térmico. ....	33
Figura 13 - Desenho esquemático do reator de processo, em detalhe os principais componentes do sistema. ....	34
Figura 14 - Variação temporal dos valores de tensão e corrente elétrica no processamento de rejeitos sólidos compactáveis.....	35
Figura 15 - Variação temporal dos valores de tensão e corrente elétrica no processamento de rejeitos sólidos não compactáveis.....	36
Figura 16 - Variação da potência elétrica aplicada à tocha de plasma em função do tempo de processo. ....	37
Figura 17 - Evolução temporal dos valores de temperatura das seções da parede do reator de processo. ....	39
Figura 18 - Evolução temporal dos valores de temperatura de exaustão dos gases. ....	40
Figura 19 - Análise termogravimétrica dos rejeitos antes do tratatamento a plasma. ....	41

Figura 20 - Redução de massa de rejeitos sólidos compactáveis. ....	42
Figura 21 - Redução de massa de rejeitos sólidos não compactáveis.....	42
Figura 22 - Imagem das amostras de escórias após processamento a plasma térmico. Do lado esquerdo o rejeito compactável e do lado direito o rejeito não compactável. ....	43
Figura 23 - Variação do percentual de redução volumétrica de rejeitos sólidos compactáveis em função do tempo de processo. ....	44
Figura 24 - Variação do percentual de redução volumétrica de rejeitos sólidos não compactáveis em função do tempo de processo. ....	45
Figura 25 - Efeito do tempo de processo sobre a massa de contaminantes retidos na escória do rejeito compactável. ....	46
Figura 26 - Efeito do tempo de processo sobre a massa de contaminantes retidos na escória do rejeito não compactável. ....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALARA	As Low As Reasonably Achievable
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CCN	Centro do Combustível Nuclear
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
ETL	Equilíbrio Termodinâmico Local
ETC	Equilíbrio Termodinâmico Completo
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LPP	Laboratório de Plasmas e Processos
RC	Radionuclídeo Chave
RDM	Radionuclídeo Difícil de Medir
RSC	Rejeitos Sólidos Compactável
RNC	Rejeitos Sólidos não Compactável
SEGRR	Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos
TPT	Tecnologia de Plasma Térmico
TGA	Análise Termogravimétrica
USP	Universidade de São Paulo
FRV	Fator de Redução de Volume

# SUMÁRIO

	Página
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> ..... 1
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> ..... 4
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> ..... 4
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> ..... 4
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> ..... 5
<b>3.1</b>	<b>Gerenciamento de rejeitos radioativos</b> ..... 5
3.1.1	Tratamento de rejeitos radioativos..... 7
<b>3.2</b>	<b>Método de Fatores de Escala</b> ..... 8
<b>3.3</b>	<b>Processos térmicos para redução volumétrica</b> ..... 9
<b>3.4</b>	<b>Plasma</b> ..... 12
3.4.1	Classificação do plasma..... 13
<b>3.5</b>	<b>Tochas de plasma: conceitos básicos</b> ..... 14
3.5.1	Plasma por Arco Não Transferido ..... 15
3.5.2	Plasma por Arco Transferido ..... 15
<b>3.6</b>	<b>Aplicações da tecnologia de plasma térmico</b> ..... 17
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> ..... 23
<b>4.1</b>	<b>Amostras de rejeitos</b> ..... 23
<b>4.2</b>	<b>Isótopos estáveis</b> ..... 24
<b>4.3</b>	<b>Métodos de Análises</b> ..... 24
4.3.1	Massa específica aparente..... 25
4.3.2	Volume aparente ..... 25
4.3.3	Termogravimetria ..... 26
4.3.4	Espectrometria de fluorescência de raios X..... 26

<b>4.4</b>	<b>Relação Massa – Atividade .....</b>	<b>27</b>
<b>4.5</b>	<b>Aparato Experimental .....</b>	<b>27</b>
<b>4.6</b>	<b>Procedimento Experimental .....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Análises dos parâmetros de processamento .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise Termogravimétrica .....</b>	<b>40</b>
<b>5.3</b>	<b>Redução de massa .....</b>	<b>41</b>
<b>5.4</b>	<b>Redução Volumétrica .....</b>	<b>43</b>
<b>5.5</b>	<b>Análises dos elementos traçadores na escória .....</b>	<b>45</b>
<b>5.6</b>	<b>Análise da composição elementar dos gases .....</b>	<b>49</b>
<b>5.7</b>	<b>Atividade estimada .....</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>56</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e científico na área nuclear, observado desde o começo do século XX, conduziu a uma ampla variedade de aplicações em pesquisa, medicina, indústria e geração de energia por fissão nuclear (CAMELO, 2015). Incluída a certas atividades humanas, essa prática tem como consequência a geração de rejeitos radioativos que requerem tratamentos adequados e necessitam de um gerenciamento que garanta a proteção da saúde humana e do meio ambiente (PRADO et al, 2020).

De acordo com o glossário de gerenciamento de rejeitos radioativos publicado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2003), rejeito radioativo é definido como “qualquer material que contenha ou tenha sido contaminado com radionuclídeos em concentrações ou níveis de atividade maiores que os limites de isenção estabelecidos pela autoridade competente” (IAEA, 2003).

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é o órgão responsável pelo recebimento, tratamento e armazenamento de rejeitos radioativos gerados em todo o país. Esses rejeitos têm origem durante as etapas de fabricação e utilização do combustível nuclear, no uso de radioisótopos em indústrias, clínicas médicas, hospitais e centros de pesquisa, e materiais removidos de instalações radioativas descomissionadas (TESSARO, 2015).

Dentre as etapas que compreendem um programa de gerenciamento de rejeitos radioativos, o tratamento térmico promove alterações nas características físicas e químicas dos rejeitos de tal forma a aumentar a segurança e diminuir os custos das etapas seguintes da gestão, até a disposição final (PRADO et al, 2017). Muitos trabalhos empregam o processo de tratamento térmico de rejeitos radioativos visando principalmente os aspectos de inertização e redução volumétrica, com a finalidade de facilitar o transporte e armazenamento dos rejeitos (PRADO et al, 2020).

Diferentes métodos podem ser utilizados para a redução volumétrica de rejeitos radioativos. O método convencional utilizado na maioria das instalações de gerenciamento de

rejeitos radioativos para tratamento de rejeitos sólidos compactáveis é a compactação mecânica. Este processo consiste em compactar os rejeitos em tambores de 200 litros atingindo fatores de redução da ordem de 5:1 (IAEA, 2003).

Atualmente, os locais provisórios de armazenamento temporário de rejeitos radioativos tratados em todo o mundo têm suas capacidades comprometidas. Considerando esse fato, o emprego de novas tecnologias focadas nos aspectos de redução de volume atua de caráter primordial para cumprir as exigências dos órgãos reguladores, com base nas diretrizes da IAEA. Os requisitos estão mais severos quanto a qualidade do processo, sendo assim, exigem métodos mais eficazes, seguros e confiáveis (IAEA, 2011).

É objetivo fundamental do Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos (SEGRR) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), localizado no campus da Universidade de São Paulo (USP), desenvolver métodos que possibilitem um melhor gerenciamento dos rejeitos radioativos.

O SEGRR vem colaborando para tanto e desenvolve métodos para o programa de gerenciamento de rejeitos produzidos internamente ao instituto e para aqueles que são recebidos de outras instituições (GERALDO, 2012; TADDEI, 2013). Dentre os rejeitos gerenciados pelo SEGRR constam os rejeitos sólidos compactáveis e não compactáveis que ocupam a maior parte do espaço físico dos depósitos e possuem alto potencial de atingir lotação máxima em repositórios.

Estudos para obter a redução volumétrica usando uma variedade de métodos térmicos são reportados na literatura (GARAMSZEZGHY, 2011; MOSSE et al., 2008; POLKANOV et al., 2011). Os resultados ainda não são satisfatórios do ponto de vista de fatores de redução de volume (FRV) e, portanto, evidenciam a necessidade do emprego de tecnologias inovadoras de tratamento térmico. Nesse escopo, a tecnologia de plasma térmico (TPT) se mostra promissora para a redução volumétrica de rejeitos radioativos sólidos, empregada geralmente no processamento de uma ampla variedade de resíduos (TZENG et al, 1998). O tratamento de resíduos por plasma com o objetivo de realizar a sua destruição e/ou inertização já é há muitos anos uma tecnologia comercial (DECKERS, 2011; HEBERLEIN, 2008). Entretanto, a conversão térmica de rejeitos radioativos sólidos é ainda objeto de estudo com uma grande variedade de abordagens possíveis quanto à configuração e forma construtiva de reatores e de seus parâmetros operacionais (TZENG et al, 1998; DMITRIEV, 2001; GHILOUFI, 2008,

2009). Esta tecnologia destaca-se frente aos processos convencionais de tratamento de rejeitos radioativos sólidos por ser um processo relativamente rápido que permite reduzir de forma substancial o volume processado. Este processo envolve o tratamento em altas temperaturas do plasma térmico, atingindo até  $15.000^{\circ}\text{C}$  quando o resíduo passa pela zona do arco e em torno de  $2.500^{\circ}\text{C}$  na fase condensada (resíduo sólido fundido). Essa condição de processamento tem como propriedade decompor os produtos voláteis contidos nos materiais processados em moléculas mais simples, e transformar a fração inorgânica do resíduo numa matriz vitrificada (escória), totalmente inerte, tendo em vista seu armazenamento seguro. Os parâmetros de processo (pressão, temperatura, natureza e fluxo de gases de trabalho, geometria do reator, tipo de gerador de plasma e potência aplicada) podem ser ajustados ou adaptados de maneira a reduzir o fluxo de radioisótopos (gases e particulados) para a linha de exaustão de gases, mantendo-os agregados a escória, que é o rejeito final a ser armazenado. Filtros saturados e outras matérias contaminadas no processo podem ser reprocessados no próprio reator (FILIUS et al, 1996).

Neste contexto, este trabalho tem como foco principal o estudo e adaptação de um sistema de tratamento a plasma para processamento de rejeitos radioativos visando os aspectos de redução volumétrica de rejeitos compactáveis e não compactáveis. A característica radioativa do rejeito foi simulada por meio dos principais radionuclídeos utilizados como chaves para aplicação do método de Fatores de Escala, com exceção do chumbo, o qual foi inserido pela disponibilidade, e está presente em grande quantidade nos rejeitos de ocorrência da indústria do petróleo produzidos em território nacional. Especificamente, objetivou-se investigar os efeitos do tempo de processo sobre o fator de redução volumétrica, mantendo-se fixas a potência de descarga e o volume inicial de rejeito processado. Também foram avaliadas as frações de radioisótopos retidos nos gases e sólidos de produção.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral consiste nas investigações sobre o processo de tratamento térmico por plasma para redução volumétrica de rejeitos radioativos sólidos compactáveis e não compactáveis.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Apresentar os parâmetros operacionais otimizados do sistema de plasma térmico para a redução volumétrica dos rejeitos sólidos;
- Avaliar a alteração volumétrica dos rejeitos tratados por plasma térmico em função do tempo de processo;
- Avaliar o comportamento das propriedades físicas e químicas dos produtos do processo (escória, particulados e emissões gasosas).

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Gerenciamento de rejeitos radioativos

De acordo com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pela Norma CNEN NN 6.09 que relata sobre os “Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação”, rejeito radioativo é definido como qualquer material resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção especificados na Norma CNEN-NN-8.01: “Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação” e para o qual a reutilização é imprópria ou não prevista (CNEN 2002; CNEN, 2014).

Desta forma, a gerência de rejeitos radioativos compreende o conjunto de atividades relativas ao rejeito, seja de gestão administrativa ou operacional, que corresponde às etapas de coleta, segregação, tratamento, acondicionamento, armazenagem, transporte e deposição final. Cabe à gerência zelar por estes rejeitos enquanto considerados fonte potencial de perigo (MARUMO, 2006).

O fluxograma ilustrado na Figura 1 apresenta as etapas do programa de gerenciamento de rejeitos radioativos e suas possíveis sequências, adotando o princípio ALARA (“As Low As Reasonably Achievable” ou tão baixo quanto razoavelmente exequível) e levando em consideração as possibilidades de:

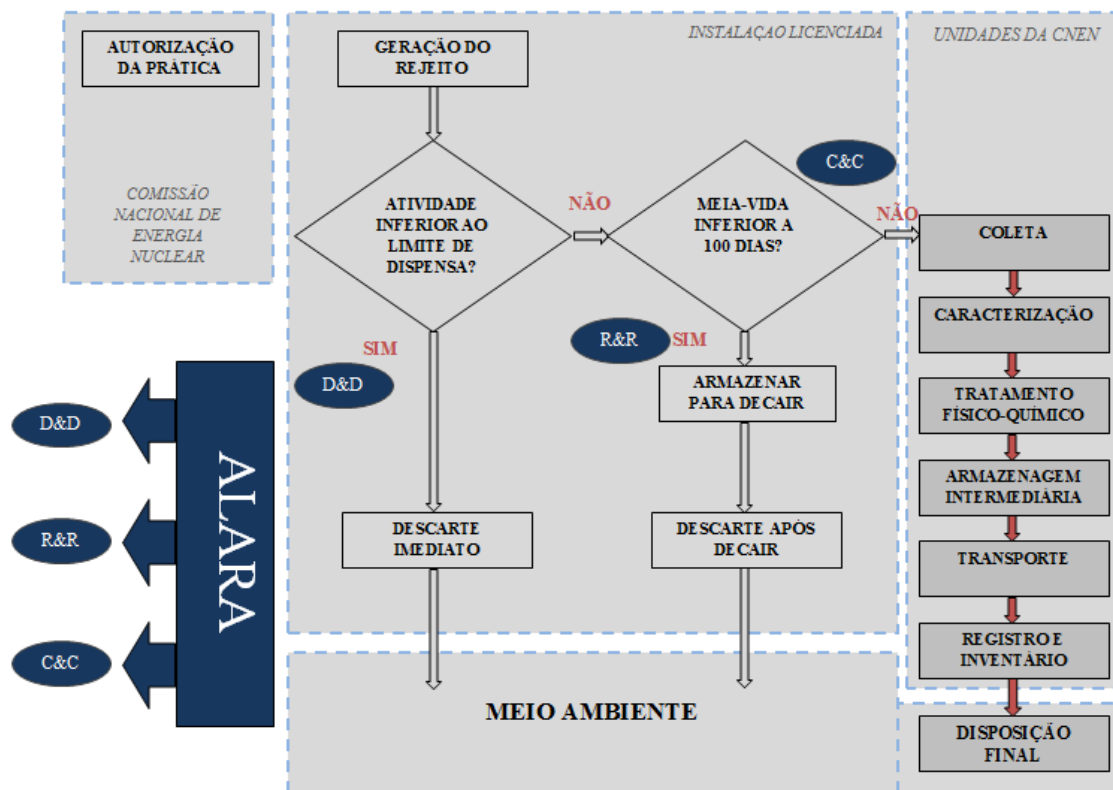
- Diluir e dispensar (D&D);
- Reter e retardar a liberação (R&R);
- Concentrar e confinar (C&C).

Todas as etapas apresentadas no fluxograma se interrelacionam. O exemplo disso, as características de um repositório final podem determinar os processos que melhor se adequem ao tratamento.

O gerenciamento de rejeitos deve ocorrer avaliando-se diferentes alternativas para cada etapa, possibilitando obter um sistema que cumpra com os princípios de proteção

estabelecidos pelos órgãos reguladores. Entretanto, é necessário ressaltar que todos os modelos de entrada e saída de um programa de gerenciamento de rejeitos radioativos são caracterizados pela alta complexidade (TESSARO, 2015).

**Figura 1** - Fluxograma das etapas de gerenciamento de rejeitos radioativos, considerando as alternativas de D&D – diluir e dispensar; R&R – reter e retardar a liberação; e C&C concentrar e confinar.



Fonte: (TESSARO, 2015)

O gerenciamento de rejeitos radioativos deve ter em vista principalmente a diminuição de custos e das doses operacionais (MARINGER et al, 2013). Também é necessário ter em vista a redução de rejeitos radioativos secundários durante o exercício do gerenciamento. Ainda que se trate de uma tarefa complexa, a redução de rejeitos pode ser alcançada seguindo alguns passos que incluem:

- Planejamento prévio;
- Instalações e equipamentos de descontaminação adequados;
- Formação dos profissionais que atuam na descontaminação sobre as operações e técnicas que podem ser utilizadas (TESSARO, 2015).

A partir da geração do rejeito, inicia-se então o gerenciamento, que compreende as

fases de:

- Coleta e transporte: consiste em acondicionar os rejeitos segregados em embalagens apropriadas e adequadamente identificadas para então, serem transportados até o local de tratamento;
- Caracterização: qualifica e quantifica propriedades consideráveis para a definição do processo de tratamento. Baseia-se na determinação de propriedades físicas, químicas e radiológicas dos rejeitos;
- Tratamento: visa reduzir o volume e condicionar física e quimicamente o rejeito, compatibilizando-o com as etapas seguintes;
- Armazenamento: em um depósito intermediário, armazena de maneira não definitiva, os rejeitos radioativos já tratados.
- Disposição final: é a última etapa do gerenciamento de rejeitos radioativos. Pode ser realizada por meio da eliminação ou do confinamento. A eliminação consiste na liberação do rejeito para o meio ambiente de forma gradativa, controlada e definitiva. Já o confinamento preza zelar por esses rejeitos enquanto constituírem fonte potencial de perigo (CASTRO, 2005).

### 3.1.1 Tratamento de rejeitos radioativos

Existem interdependências entre todas as etapas do gerenciamento de rejeitos radioativos, desde a geração dos rejeitos até sua deposição final. Para o tratamento dos rejeitos radioativos, o planejamento deve ser realizado com antecedência, para que seja adotado um método equilibrado no programa geral de gerenciamento entre os requisitos de segurança e operacionalidade (IAEA, 2016).

De acordo com a Norma CNEN NN 8.01: “Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação” para o tratamento de rejeitos radioativos deve ser considerado o conteúdo radioisotópico, o tipo e o nível de radiação emitida, a meia vida dos radionuclídeos, o estado físico do rejeito (sólido, líquido ou gasoso) e a presença de outros compostos no rejeito (CNEN, 2014).

O tratamento de rejeitos radioativos pode incluir os seguintes processos:

- Redução no volume de rejeitos (por exemplo, incineração de resíduos combustíveis, compactação de resíduos sólidos e segmentação ou desmontagem de componentes ou equipamentos de resíduos volumosos);
- Remoção de radionuclídeos (por exemplo, por evaporação ou troca iônica para fluxos de rejeitos líquidos e filtração de fluxos de resíduos gasosos);
- Alteração da forma ou composição dos rejeitos (por exemplo, por meio de processos químicos, como precipitação, floculação e digestão ácida, bem como por oxidação química ou térmica);
- Alteração da forma ou propriedades dos rejeitos (por exemplo, solidificação, sorção ou encapsulamento; matrizes comuns de imobilização incluem cimento, betume e vidro) (IAEA, 2016).

### **3.2 Método de Fatores de Escala**

A IAEA (2009) recomenda que os órgãos reguladores dos países membros aceitem a determinação do inventário radioisotópico de rejeitos radioativos por meio da utilização do método dos Fatores de Escala.

Esses são obtidos em análises radioquímicas dos radionuclídeos fáceis de medir, aqueles com as características definidas e que podem ser determinados através de medições diretas das embalagens, que são chamados, pelo método recomendado pela IAEA (2009), de ‘radionuclídeos chave’ (RC) e dos ‘radionuclídeos de difícil medição’ (RDM), aqueles que só podem ser caracterizados por meio de análises laboratoriais em amostras dos rejeitos, visto que são emissores de radiação gama de baixa energia ou são emissores de radiação alfa ou beta puros, ou estão presentes em quantidades insuficientes para detecção direta nas embalagens (SOUZA, 2013).

Os critérios para escolha dos RC são:

- A atividade dos RC deve ter correlação com a dos RDM;
- O RC deve estar presente no rejeito em quantidades significativas;
- O RC deve ter meia-vida suficientemente longa para ser detectável quando o rejeito for caracterizado;
- O RC deve ter emissões gama com frequência e energia suficientemente altas para permitir a detecção por espectrometria de rejeitos acondicionados;



- É preferível que o comportamento químico dos RC e RDM seja semelhante, por exemplo, quando sejam isótopos do mesmo elemento químico. (IAEA, 2009).

A lista de RC e RDM sugeridos para caracterização dos rejeitos radioativos do Brasil é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** - RDM e RC no Brasil.

Radionuclídeos de difícil medição (RDM)	Radionuclídeo Chave (RC)
$^{93}\text{Zr}, ^{94}\text{Nb}, ^{99}\text{Tc}, ^{108\text{m}}\text{Ag}$	$^{60}\text{Co}$
$^{90}\text{Sr}, ^{135}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$
$^{14}\text{C}, ^{55}\text{Fe}, ^{59}\text{Ni}, ^{63}\text{Ni}, ^{129}\text{I}, ^{234}\text{U}, ^{235}\text{U}, ^{236}\text{U}, ^{238}\text{U},$ $^{238}\text{Pu}, ^{239}\text{Pu}, ^{240}\text{Pu}, ^{241}\text{Pu}, ^{241}\text{Am}$	$^{60}\text{Co}, ^{137}\text{Cs}$

Fonte: (TADDEI, 2015)

Desta forma, a escolha dos isótopos estáveis (césio e cobalto) para o desenvolvimento do trabalho foi obtida de acordo com os radionuclídeos utilizados como chaves para o método de Fatores de Escala e adicionalmente o chumbo por motivos de disponibilidade no laboratório e presença nos rejeitos oriundos da indústria petroquímica.

### 3.3 Processos térmicos para redução volumétrica

Não existe uma tecnologia universal e perfeita igualmente eficiente para gerenciar todos os fluxos de rejeitos radioativos. Cada método de tratamento ou condicionamento de rejeitos tem suas próprias restrições. No entanto, os tipos de rejeitos radioativos a serem tratados usando diferentes tecnologias de tratamento térmico estão apresentados na Tabela 2, permitindo uma comparação em relação à aplicabilidade da tecnologia de plasma (POLKANOV et al, 2011).

**Tabela 2** - Aplicabilidade das tecnologias de tratamento para vários tipos de rejeitos radioativos.

Tecnologia	Tipos de rejeitos						
	Orgânicos líquidos	Inorgânicos líquidos	Orgânicos sólidos	Inorgânicos sólidos	Mistura orgânico-inorgânico sólido	Mistura orgânico-inorgânico líquido	Resina de troca-iônica
Calcinação	NA	A	NA	NA	NA	NA	NA
Incineração a alta temperatura	A	A	A	NA*	A*	A	A
Incineração	A	A	A	NA*	A*	A	A
Fusão direta	NA	NA	NA	A	NA	NA	NA
Oxidação de sal fundido	A	NA	A	LA	LA	LA	A
<b>Plasma</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
Pirólise	A	NA	A**	A**	A**	A	A
Synroc	NA	NA	A	A	A	NA	NA
Tratamento termoquímico	NA	NA	A	A	A	NA	A
Vitrificação	NA	A	A**	A**	A**	NA	A
Combustão úmida	A	NA	A	NA	NA	NA	A***

Legenda:

A Tecnologia aplicável a esse tipo de rejeito.

NA Tecnologia não aplicável a este tipo de rejeito.

LA Tecnologia tem aplicabilidade limitada a esse tipo de resíduo.

\* Pequenas quantidades de materiais inorgânicos são aceitáveis sem causar danos ou obstrução do sistema.

\*\* Aplicável apenas à forma granular ou em pó desse tipo de rejeito.

\*\*\* Aplicável apenas a resinas com material orgânico.

Fonte: (IAEA, 2006)

Quando comparamos a incineração clássica e o processamento por plasma térmico, os principais fatores diferenciais entre eles são a quantidade de O<sub>2</sub> adicionado e a temperatura de processo. A incineração apresenta grande quantidade de excesso de ar, comparados aos gaseificadores térmicos de plasma que adicionam uma quantidade limitada de O<sub>2</sub>. Os incineradores são projetados para maximizar o CO<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub>O, indicando combustão completa, no entanto, o sistema de tratamento térmico a plasma é projetado para maximizar o CO e o H<sub>2</sub>, indicando combustão incompleta pelo controle da quantidade de O<sub>2</sub>. Portanto, dentro do forno de incineração existe um ambiente oxidante, conseqüentemente NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>

são gerados no processo, mas dentro do processo de plasma térmico há um ambiente redutor, de modo que a geração de  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  é impedida ou reduzida (BYUN et al, 2012).

As temperaturas também são diferentes nos dois processos. No processo de incineração as temperaturas típicas de processo ficam em torno de  $800^\circ\text{C}$ , abaixo do ponto de fusão de cinzas. Como efeito, os materiais inorgânicos contidos nos rejeitos são convertidos em cinzas volantes promovendo excesso de fluxo de particulados para a linha de exaustão de gases. Por outro lado, a temperatura dos processos térmicos do plasma pode ser ajustada a valores superiores a  $1500^\circ\text{C}$ , acima do ponto de fusão de cinzas, convertendo os materiais inorgânicos contidos no rejeito em escória vitrificada. A Tabela 3 mostra as importantes diferenças mencionadas acima entre os processos de incineração e gaseificação por plasma (FABRY et al, 2013).

**Tabela 3** - Comparação entre os processos de incineração e gaseificação por plasma para tratamento de rejeitos.

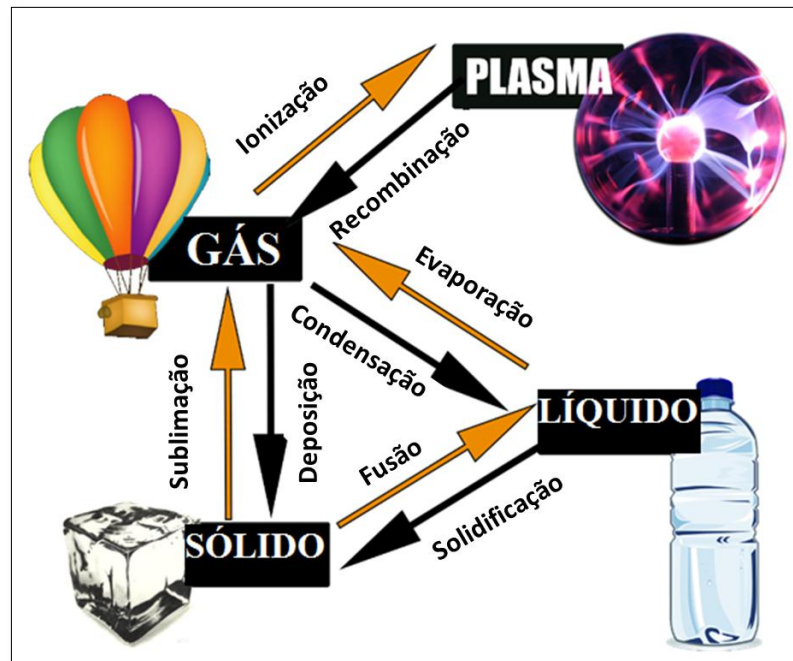
Fatores diferenciais	Processo de incineração	Processo por plasma térmico
Definição	- Processo de queima em massa	- Processo de gaseificação
Quantidade de $\text{O}_2$	- Projetado para maximizar $\text{CO}_2$ e $\text{H}_2\text{O}$ ; - Adiciona grande quantidade de excesso de ar; - Ambiente oxidante; - Geração de $\text{NO}_x$ e $\text{SO}_x$ .	- Projetado para maximizar $\text{CO}$ e $\text{H}_2$ ; - Adiciona quantidade limitada de $\text{O}_2$ ; - Ambiente redutor; - Inibe a geração de $\text{NO}_x$ e $\text{SO}_x$ .
Temperatura	- Opera abaixo do ponto de fusão de cinzas - Materiais inorgânicos são convertidos em cinzas de fundo e volante - Cinzas de fundo e volante devem ser tratadas para disposição	- Opera acima do ponto de fusão de cinzas; - Materiais inorgânicos são convertidos em escória vítrea; - A escória não lixiviável deve seguir para disposição.

Fonte: (BYUN et al, 2012).

### 3.4 Plasma

O plasma é o estado da matéria que tem como característica principal a coexistência de espécies eletricamente carregadas (elétrons e íons) e neutras (átomos e moléculas) em estados fundamental ou excitados (Figura 2). Essas características permitem intensificação significativa de processos químicos tradicionais, essencialmente o aumento da eficiência e da estimulação de reações químicas difíceis de ocorrer em processos químicos convencionais (FRIDMAN, 2008; TAO, 2008).

Figura 2 - Plasma.



Fonte: Autor da dissertação.

Embora o plasma seja comumente produzido por descargas elétricas empregando precursores gasosos (gás de trabalho), ele também pode ser obtido por precursores sólidos e líquidos, necessitando energia suficiente para sua vaporização e ionização. Em sólidos e líquidos pode-se obter plasma mediante altas concentrações de energias por meio de laser. No caso de plasma em meio gasoso ele pode ser gerado e sustentado por energia eletromagnética que pode ser obtida por diversos tipos de fontes em sinal de corrente contínua, alternada ou pulsada (FRIDMAN, 2008).

O estado de plasma pode ocorrer naturalmente (auroras, estrelas, raios), mas

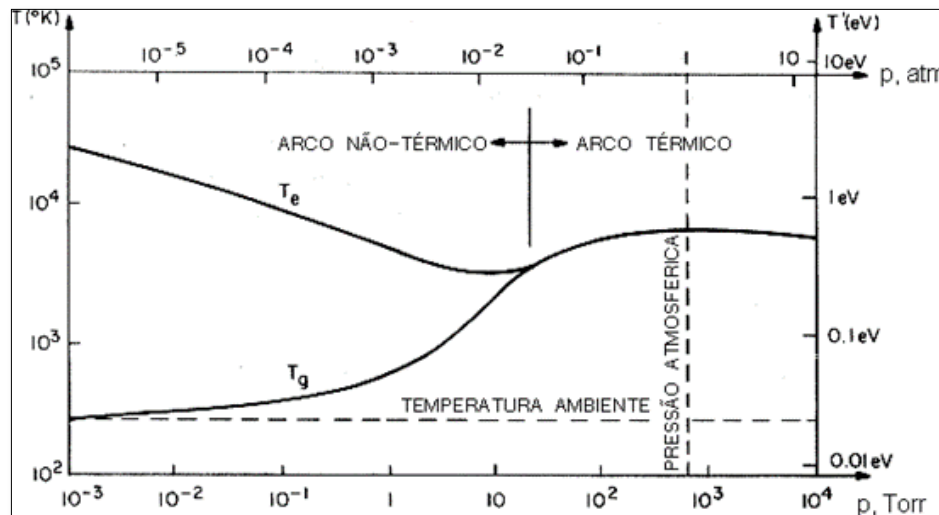
também pode ser gerado pelo homem em laboratórios e indústrias, os quais podem ser utilizados em inúmeras aplicações, incluindo síntese de materiais, geração de energia (termonuclear controlada) lasers, lâmpadas fluorescentes, dentre outras (MIRANDA, 2013).

### 3.4.1 Classificação do plasma

Conforme sua taxa de ionização, o plasma pode ser classificado em quente ou frio. Plasma quente é definido quando o gás é totalmente ionizado como ocorre no sol e nos reatores de fusão nuclear (adquirindo temperaturas acima de  $10^7$  K). Já os plasmas frios, com menor grau de ionização e temperaturas mais baixas, se dividem em dois subtipos: plasma térmico e não térmico, diferenciando-se quanto ao equilíbrio térmico das espécies do gás (MIRANDA, 2013).

Na Figura 3 é demonstrado que o plasma térmico apresenta equilíbrio termodinâmico, ou seja, a temperatura dos elétrons é igual à temperatura das partículas pesadas ( $T_e \approx T_g$ ), estando estas temperaturas associadas à energia cinética das partículas (é o que ocorre no plasma térmico de arco elétrico). Já o plasma frio é caracterizado pelo não equilíbrio termodinâmico ( $T_e \gg T_g$ ). Como a temperatura  $T_g$  está perto da temperatura ambiente, estes plasmas são chamados plasmas “frios”. É o caso da lâmpada fluorescente (FRIDMAN, 2008).

**Figura 3** - Comportamento da temperatura dos elétrons no plasma em função da pressão.



Fonte: (ROTH, 1995).

Os plasmas criados em laboratórios não apresentam uma distribuição homogênea de suas propriedades (por exemplo, temperatura, radiação e densidade) e neste caso o equilíbrio termodinâmico passa a ser o equilíbrio termodinâmico local (ETL).

### **3.5 Tochas de plasma: conceitos básicos**

Tochas de plasma são dispositivos utilizados para estabilizar uma descarga elétrica com fluxo de gás, objetivando a conversão da energia elétrica em energia térmica. Em uma tocha de plasma térmico, operando a partir de descarga elétrica, o plasma de alta entalpia resulta da interação do gás com o arco elétrico. O estudo de descargas elétricas em gases e a formação do jato de plasma envolvem fenômenos de dinâmica do gás, transferência de massa e calor, processos eletrofísicos e aerotermodinâmicos (SOLONENKO, 2003).

Tochas de plasma podem ser classificadas de acordo com a fonte de energia elétrica, ou seja, arcos elétricos podem ser gerados a partir de uma fonte de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), ou pelo tipo de descarga utilizada, que podem ser de arco transferido e arco não transferido.

No projeto de uma tocha de plasma térmico, além do tipo de fonte de energia elétrica, deve-se considerar também a entalpia e temperatura do jato de plasma adequado a aplicação, a escolha de materiais apropriados, a implementação de um sistema de estabilização e controle do comprimento do arco elétrico, se for o caso. No caso das tochas de arco não transferido, a estabilização do arco elétrico pode ser feita por meio de vórtice de gás que forma o plasma. Além disso, para fixar o comprimento do arco, pode ser utilizado um campo magnético gerado por um ou mais solenoides. Neste caso, a parte radial do arco elétrico se desloca axialmente para o lugar onde o campo magnético é maior. Além do mais, a interação entre o campo magnético e a corrente do arco elétrico produz a força motriz que desloca o arco tangencialmente, evitando o posicionamento da mancha do arco em um ponto fixo, diminuindo, assim, a erosão (desgaste) do eletrodo (ESSIPTCHOUK et al, 2009).

Os materiais aplicados em tochas de plasma, em especial aqueles expostos ao arco elétrico, são submetidos a elevado gradiente térmico e erosão no local de fixação do arco elétrico. Propriedades como calor específico, temperatura de fusão, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica, função trabalho e resistividade elétrica, devem ser

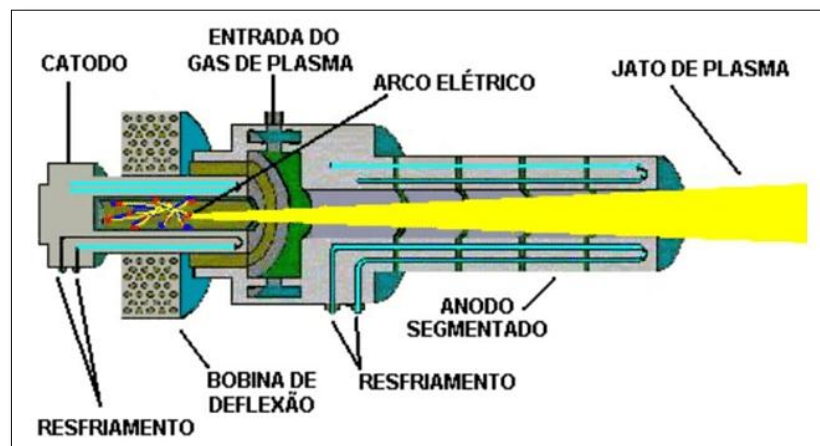
consideradas na escolha destes materiais (CALIARI, 2016).

### 3.5.1 Plasma por Arco Não Transferido

Plasma por arco não transferido de corrente contínua consistem de um eletrodo de metal com boa função de trabalho que serve como catodo (emissor de elétrons) e um corpo anular de cobre que atua como coletor ou anodo, o arco se forma entre estes eletrodos. O anodo anular de cobre possui canais de circulação de água de refrigeração. Um fluxo de gás envolve a superfície do eletrodo (geralmente argônio ou nitrogênio), confinando e estabilizando a área de contato do arco em pontos da superfície metálica (MENEZES et al, 1999).

Na Figura 4 é apresentado um diagrama da construção para tochas de arco não transferido, na qual ambos os eletrodos são posicionados no interior da tocha. Sendo assim o arco elétrico se mantém confinado no canal de descarga e o jato de plasma gerado não transporta corrente elétrica (ZHUKOV et al., 2007).

**Figura 4** - Diagrama esquemático de uma tocha linear de arco não transferido.



Fonte: Adaptado de ZHUKOV et al, 2007.

### 3.5.2 Plasma por Arco Transferido

Plasmas por arco transferido possuem um dos eletrodos externo ao catodo, por onde se estende o arco desde o eletrodo interno (ZHUKOV et al, 2007) (Figura 5). Sistemas de arco transferido são particularmente empregados em fornalhas para fusão, o gás injetado em

torno do eletrodo serve para estabilizar o arco, uma vez que este modo de acoplamento direto ao material fundido assegura alta eficiência térmica no processo (MENEZES et al, 1999).

Há dois tipos de geração do arco transferido:

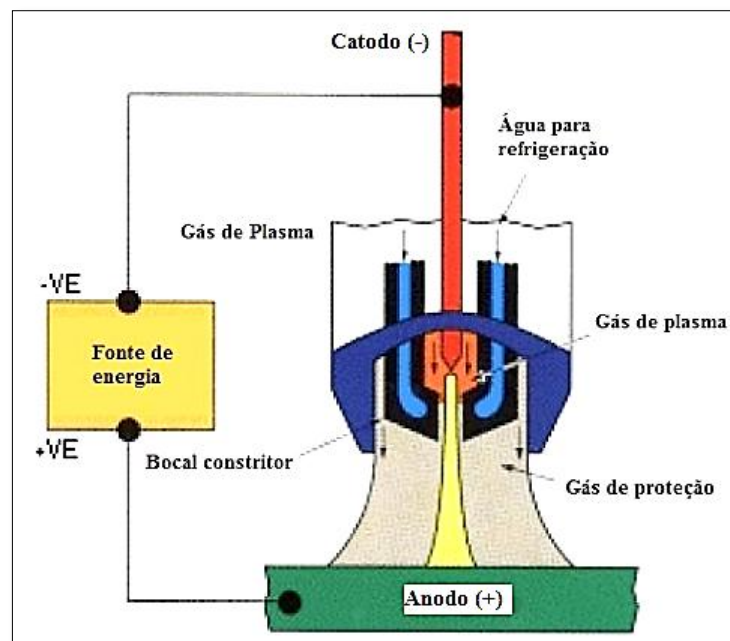
- Tochas simples com um eletrodo polarizado e outro (aterrado) sendo uma peça no equipamento ou o próprio material a ser fundido;
- Tochas geminadas utilizando um eletrodo polarizado e outro eletrodo aterrado para onde o arco é direcionado diretamente ou por meio da massa sob aquecimento.

Estes sistemas de geração podem ser de polaridade direta (o eletrodo emissor é o catodo) ou inversa, dependendo da aplicação particular.

Quanto ao material dos eletrodos, as tochas que geram arco simples ou geminadas podem ser feitas de metal, com refrigeração a água, ou tarugos de grafite. Para a ignição do arco elétrico, normalmente são utilizados ignitores de alta tensão ou se estabelece inicialmente um curto circuito entre os eletrodos, afastando-os gradualmente após a polarização elétrica. (MENEZES et al, 1999).

Como exemplificado na Figura 5, devido ao transporte de corrente elétrica no jato de plasma gerado, a configuração de arco transferido forma jatos de plasma de elevada entalpia, quando comparado a tochas de arco não transferido (ZHUKOV et al, 2007).

**Figura 5** - Diagrama esquemático de uma tocha linear de arco transferido.



Fonte: Adaptado de ZHUKOV et al, 2007.



Neste trabalho para simplicidade, é empregado um eletrodo de grafite como catodo da descarga. O arco fecha diretamente sobre um cadinho confeccionado em material compósito a base de carbono que atua como anodo (aterrado) e que contem o volume de resíduo simulado. O emprego de eletrodo de grafite possui as vantagens de fácil operação, construção, baixo custo e ignição do arco e também permite operação com máxima eficiência térmica, ou seja, máxima conversão da energia elétrica em calor (energia térmica) e possibilidade de operar em mais baixas potências, evitando menores tempos de tratamento, mas estas são características que têm forte dependência com o volume do reator, com o volume de resíduos e com a taxa de alimentação de resíduos. A principal desvantagem é a manutenção de elevadas temperaturas na região de processos que, pelo processo de volatilização dos radioisótopos, intensificam o fluxo de gases na linha de exaustão de gases. Por outro lado, as elevadas temperaturas na região de processos podem reduzir a formação de particulados na linha de exaustão, evitando uma maior contaminação da linha e principalmente conferindo maior tempo de vida aos filtros empregados para assegurar a retenção dos radioisótopos. Adicionalmente, entre os resíduos estabilizados somente sob a ação de alta temperatura, os de maior interesse são os materiais refratários cerâmicos empregados no acondicionamento de rejeitos radioativos e, portanto também contaminados (MOSSE et al, 2008).

### **3.6 Aplicações da tecnologia de plasma térmico**

Os processos a plasma térmico que estão em uso ou sendo desenvolvidos são: recobrimento físico e químico a plasma, síntese de nanopartículas e pós-finos, processamento a plasma, metalurgia a plasma, fonte espectroscópica, densificação de refratários e outros materiais, além das conhecidas máquinas de corte a plasma (BOULOS et al, 1995). Dessas tecnologias a de interesse do presente trabalho é o processamento a plasma.

Os principais atrativos do uso de plasma no processamento térmico de resíduos são (CUBAS, 2004):

- Elevadas temperaturas causam rápida e completa pirólise da substância orgânica, assim como fundem e vitrificam a parte inorgânica;
- Alta densidade de energia possibilita a construção de reatores de pequenas dimensões, também favorece a construção de unidades móveis;

- O emprego de energia elétrica reduz a vazão total de gás resultando em instalações menores para processamento dos gases provenientes da exaustão. O grande número de opções de gases para geração do plasma torna flexível o controle sobre fatores químicos do processo;
- Com instalações menores e alta densidade de energia, os tempos de partida e paradas são reduzidos.

O plasma pode ser aplicado no tratamento de diversos tipos de resíduos, incluindo os rejeitos radioativos, podendo ser aplicado diretamente nos resíduos, nas cinzas ou nos gases resultantes da incineração (IWAO et al, 2000). O desenvolvimento do processamento por plasma térmico para eliminação de resíduos começou nos EUA, Europa e Japão na década de 1980. Agora, mais de 150 gaseificadores industriais são usados, principalmente no processamento de resíduos urbanos (DUCHARME, 2010). A Tabela 4 mostra algumas instalações de plantas para tratamento de resíduos a plasma térmico em diversas localidades.

**Tabela 4** - Principais plantas de tratamento de resíduos por plasma térmico em operação no mundo ou projetos.

Localização	Resíduo	Capacidade	Data de comissionamento
<b>América do Norte</b>			
Anniston, Alabama	Conversor catalítico	24 t/dia	1985
Libby, EUA	RSU	45 t/dia	1987
Jonquiere, Canadá	Escória de alumínio	50 t/dia	1991
Honolulu, Havaí	RSS	1 t/dia	2001
Bristol, EUA	RSU	4,5 t/dia	2001
Montreal, Canadá	RSU	2,5 t/dia	2001
Richland, Washington	RP	4 t/dia	2002
Alpoca, W. Virgínia	Militar	10 t/dia	2003
Marinha EUA	Resíduo a bordo	7 t/dia	2004
Monterrey, México	RSU	33000 t/ano	2005
Hawthome, Nevada	Militar	10 t/dia	2006
Madison, Pensilvânia	RCD	18 t/dia	2009
Los Angeles, EUA	Biomassa	18 t/dia	2009
Hurlburt Field, EUA	RSS/RSI/RP	10,5 t/dia	2011
Quebec, Canadá	RLI	1,2 t/dia	2013
Ottawa, Canadá	RSU	85 t/dia	Em projeto
Port Hope, Canadá	RSU/ CDP	400 t/dia	Em projeto
Tallahassee, EUA	RSU	910 t/dia	Em projeto

<b>América do Sul</b>			
Rio de Janeiro, Brasil	RSS	32 t/dia	Em projeto
<b>Europa</b>			
Landskrona, Suécia	Cinzas volantes	200 t/dia	1983
Bordéus, França	Cinzas do RSU	10 t/dia	1998
Moscou, Rússia	RBMN	40 kg/h	1998
Morcenx, França	Amianto	22 t/dia	2001
Kędzierzyn, Polónia	RSI	10 t/dia	2001
Bergen, Noruega	Resíduo de curtume	15 t/dia	2001
Würenlingen, Suíça	RBMN	300 kg/h	2004
Swindon, Inglaterra	RSU	91 t/ ano	2008
Morcenx, França	RSI/Biomassa	137 t/dia	2012
Hirwaun, País de Gales	RSU/RSI	750 t/dia	2015
Kozloduj, Bulgária	RBMN	685 kg/dia	Em projeto
Sunderlan, Inglaterra	RSI/Biomassa	107 t/dia	Em projeto
Hull, Inglaterra	RSI/Biomassa	107 t/dia	Em projeto
Barrow, Inglaterra	RSI/Biomassa	107 t/dia	Em projeto
Barry, País de Gales	RSI/Biomassa	107 t/dia	Em projeto
Bélgica	RSU/RSS/RP	246 t/dia	Em projeto
Swindon, Inglaterra	RSU	–	Em projeto
<b>Ásia</b>			
Kinura, Japão	Cinzas do RSU	50 t/dia	1995
Yongin, Coreia	Cinzas do RSU	14 t/dia	1997
Yoshi, Japão	RSU	151 t/dia	1999
Mihama-Mikata, Japão	RSU/Lodo	28 t/dia	2002
Utashinai, Japão	RSU/Sucata	300 t/dia	2002
Shimonoseki, Japão	Cinzas do RSU	41 t/dia	2002
Imizu, Japão	Cinzas do RSU	12 t/dia	2002
Kakogawa, Japão	Cinzas do RSU	31 t/dia	2003
Maizuru, Japão	Cinzas do RSU	6 t/dia	2003
Lizuka, Japão	RSI	10 t/dia	2004
Tainan, China	RSI/RP	5 t/dia	2005
Taipei, China	RSS/RP	4 t/ dia	2005
Zigong, China	RP	3 t/ dia	2006
Osaka, Japão	PCBs	4 t/dia	2006
Hiemji, Japão	Cinzas do RSU/PCBs	5 t/ dia	2006
Taiwan, China	RBMN	250 Kg/h	2006

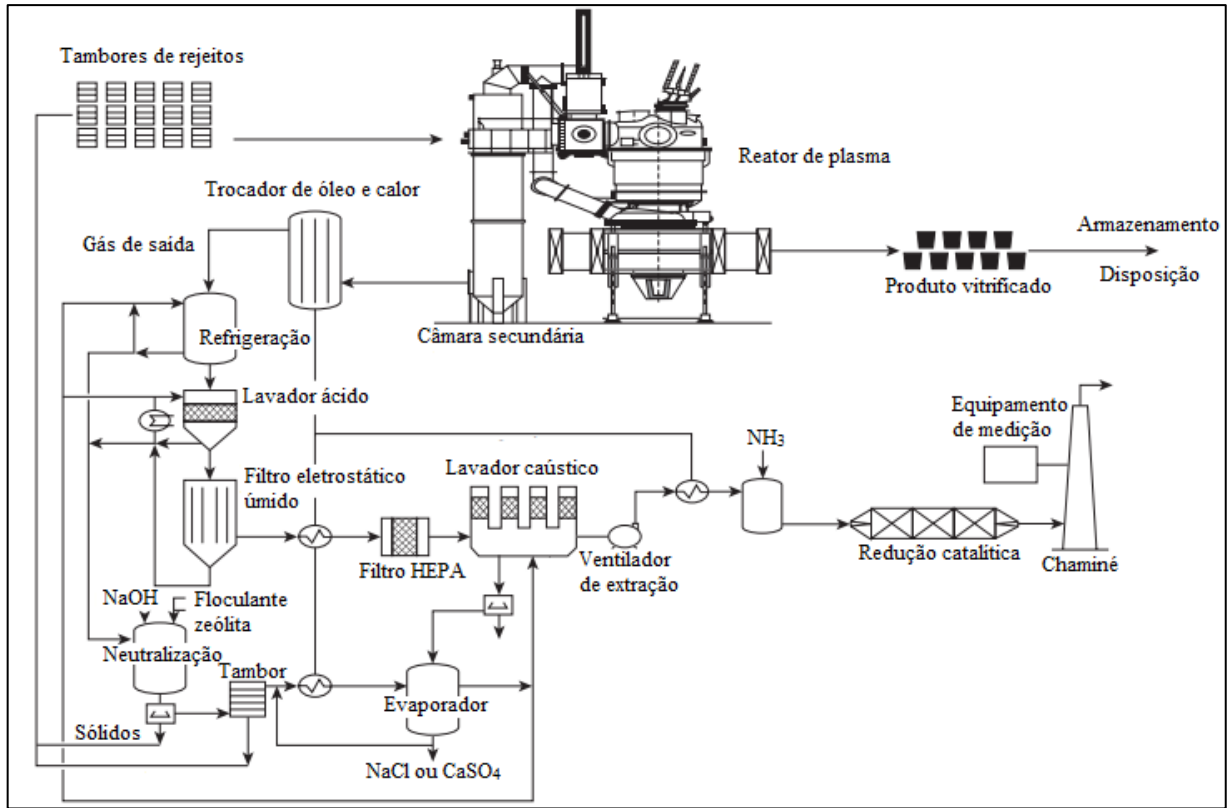
Kaohsiung, China	RSI/RP	20 Kg/h	2007
Cheongsong, Coreia	RSU	10 t/ dia	2008
Liquan, China	POPs/RSS	5 t/ dia	2008
Pune, Índia	RP	68 t/dia	2009
Nagpur, Índia	RP	68 t/dia	2010
Taichung, China	RSI/RP	60 Kg/h	2011
Shanghai, China	RSS	60 Kg/h	2013
Sganghai, China	RSS	30 t/dia	2014
Dongguan, China	RSU	30 t/dia	2016
Shenzhen, China	RSU/RP	9000 t/ano	2019
Bijie, China	RSU	600 t/dia	Em projeto
Beijing,China	RSU	200 t/dia	Em projeto

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos; RP – Resíduos Perigosos; RSI – Resíduos Sólidos Industriais; RSS – Resíduos de Serviço de Saúde; RCD – Resíduo da Construção Civil e Demolição; RLI – Resíduos Líquidos Industriais RBMN – Rejeitos de baixo e médio níveis de radiação; PCBs – Bifenilas Policloradas; POPs – Poluentes Orgânicos Persistentes; CDP – Combustíveis Derivados de Pneu.

Fonte: (LI et al, 2016; YAZICIOĞLU et al, 2017; FABRY et al, 2013; STANTEC, 2011).

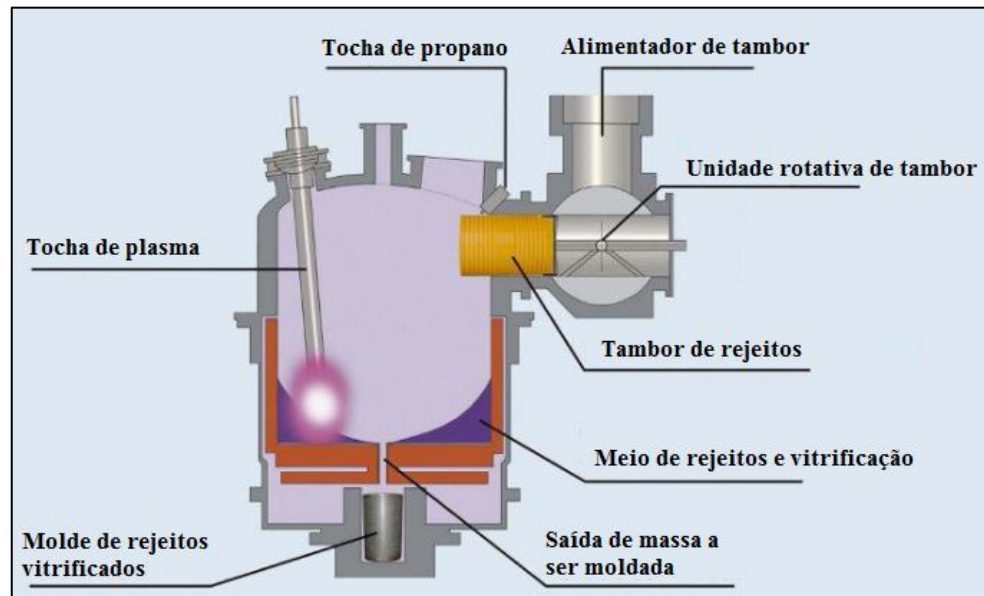
A primeira planta experimental de plasma térmico para tratamento de rejeito radioativo de baixo e médio níveis de radiação chamada “Pluton” foi comissionada pela SIA RADON, em Moscou na Rússia. A planta operou com uma taxa de processamento de rejeitos de 40 kg/h entre os anos de 1998 a 2001 (IAEA, 2006). A primeira planta industrial de larga escala foi desenvolvida e instalada pela ZWILAG no início de 2004, na cidade de Würenlingen (Suíça). A capacidade máxima da instalação é de 300 Kg/h de rejeitos radioativos. Os princípios do processamento e o reator de processo são mostrados na Figura 6 e na Figura 7 (DECKERS, 2011).

**Figura 6** - Diagrama de processo a plasma térmico de rejeitos radioativos da ZWILAG, Suíça.



Fonte: (DECKERS, 2011).

**Figura 7** - Reator de processo da ZWILAG.



Fonte: (ZWILAG, 2019).

Observa-se que a planta da Zwilag permite a alimentação direta dos tambores de acondicionamento dos resíduos (sólidos ou líquidos). Os tambores são pré-aquecido por uma tocha de propano para auxiliar na eficiência térmica do processo de tratamento. Adicionalmente, resíduos líquidos podem ser atomizados ou vaporizados diretamente na região de processos utilizando sistemas de bicos injetores de alta pressão. Note também, que a escória fundida escorre para um molde onde é refrigerada e vitrificada.

Em 2013, a JV IBERDROLA/BELGOPROCESS com a MONTAIR PROCESS TECHNOLOGY começou a construção de outra instalação de plasma em larga escala para o tratamento de rejeitos de baixo e médio nível de radiação na cidade de Kozloduy, na Bulgária. Atualmente, a planta de plasma está em fase de testes. A instalação consiste em um reator de plasma equipado com uma tocha de arco não transferido de 500 kW como fonte de calor e tem capacidade de processar 250 toneladas por ano, distribuídas por 40 semanas operacionais. (DECKERS, 2010; DECKERS, 2011).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Amostras de rejeitos

Neste estudo, foi utilizado um rejeito simulado não radioativo, a partir do rejeito sólido fornecido pelo Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos - SEGRR do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, os quais são constituídos tipicamente pelos materiais listados na Tabela 5. O uso do rejeito simulado tem a finalidade de evitar a dose associada ao rejeito real nos ensaios experimentais e também a impossibilidade de utilizar material radioativo no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), bem como evitar geração de maior volume de rejeitos radioativos.

No desenvolvimento desse trabalho foram empregadas amostras de rejeitos sólidos compactáveis (RC) e não compactáveis (RNC) que ocupam a maior parte dos depósitos de armazenamento do IPEN.

**Tabela 5** - Relação dos materiais que compõe os rejeitos sólidos utilizados neste trabalho.

Rejeito compactável	Rejeito não compactável
Papel	Metal
Plástico	PVC
Luva	Vidro
Tecido	Madeira

**Fonte:** Autor da dissertação.

Os rejeitos foram transportados para o Laboratório de Plasmas e Processos - LPP do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. Em seguida, todos os materiais tiveram suas massas determinadas, homogêneos em recipiente de 5 litros por meio de agitador mecânico composto por um conjunto de hélice e haste de aço inoxidável e separados em frações de aproximadamente 250 cm<sup>3</sup> para processamento.

## 4.2 Isótopos estáveis

Com o propósito do estudo sistemático de operação do reator a plasma térmico e da investigação dos produtos do processo de tratamento de rejeitos radioativos sólidos a plasma térmico, as amostras antes de serem processadas foram contaminadas com isótopos estáveis, nas formulações CsCl,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  e do Pb granulado 99,99% puro. Para cada amostra a quantidade em massa de  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{59}\text{Co}$  e  $^{207}\text{Pb}$  foi 0,5697g, 0,7894g e 5g, respectivamente. Na Tabela 6 estão relacionadas as propriedades físicas e químicas dos elementos empregados.

**Tabela 6** - Características físicas e químicas dos isótopos estáveis empregados neste trabalho.

Isótopo	Cs	Co	Pb
Massa atômica (u)	132,90	58,93	207,20
Densidade ( $\text{Kg/m}^3$ )	1879	8900	11340
Temperatura de fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	28,45	1494,85	327,46
Temperatura de ebulição ( $^{\circ}\text{C}$ )	670,85	2926,85	1748,85

Fonte: (LIDE, 2005)

## 4.3 Métodos de Análises

Os métodos de análises adotados no presente trabalho para a caracterização das amostras, como também dos produtos obtidos após tratamento térmico a plasma, são listados na Tabela 7. Para análise dos gases na linha de exaustão, foram instalados filtros de amostragem modelo FP2000 da HI-Q Whatman confeccionados com meio filtrante de fibra de vidro e fabricado com 100% de fibras de vidro micro-finas de borosilicato. As fibras são resistentes ao calor e só começam a amolecer a mais de  $600^{\circ}\text{C}$  e estabelecida uma eficiência de retenção de partículas monomoleculares de tamanho de 0,3 micron.



**Tabela 7** - Análises efetuadas para a caracterização das amostras.

Métodos	Amostras			
	RC	RNC	Escória	Filtro de amostragem
<b>Análise Física</b>				
Massa específica aparente	X	X	X	-
Volume aparente	X	X	X	-
Termogravimetria	X	X	-	-
<b>Análise Química</b>	-	-	X	X
Espectrometria de fluorescência de raios X	-	-	X	X

\*RC: rejeito compactável; \*RNC: rejeito não compactável.

Fonte: Autor da dissertação.

#### 4.3.1 Massa específica aparente

A massa específica aparente das amostras e escórias foi determinada por meio de uma balança eletrônica Marte, modelo AD2000, com capacidade de 2010 g, precisão de 0,01 g, com microprocessador e tara subtrativa em toda a escala.

#### 4.3.2 Volume aparente

O volume aparente das amostras de rejeito foi calculado de acordo com o volume do cadinho de grafite. Após processamento, o produto sólido do tratamento de rejeito compactável (escória) na forma de pó foi inserido numa proveta graduada e a mesma foi nivelada levemente até apresentar aparência uniforme, sem alteração de volume. E para a escória de rejeito não compactável, de forma amorfa, numa proveta graduada foram adicionados 100 mL de água ( $v_i$ ). Em seguida foi inserida a escória. O volume final ( $v_f$ ) foi subtraído do valor inicial e calculado sua variação ( $\Delta v$ ) que é igual ao volume de escória ( $V_e$ ) como mostrado na Equação 1.

$$V_e = \Delta v = v_f - v_i \quad (1)$$

### 4.3.3 Termogravimetria

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica de análise térmica em que a variação de massa da amostra (perda ou ganho de massa) é determinada em função da temperatura e/ou tempo, quando a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura (SEYE et al, 2000). O comportamento de mudança da massa das amostras de rejeitos sólidos foi avaliado em ensaios termogravimétricos utilizando-se um analisador térmico simultâneo STA 449 F3 Jupiter®. Os ensaios foram realizados com razão de aquecimento de 10°C/min até 750°C, sob atmosfera dinâmica de ar sintético com vazão de 40 ml/min.

### 4.3.4 Espectrometria de fluorescência de raios X

Para identificar e quantificar a concentração da presença dos isótopos estáveis nas escórias, água do lavador e no filtro do amostrador de gás foi utilizada a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda, em equipamento da marca Bruker, modelo S8 Tiger/Software Spectra Plus 2.4.0.8, instalado no laboratório de caracterização de materiais do Centro do Combustível Nuclear (CCN) no IPEN.

A análise por fluorescência de raios X é um método quali-quantitativo baseado na medida das intensidades (número de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Os raios X emitidos por tubos de raios X, ou raios X ou gama por fonte radioativa, excitam os elementos que constituem, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra (NAGATA et al., 2001).

Quando um elemento de uma amostra é excitado, este tende a ejetar os elétrons do interior dos níveis dos átomos, e como consequência disto, elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron, e esta energia é emitida na forma de um fóton de raios X, de energia característica e bem definida para cada elemento. Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a

amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios X (SANTOS et al, 2013).

#### 4.4 Relação Massa – Atividade

Por meio dos resultados da espectrometria de fluorescência de raios X, foi possível identificar os elementos traçadores e suas respectivas concentrações em massa para cada produto do processo e deste modo estimar a atividade utilizando a Equação 2.

$$A = \lambda . N \quad (2)$$

Onde:

A: atividade em (Bq)

$\lambda$  : constante de desintegração

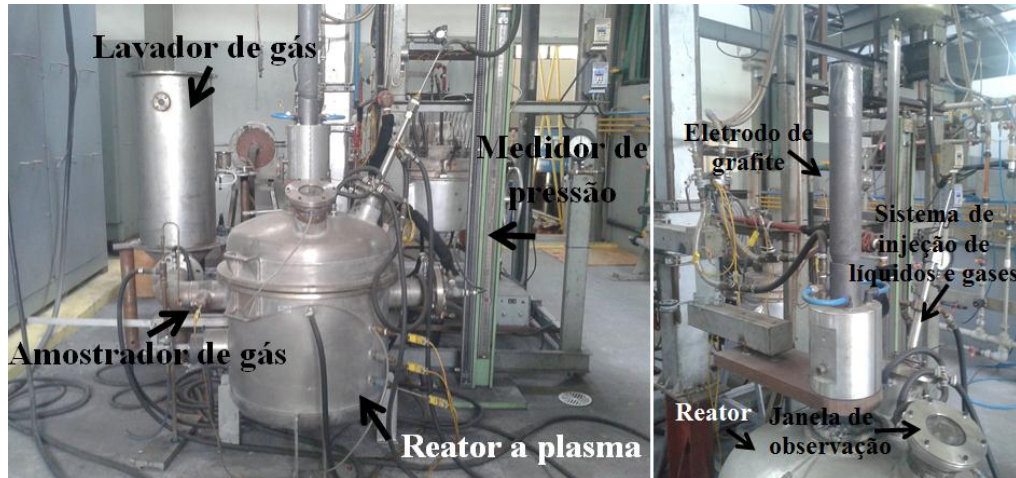
N: número de núcleos radioativos

A estimativa da atividade é o número de desintegrações nucleares que ocorrem por unidade de tempo em uma quantidade de substância radioativa, no caso para os produtos (gases e sólidos).

#### 4.5 Aparato Experimental

Na Figura 8 é apresentada a disposição do sistema experimental de processo de rejeitos radioativos simulados compactáveis e não compactáveis a plasma térmico. Em detalhe na imagem do lado direito o eletrodo de grafite em operação.

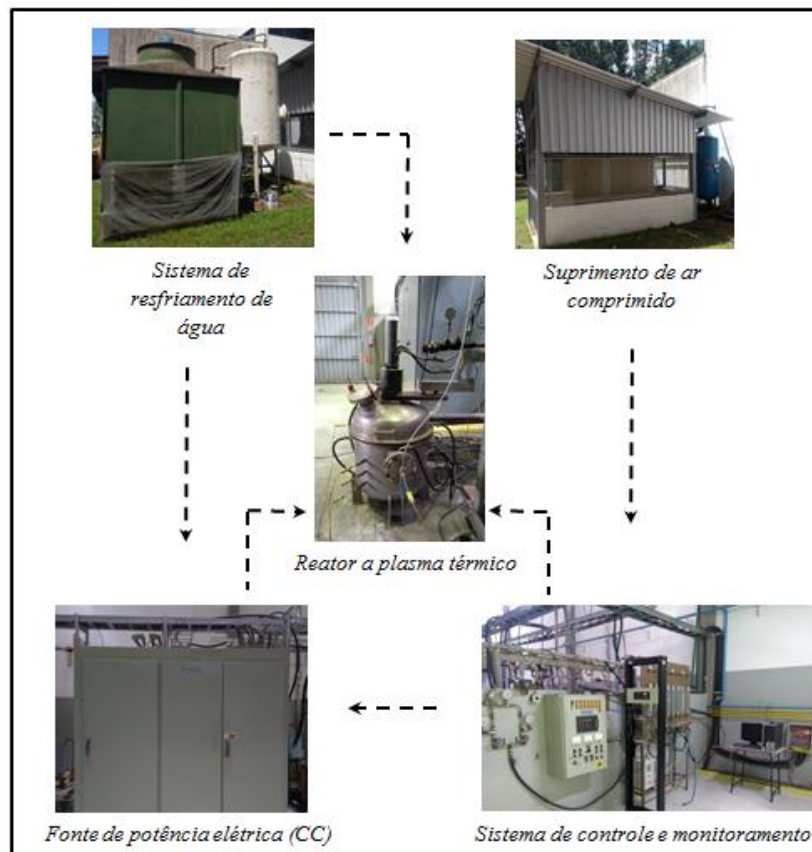
**Figura 8** - Sistema experimental de processo de rejeitos a plasma térmico.



Fonte: Autor da dissertação.

A infraestrutura básica do LPP/ITA apresentada na Figura 9 alicerça toda a montagem e operação do reator.

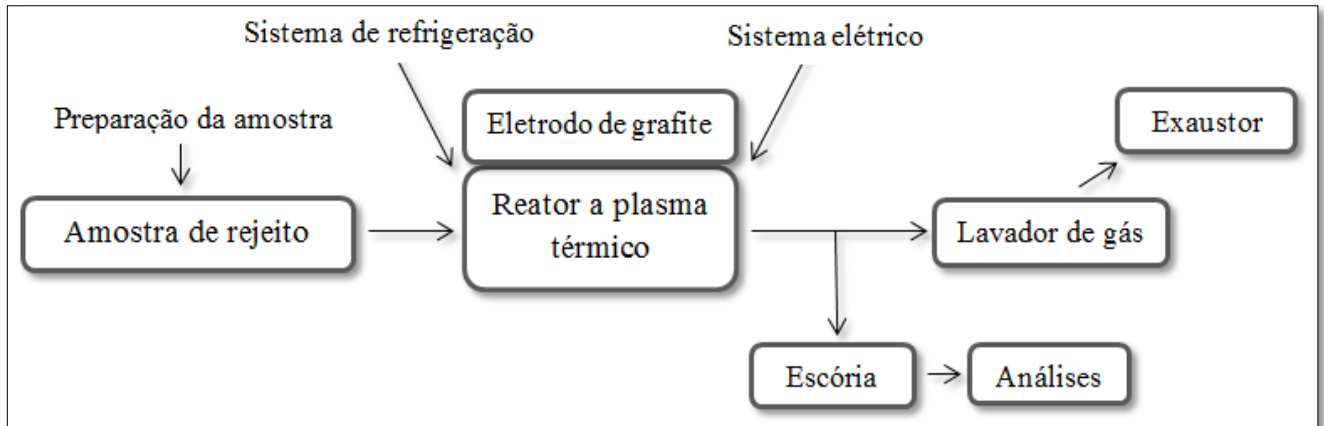
**Figura 9** - Diagrama esquemático dos sistemas para ensaios de processamento de rejeitos a plasma.



Fonte: Autor da dissertação.

O sistema de ensaios de tratamento a plasma basicamente é apresentado segundo o diagrama da Figura 10, onde a seção principal é o reator de processo.

**Figura 10** - Diagrama de processamento de rejeitos a plasma.

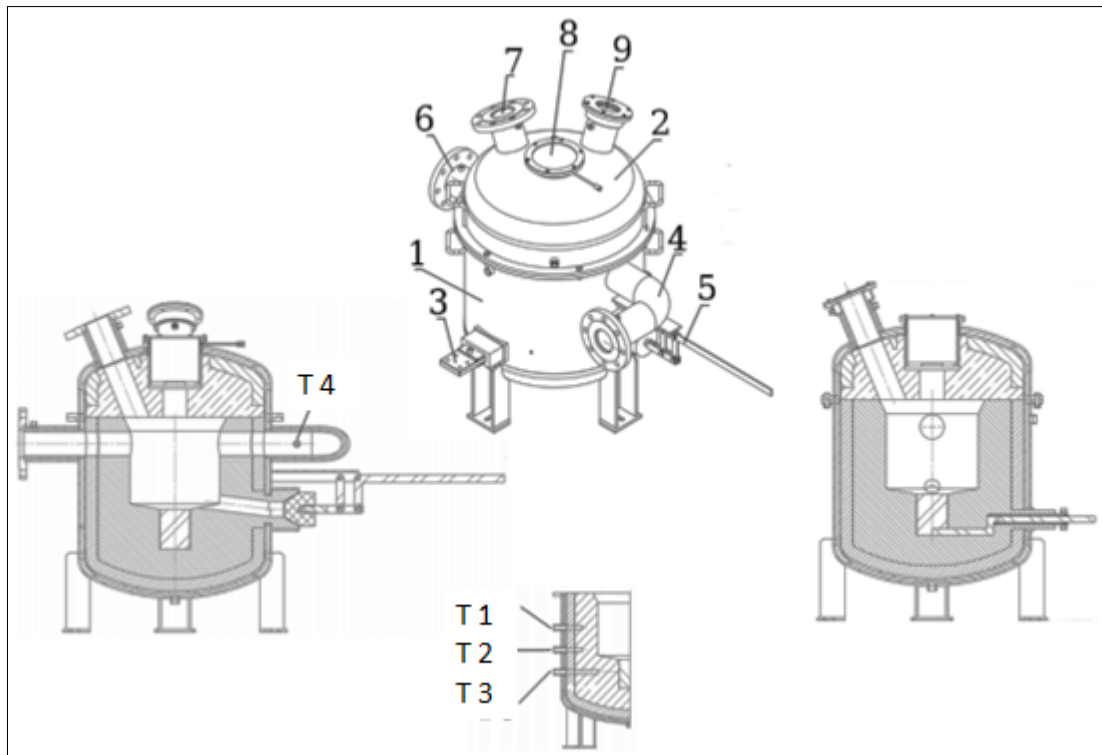


Fonte: Autor da dissertação.

O reator possui geometria cilíndrica e câmara interna de reação (1) com volume útil de 27 litros apresentado em detalhes na Figura 11. A tampa (2) na parte superior do reator é móvel e possui uma flange central (8), onde é feito o acoplamento do eletrodo de grafite, um visor com uma janela de vidro borossilicato (9) e outras duas flanges (6) e (7) para acoplamento de algum outro equipamento. O reator possui um eletrodo de fundo anodo (3) para a operação em regime de arco elétrico transferido. Sobre o fundo do reator (anodo) é mantida uma camada de metal (sucata) que é fundida durante a operação formando um banho metálico líquido, que protege o fundo do reator do contato direto com o arco elétrico. A exaustão dos gases de processo é feita através da flange (4). Um sistema de vazamento de escória (5) no fundo do reator permite o descarregamento de material fundido caso seja necessário. O reator é fabricado em aço inoxidável, possui paredes duplas refrigeradas com água, além de revestimento interno de material refratário, que constitui as paredes da câmara de reação. Na Figura 11 são indicados os pontos de medição de temperatura no reator (T1, T2, T3 e T4) para o controle do processo. Os valores de T1, T2, T3 e T4 correspondem respectivamente, a temperatura da parede externa do reator, a temperatura do material

refratário, a temperatura relativa da parede interna do reator e a temperatura na saída dos gases de exaustão do reator. Todas as partes de união a qual compreende corpo principal e tampa do reator, flanges incluindo o acoplamento da tocha, são vedadas com manta cerâmica para alta temperatura.

**Figura 11** - Desenhos esquemáticos, vista externa e interna, do reator de processo.



Fonte: Autor da dissertação.

O eletrodo de grafite é montado em um braço mecânico (elevador) que possibilita a sua movimentação vertical e ajuste do comprimento de arco elétrico, controlado por meio de um inversor de frequência. Este mecanismo possibilita a fácil introdução do eletrodo no reator pela flange (8) e também possui articulação para movimentação horizontal.

O reator é ligado a um sistema simples de lavagem de gases (lavador de gases) por meio de uma tubulação de aço inoxidável de 8 cm. O lavador de gases possui geometria cilíndrica com dimensões de 0,49 m de diâmetro por 1,20 m de altura, onde os gases de processo são conduzidos em contra fluxo com a água de lavagem aspergida por um chuveiro interno no topo do lavador. A água de lavagem flui por gravidade através de uma camada de enchimento, constituída de diversas peças tubulares de cerâmica, enquanto o gás flui por

convecção forçada promovida por um ventilador centrífugo instalado na exaustão do lavador de gases. As diversas cavidades formadas na camada de enchimento aumentam o tempo de residência dos gases e a eficiência de retenção de particulado. Por fim os gases são exauridos para o exterior do laboratório através de uma chaminé. A rotação do ventilador centrífugo é controlada por um inversor de frequência e tomada como parâmetro para o controle da pressão interna do reator. A partir dos experimentos preliminares foi possível concluir que por questão de segurança de operação, o valor da pressão interna do reator deve ser levemente abaixo do valor da pressão atmosférica, entre 10,0 e 20,0 mm de coluna de água.

No procedimento para ignição no reator, inicialmente o eletrodo é posicionado a 3 cm da parede do cadinho de grafite, e após a ignição, o comprimento do arco elétrico é aumentado de acordo com o regime de operação. Este procedimento é realizado simplesmente distanciando gradativamente o eletrodo de grafite do porta amostra (cadinho) onde fecha o arco. A relação direta do comprimento do arco com a tensão de descarga permite estabelecer ou variar a potência elétrica de descarga (BOULOS et al, 1995). O sistema de aquisição de dados somente é ligado aos pontos de medição e acionado após a ignição do eletrodo e estabelecimento da condição normal de operação.

#### **4.6 Procedimento Experimental**

A parte experimental do presente trabalho constituiu-se de uma série de experimentos preliminares de tratamentos térmicos dos rejeitos sólidos, visando a sua redução volumétrica, além de estudar os produtos obtidos no processo (gases e sólidos de produção). O roteiro esquemático da evolução do trabalho encontra-se descrito a seguir, sendo que as etapas preliminares se constituíram de experimentos para a avaliação e definição das condições adequadas para o tratamento térmico. Os materiais e condições operacionais empregados são listados na sequência:

- Parâmetros de processamento
- Fluxo de ar comprimido variando de 30 a 150 litros/hora;
- Fluxo de água de resfriamento do reator variando de 600 a 1500 litros/hora;
- Fluxo de água do lavador de gases entre 30 a 150 litros/hora;
- Rotação do ventilador centrífugo entre 10 a 25 m/s;

- Potência média de operação da tocha de plasma variando de 10 kW a 15 kW;
- Tempo de processo de 5 a 60 min.
  - Recipiente (Porta amostras)
- Cadinho de cerâmica de 60 mm de diâmetro interno e 50 mm de altura (posição vertical);
- Cadinho de concreto de 100 mm de diâmetro interno e 130 mm de altura (posição vertical);
- Cadinho de grafite de 63 mm de diâmetro interno, 81 mm de altura e espessura da parede de 10 mm (posição vertical);
- Cadinho formado por compósito de matriz de carbono reforçado com fibra de carbono (C/C) de 63 mm de diâmetro interno, 81 mm de altura e espessura da parede de 50 mm (posição vertical).
- Filtro de amostragem de gás
- Filtro de papel de alta pureza de 37 mm de diâmetro;
- Filtro de fibra de vidro e papel de 37 mm de diâmetro;
- Filtro de 100% de fibras micro-finas de borosilicato de 37 mm de diâmetro;

De acordo com os experimentos preliminares realizados, foram definidos os seguintes parâmetros e materiais operacionais:

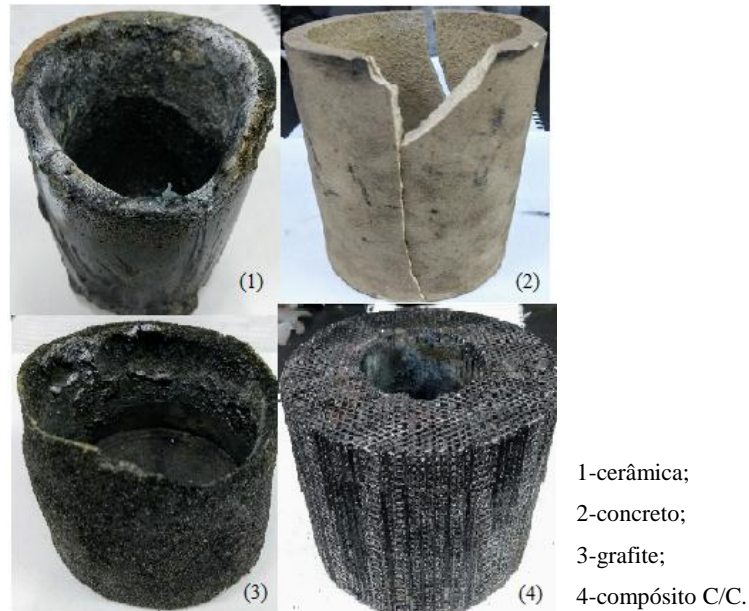
- Fluxo de ar comprimido fixado em 120 litros/hora. De acordo com o compressor utilizado, este foi o fluxo ideal para não movimentar as amostras no interior do reator e de melhor parametrização dos sinais de corrente e tensão da tocha de plasma (maior estabilidade do arco elétrico);
- Fluxo de água de resfriamento do reator de 900 litros/hora. Fluxo mínimo suficiente para resfriamento da parede do reator;
- Fluxo de água do lavador de gases de 60 litros/hora. Fluxo mínimo suficiente para lavagem do gás de acordo com as normas técnicas do fabricante;
- Velocidade do ventilador centrífugo de 18 m/s, para segurança de operação. Esta velocidade mantém a pressão interna do reator levemente abaixo da pressão atmosférica local;
- Potência média de operação de 10 kW. Potência ideal para manter a integridade do cadinho;
- Tempo máximo de processamento de 30 min. Tempo suficiente para obter o fator máximo de redução de volume, de acordo com a potência média de operação.



- Recipiente formado por compósito de matriz de carbono reforçado com fibra de carbono (C/C) de 63 mm de diâmetro interno, 81 mm de altura e espessura da parede de 50 mm (posição vertical), comprovou ter maior resistência e menor taxa de degradação ao processo;

Quatro condições nos experimentos preliminares após processamento a plasma térmico foram observadas, as quais estão representadas na Figura 12.

**Figura 12** - Representação da degradação dos cadinhos após processamento a plasma térmico.



Fonte: Autor da dissertação.

Nos experimentos foi utilizado um cadinho (porta amostras) confeccionado em compósito de Carbono/Carbono reforçado com fibra de carbono (C/C) de 63 mm de diâmetro interno, 81 mm de altura e espessura da parede de 50 mm. Conforme os ensaios preliminares, este cadinho apresentou maior resistência ao processo comparado aos outros materiais, ainda assim nas condições de ambientes oxidantes a elevadas temperaturas, sofre intensa degradação devido à elevada catalicidade de reações entre o carbono e o oxigênio.

- Filtro de 100% de fibras micro-finas de borosilicato de 37 mm de diâmetro, apresentou maior resistência à elevada temperatura do gás de exaustão;

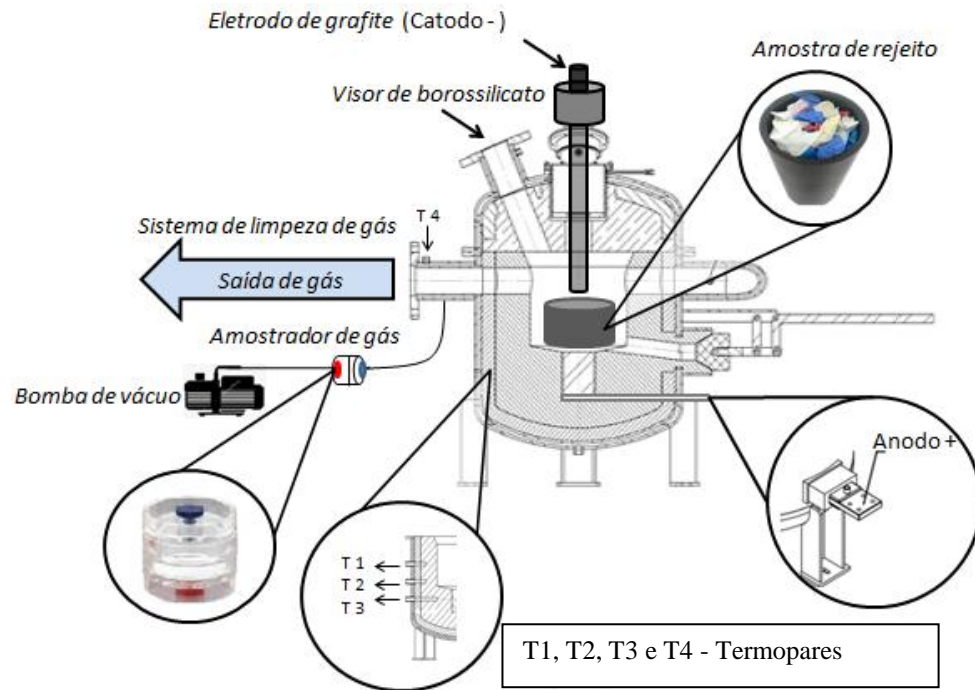
Definidos os parâmetros de processamento do tratamento térmico, as amostras de rejeitos sólidos foram processadas termicamente em função do tempo até se obter a redução máxima de volume. Os experimentos com rejeitos não compactáveis acima de 30 minutos tiveram como objetivo verificar a estabilidade da variação de redução volumétrica.

Todas as amostras obtidas durante a evolução do trabalho foram devidamente

codificadas com as siglas dos respectivos rejeitos, seguidas do tempo em que foram submetidas termicamente e finalmente caracterizadas. Com a definição do tempo de processamento foi possível adequar o sistema de tratamento térmico a plasma de rejeitos sólidos, foram efetuados experimentos para a análise dos produtos obtidos no processo. Foram reproduzidas as condições de processo em função do tempo de redução máxima de volume (30min).

A Figura 13 apresenta o desenho esquemático do reator de processo, destacando os principais componentes da configuração experimental. As amostras das escórias e filtro de amostragem de gás foram caracterizadas com o propósito de investigar a composição elementar dos produtos do processamento a plasma térmico de RSC e RNC.

**Figura 13** - Desenho esquemático do reator de processo, em detalhe os principais componentes do sistema.



Fonte: Autor da dissertação.

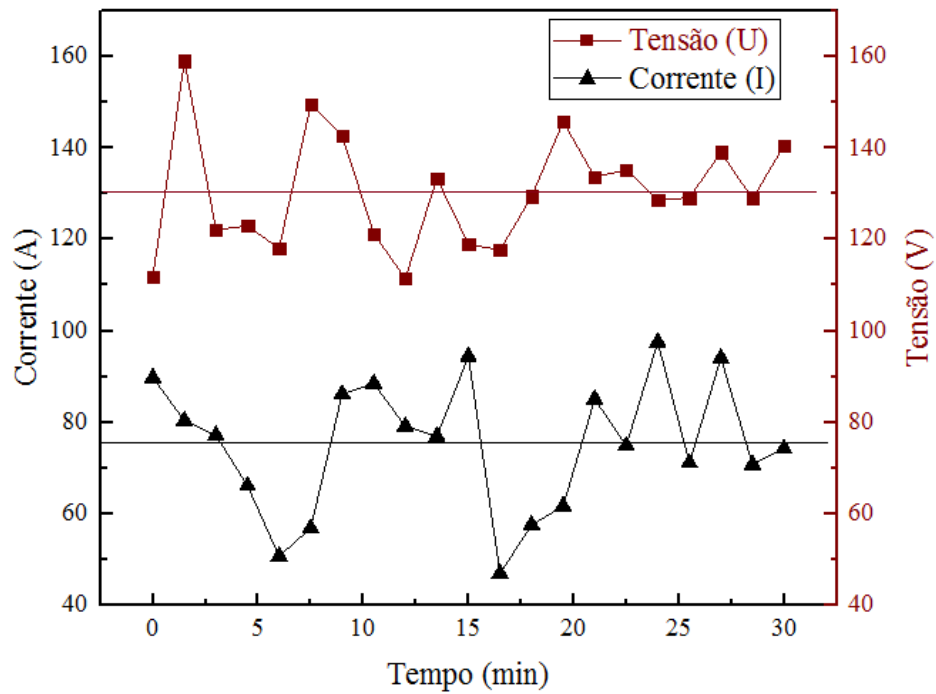
O reator do Laboratório e Plasma e Processos do ITA (LPP/ITA) também permite a alimentação direta de rejeitos líquidos que podem ser injetados diretamente na região de processo utilizando sistemas de bicos injetores de alta pressão. O reator possui também uma saída de escória fundida para o caso de processos contínuos de tratamento.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Análises dos parâmetros de processamento**

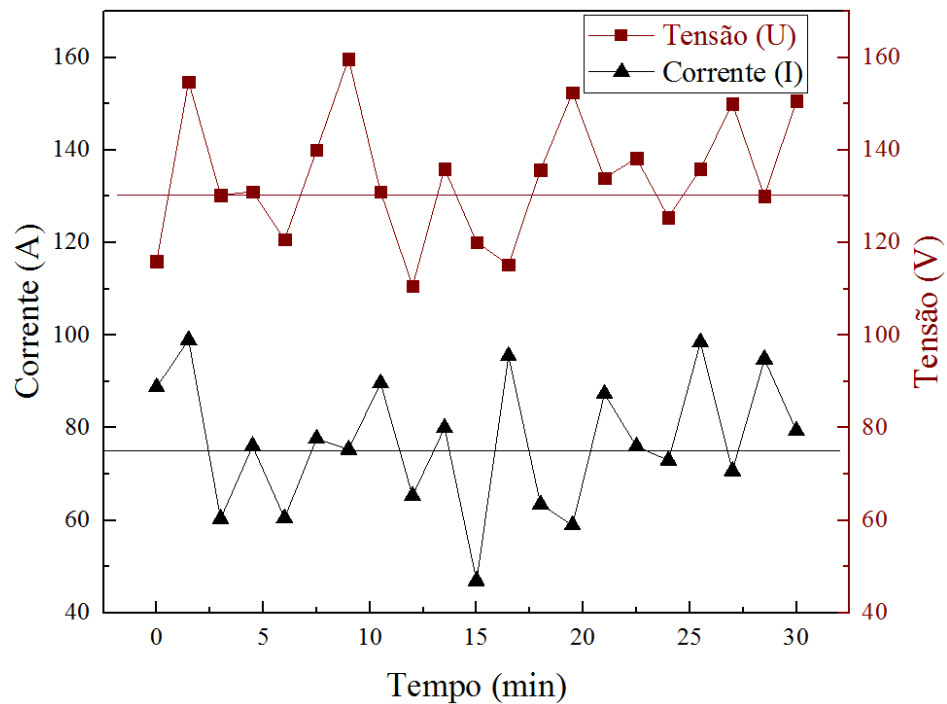
As variações da corrente elétrica (I) e tensão (U) no arco para o processamento de rejeitos sólidos compactáveis e não compactáveis em função do tempo de processo estão apresentadas nas Figuras 14 e 15, respectivamente. A distância entre os eletrodos foi fixada em 20 cm, tendo como referência o fundo do cadinho. Observa-se uma variação de corrente elétrica no arco aproximadamente entre 45 A e 100 A e tensão entre 110 V e 160 V com fluxo de ar comprimido de 120 litros/min. Estas variações ocorrem principalmente pela relação direta da tensão de descarga com o comprimento do arco que varia aleatoriamente durante o processo. Esta variação ocorre porque o arco é fixado na extremidade do eletrodo de grafite, mas fecha em pontos diferentes do cadinho durante o processo. Variações de temperatura na superfície do cadinho e efeitos eletrostáticos de ponta contribuem para a intensificação deste efeito. Com o tempo de processo o arco tende a se estabelecer em regiões mais quentes e emissoras de radiação, como na própria escória fundida no caso de resíduos com elevada fração de elementos metálicos e refratários (BOULOS et al, 1995).

**Figura 14** - Variação temporal dos valores de tensão e corrente elétrica no processamento de rejeitos sólidos compactáveis.



Fonte: Autor da dissertação.

**Figura 15** - Variação temporal dos valores de tensão e corrente elétrica no processamento de rejeitos sólidos não compactáveis.

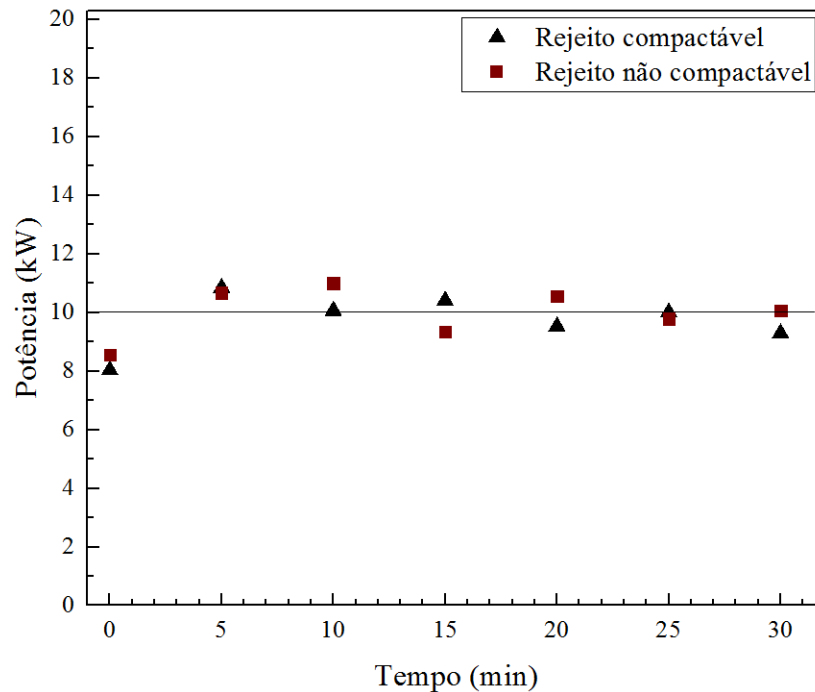


Fonte: Autor da dissertação.

Observa-se que os valores médios de tensão (em torno de 130 V) e corrente pela descarga (em torno de 75 A) não se alteram com o tipo de resíduo. Segundo Guiloufi, o aumento de corrente pela descarga intensifica a velocidade de vaporização e as quantidades volatilizadas dos elementos  $^{60}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$  (GHUILOUFI, 2008; GHUILOUFI 2009). Obviamente o efeito da variação de corrente pela descarga relaciona-se diretamente com a entalpia do arco elétrico, alterando também a temperatura na região de processos (CHARAKHOVSKI, 2017). Sobre estes aspectos, conclui-se que o sistema de geração de plasma deve operar com elevadas potências, visando reduzir o tempo de processo de redução volumétrica para uma dada taxa de alimentação de rejeito, mas também deve ser configurada para operar em mais alta tensão e menores correntes. Devido a este fato, as tochas de plasmas de arco não transferidos são as mais empregadas no tratamento de rejeitos radioativos. Por exemplo, em tochas de plasmas de arco não transferido de vórtice reverso, potências da ordem de 30 kW são obtidas com a tocha operando em tensão da ordem de 300 V e relativamente baixas correntes da ordem de 100 A (ESSIPTCHOUK, 2009).

Na Figura 16 é apresentado o comportamento da potência de descarga em função do tempo de tratamento para o processamento de rejeitos compactáveis e não compactáveis.

**Figura 16** - Variação da potência elétrica aplicada à tocha de plasma em função do tempo de processo.

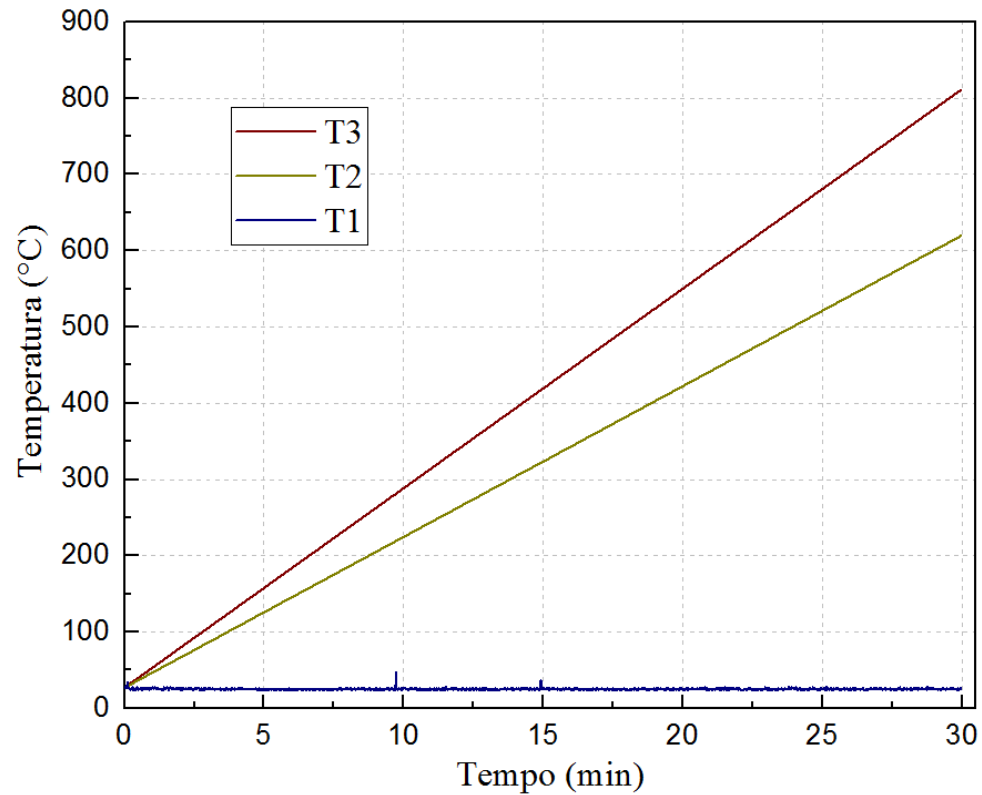


Fonte: Autor da dissertação.

Embora a faixa de variação de corrente e tensão seja relativamente expressivas os valores de potência de operação da descarga flutuam entre 8 e 11 kW somente, com um valor médio muito próximo de 10 kW, principalmente para tempos de processo acima de 5 min. A tendência é que estas flutuações sejam reduzidas à medida que se estabelece uma menor variação de temperatura na região de processos. A termalização do reator é sempre desejável em processo de tratamento, pois além de reduzir as variações de tensão e corrente pelo arco, também uniformizam o tratamento, tornando as análises mais reprodutivas. Tipicamente em processos contínuos de tratamento, os reatores são pré-aquecidos até sua termalização e em seguida são inseridos os rejeitos em uma taxa tal que, esta termalização não seja significativamente comprometida. Nos estudos aqui apresentados, não foi realizado o preaquecimento do reator, pois o processo ocorre por batelada.

Na Figura 17 são apresentados os valores de temperatura em cada seção de aquecimento da parede do reator. Os valores de T1, T2 e T3 correspondem, respectivamente, a temperatura da parede externa do reator, a temperatura do material refratário e a temperatura relativa da parede interna do reator, conforme ilustra a Figura 13. Neste caso os valores de temperatura são semelhantes para processamento de rejeitos compactáveis e não compactáveis. Temperaturas no cadinho e na região de processos podem ser avaliadas com pirômetros ópticos, ou também estimadas por espectroscopia de emissão óptica. Estas técnicas, no entanto, não foram empregadas neste trabalho, pois requerem o emprego de janelas de quartzo com acesso à região de processo, as quais, em pouco tempo de processo, tornam-se opacas, devido principalmente à condensação de vapores advindos do processo. Um sistema dedicado de flanges deve ser implementado no reator para viabilizar o emprego destas técnicas de medição (GIROLD, 1997).

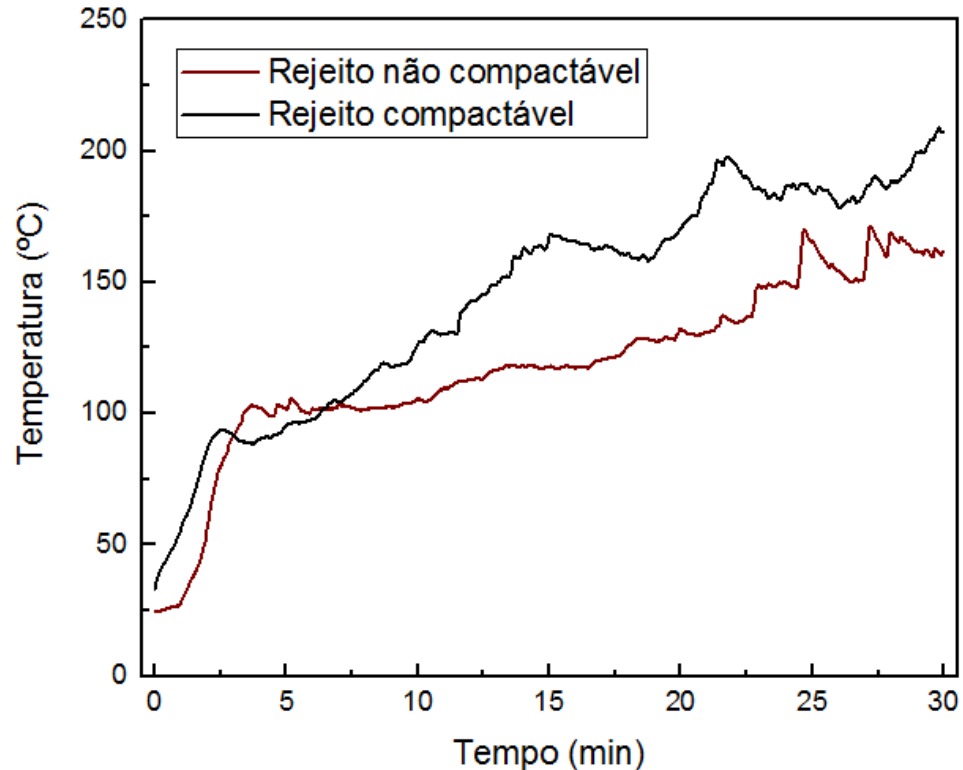
**Figura 17** - Evolução temporal dos valores de temperatura das seções da parede do reator de processo.



Fonte: Autor da dissertação.

Observa-se no gráfico que os valores de temperatura T1, T2, T3 aumentam linearmente conforme o tempo de processo. Este comportamento indica que o sistema não atingiu o regime de operação ideal de termalização do reator, mas também não interferiu significativamente nos valores médios de tensão, corrente e potência da descarga. Na Figura 18 é apresentado o registro da temperatura medida no sistema de exaustão dos gases (T4) em função do tempo de processo.

**Figura 18** - Evolução temporal dos valores de temperatura de exaustão dos gases.



Fonte: Autor da dissertação.

O aumento abrupto da temperatura no intervalo de tempo entre 0 para 5 min iniciais do processo é inferida como sendo o resultado da liberação de calor da combustão parcial da fração orgânica dos rejeitos, visto a concordância de maior fração orgânica do rejeito compactável em relação ao rejeito não compactável. Devido às elevadas temperaturas da região de processo a uma potência média de operação fixa (10 kW), a termalização do pequeno cadinho ocorre em menor tempo de processo, quando comparado às paredes do reator, e neste caso, observa-se na Figura 18 uma tendência da temperatura dos gases gerados em atingir um patamar para tempos de tratamento acima de 25 min.

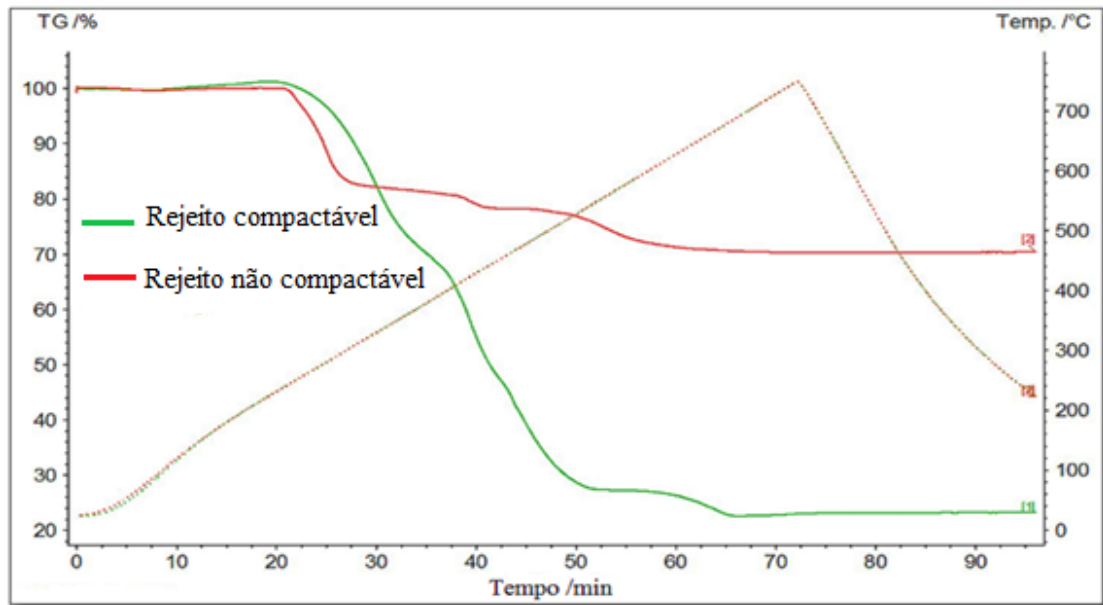
## 5.2 Análise Termogravimétrica

A Figura 19 apresenta as curvas termogravimétricas das amostras de rejeitos sólidos compactável e não compactável. As porcentagens de perda de massa em relação à



massa inicial estão no eixo das ordenadas em função do tempo e temperatura.

**Figura 19** - Análise termogravimétrica dos rejeitos antes do tratamento a plasma.



Fonte: Autor da dissertação.

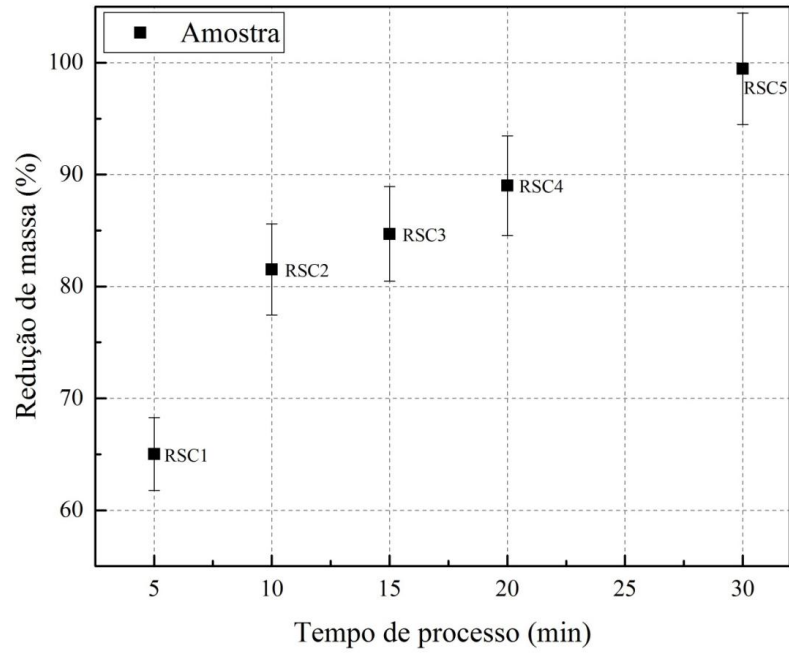
Observa-se que para as duas classes de rejeito a maior perda de massa ocorre entre 200°C e 600°C, indicando a eliminação da parte orgânica, visto que a perda de massa para RSC foi aproximadamente de 80% e para RNC de 30%. Essa diferença se justifica pela variação da composição dos rejeitos, podendo ser explicada como diferença de concentração de materiais orgânicos, atuando de forma a elevar a saída de voláteis. Isto demonstra a maior potencialidade de redução de massa ao tratamento térmico para rejeitos compactáveis para tais condições

### 5.3 Redução de massa

Os resultados da redução de massa para os experimentos de rejeitos sólidos compactáveis assim como para rejeitos sólidos não compactáveis são apresentados respectivamente nas Figuras 20 e 21. Devido à perda de massa do cadinho, as análises em todas as amostras fornecem resultados com variação de 2%. Deste modo, foi possível observar

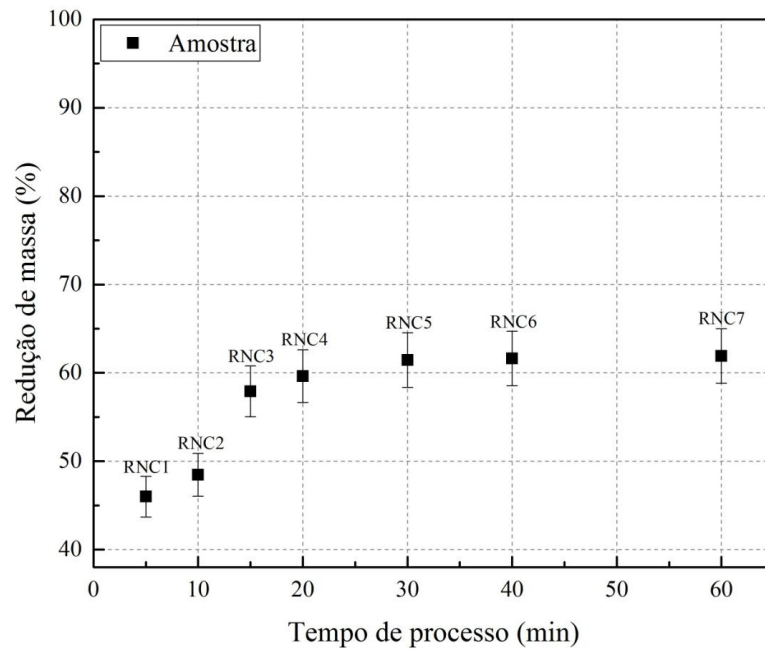
nos gráficos a eficiência experimental obtida utilizando-se o reator de processamento a plasma térmico.

**Figura 20** - Redução de massa de rejeitos sólidos compactáveis.



Fonte: Autor da dissertação.

**Figura 21** - Redução de massa de rejeitos sólidos não compactáveis.



Fonte: Autor da dissertação.

A análise comparativa dos resultados obtidos demonstra que as amostras de rejeitos sólidos compactáveis diferenciaram-se dos rejeitos não compactáveis, apresentando maior valor de perda de massa, alcançando aproximadamente 99% de redução comparada a 62% para rejeito não compactáveis. A explicação plausível para este resultado é que a diferença de fração orgânica nos materiais que compõe os rejeitos impacta diretamente na intensificação do percentual de redução de massa. Para os rejeitos sólidos compactáveis, como a fração orgânica é maior, os materiais são na maioria volatilizados durante o processo e tende a permanecer apenas o carbono fixo. Já para os rejeitos não compactáveis devido a presença de metal e vidro, a presença de compostos inorgânicos é maior, e em tese a temperatura de volatilização é maior. Desta forma, o processo tende a produzir como rejeito uma escória que concentra a fração metálica do rejeito, como mostra a Figura 22 após 30 minutos de tratamento.

**Figura 22** - Imagem das amostras de escórias após processamento a plasma térmico. Do lado esquerdo o rejeito compactável e do lado direito o rejeito não compactável.



Fonte: Autor da dissertação.

#### 5.4 Redução Volumétrica

Na Tabela 8 estão indicados os valores iniciais e finais dos volumes das amostras em função do tempo de processamento. A identificação numérica das amostras remete aos diferentes tempos de processos empregados.

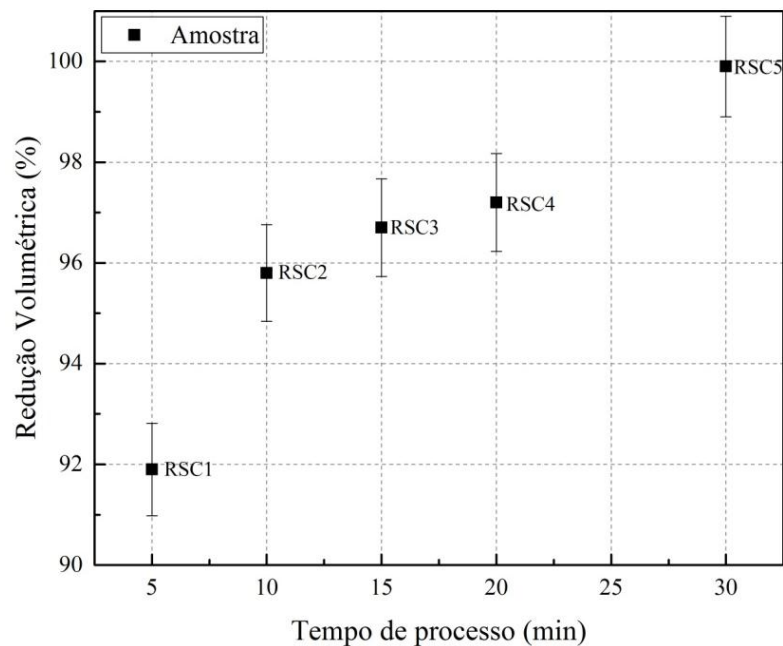
**Tabela 8** - Valores medidos de volume dos rejeitos sólidos compactáveis (RSC) e não compactáveis (RNC) antes e depois do processamento.

Amostra	Tempo de processo (min)	Volume Inicial (cm <sup>3</sup> )	Volume Final (cm <sup>3</sup> )	FRV
RSC1	5	250	20	12:1
RSC2	10	250	10	25:1
RSC3	15	250	8	31:1
RSC4	20	250	6	41:1
RSC5	30	250	2	99:1
RNC1	5	250	123	49:1
RNC2	10	250	115	46:1
RNC3	15	250	93	37:1
RNC4	20	250	88	35:1
RNC5	30	250	60	24:1
RNC6	40	250	59	23:1
RNC7	60	250	58	23:1

Fonte: Autor da dissertação.

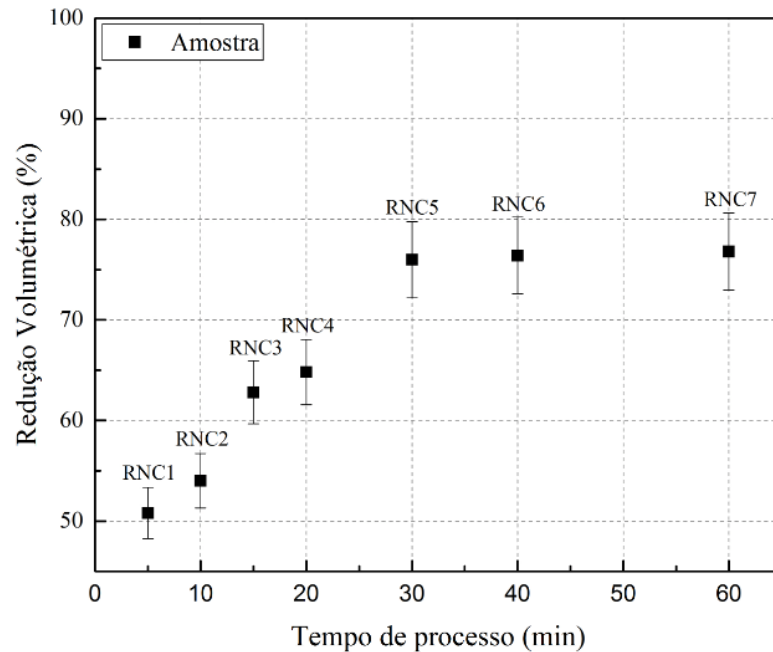
As Figuras 23 e 24 mostram, respectivamente para rejeitos compactáveis e não compactáveis, a variação do percentual de redução volumétrica em função do tempo de processo.

**Figura 23** - Variação do percentual de redução volumétrica de rejeitos sólidos compactáveis em função do tempo de processo.



Fonte: Autor da dissertação.

**Figura 24** - Variação do percentual de redução volumétrica de rejeitos sólidos não compactáveis em função do tempo de processo.



Fonte: Autor da dissertação.

Os resultados de redução volumétrica apresentados mostram que as amostras de rejeitos compactáveis apresentaram um comportamento de gaseificação crescente e completa. Para os rejeitos não compactáveis conforme pode ser observado na Figura 24, até 30 minutos se manteve crescente e após 30 minutos permaneceu constante, não havendo um aumento significativo de redução.

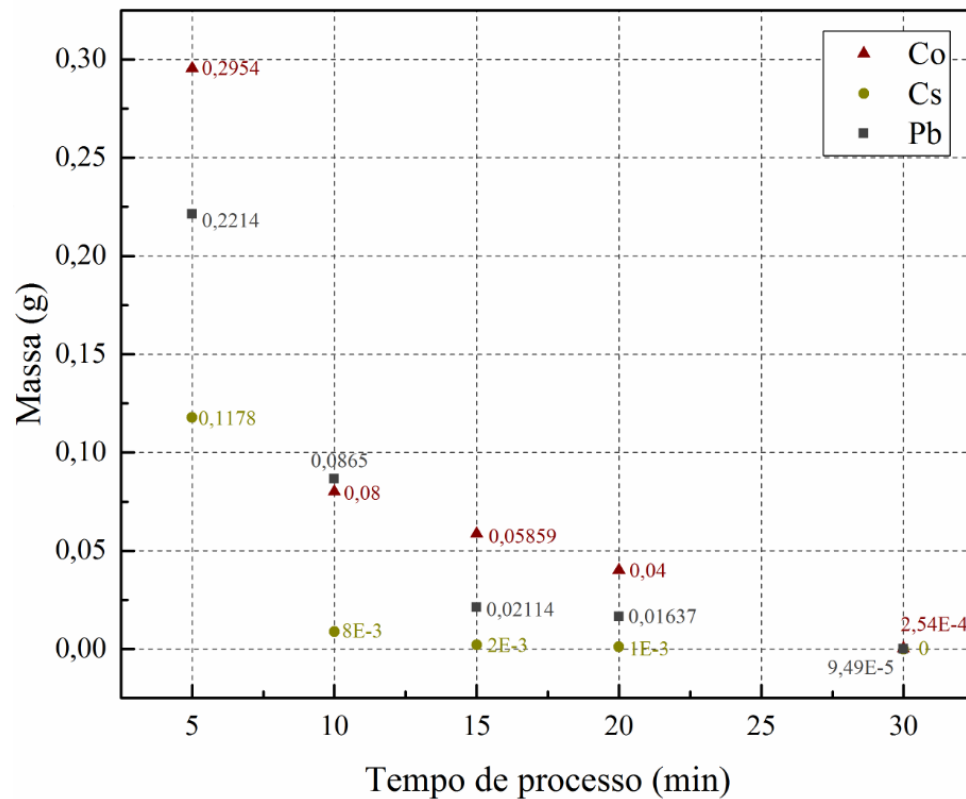
Nas condições de processo investigadas, os resultados obtidos sugerem efetuar um estudo do sistema para as amostras contaminadas com os isótopos estáveis fixando-se em 30 minutos o tempo máximo de processamento para os dois rejeitos (RSC e RNC). Na sequência é avaliada a relação dos parâmetros de processo e de volatilização dos elementos em função do tempo de processo. Os resultados são complementados pela determinação semi-quantitativa dos elementos traçadores, de acordo com as análises obtidas com a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X.

### 5.5 Análises dos elementos traçadores na escória

As situações de processamento observadas anteriormente foram reproduzidas com

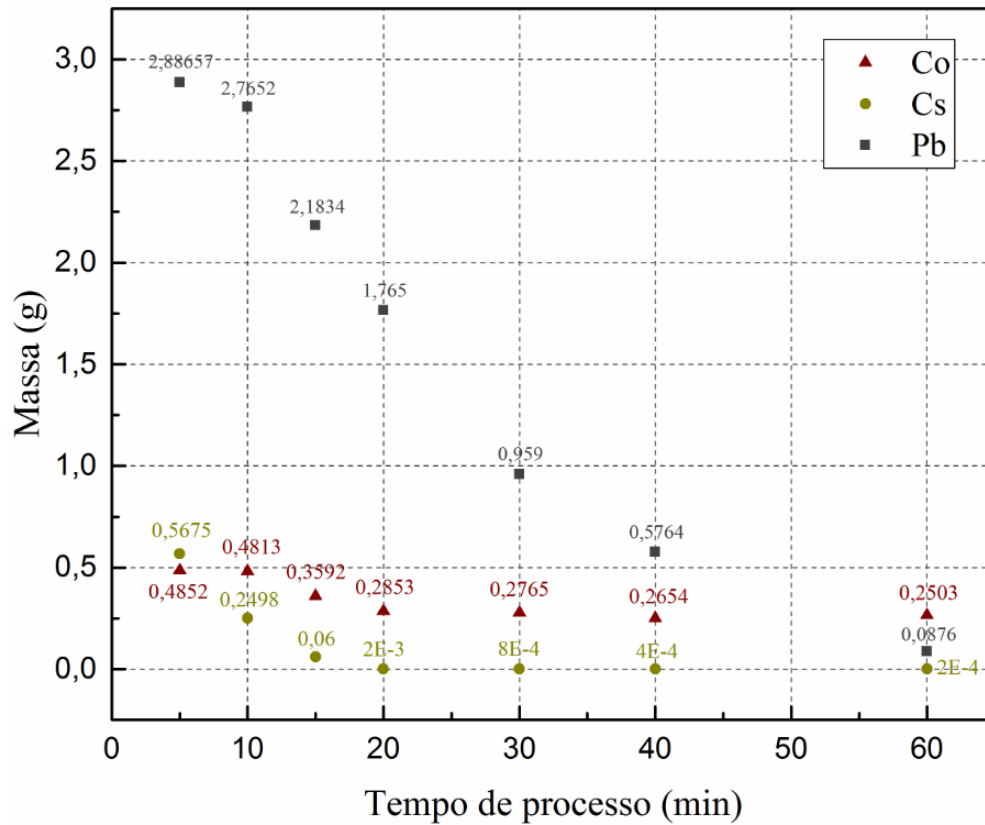
amostras contaminadas com 0,5697 g de cobalto, 0,7894 g de césio e 5 g de chumbo. Após as análises por espectrometria de fluorescência de raios X das escórias, foi possível determinar a massa de contaminantes retidos na escória para cada tempo de processo, que estão representadas nas Figuras 25 e 26.

**Figura 25** - Efeito do tempo de processo sobre a massa de contaminantes retidos na escória do rejeito compactável.



Fonte: Autor da dissertação.

**Figura 26** - Efeito do tempo de processo sobre a massa de contaminantes retidos na escória do rejeito não compactável.



Fonte: Autor da dissertação.

A análise dos resultados obtidos mostra que o tratamento a plasma térmico de arco transferido atinge temperaturas na região de processos acima da temperatura de vaporização dos isótopos estáveis de cobalto, céσιο e chumbo. Diante disso é possível concluir que a região de processos atinge temperaturas superiores a 2.000°C, que está acima da temperatura de volatilização do cobalto em atmosfera de plasma oxidante. Segundo Guiloufi e Amouroux, a volatilização no reator de produção de óxidos destes elementos elevaria sua temperatura de volatilização, intensificando a porcentagem de material retido na escória e reduzindo o fluxo gases contaminados na linha de exaustão de gases (GHUILOUFI and AMOUROUX, 2008). Isto é possível investigando-se sobre outros gases de trabalho como vapor de água e oxigênio, tornando a atmosfera de processo mais oxidante. A inserção de ar como gás de trabalho, como neste estudo, gera um tratamento com menos custos, mas despeja carga excessiva de nitrogênio sem produzir vantagens nos processos de reações químicas. Os empregos de outros

gases de trabalhos mais oxidantes como o oxigênio e vapor de água contribuem sobre os aspectos de taxas de reações químicas e de temperatura do processo (variação da entalpia do plasma) que reduzem a emissão de particulados, uma vez que nestes rejeitos, a concentração de carbono é muito elevada (CHARAKHOVSKI, 2017; MOURÃO, 2015). O fluxo elevado de particulados para a linha de exaustão pode intensificar o processo de carregamento de traçadores para esta região.

Comparando-se os resultados para cada tempo de processo é possível observar as diferenças nas análises, onde se supõe que é decorrente do processo de vitrificação das escórias de rejeitos não compactáveis, que elevam o percentual de massa retida na escória em comparação ao rejeito compactável. Alguns trabalhos reportam que a inserção de metais e semicondutores (principalmente silício) em ambiente de plasma oxidante catalizam reações com o cério e cobalto para formar óxidos destes elementos na fase condensada, retendo estes materiais na escória após a vitrificação (GHUILOUFI, 2009). No trabalho de Ghuiloufi (2009), simulação e experimentos foram comparados apresentando resultados que corroboram com os obtidos no presente estudo. Os trabalhos experimentais foram realizados em sistema de tochas gêmeas de plasma de arco transferido, que também garante máxima eficiência térmica da tocha.

É possível notar que para os rejeitos compactáveis a redução de massa dos contaminantes é gradativa e crescente, já para os rejeitos não compactáveis isso ocorre apenas para o isótopo de chumbo, não ocorrendo uma perda expressiva dos isótopos de cobalto e cério após 20 minutos de processo. Estes resultados, além dos reportados na literatura, sugerem que, para reter um maior percentual de radioisótopos nos rejeitos compactáveis, é preciso adicionar um fundente (areia, vidro) ao rejeito de preferência com elevada concentração de silício (GHUILOUFI, 2009). Assim, em uma usina de tratamento de rejeitos radioativos, seria ideal o tratamento de uma mistura de materiais compactáveis e não compactáveis em atmosfera de plasma oxidante.



## 5.6 Análise da composição elementar dos gases

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os resultados de caracterização por espectrometria de fluorescência de raios X dos gases gerados durante o processamento a plasma térmico. Foi possível determinar a concentração dos elementos presentes nos gases por meio do filtro de amostragem representado na Figura 13. Para ambos os rejeitos, as análises são referentes ao processamento de 30 minutos.

**Tabela 9** - Composição elementar e concentração dos elementos no filtro de amostragem de gás do processamento de rejeitos sólidos compactáveis.

<b>Emissão gasosa (RSC)</b>	
<b>Elemento químico</b>	<b>Concentração (%)</b>
<b>C</b>	48,28
<b>Pb*</b>	15,9
<b>Cl</b>	12,4
<b>Zn</b>	8,14
<b>Si</b>	3,14
<b>Fe</b>	2,22
<b>Cu</b>	2,17
<b>K</b>	1,07
<b>Ca</b>	0,989
<b>Ba</b>	0,789
<b>Cs*</b>	0,611
<b>P</b>	0,381
<b>Co*</b>	0,157
<b>Al</b>	0,121
<b>S</b>	0,0910
<b>Cr</b>	0,0294
<b>Sr</b>	0,0218
<b>Mn</b>	0,0202
<b>Ni</b>	0,0174
<b>Rb</b>	0,00611
<b>Mo</b>	0,00587

\*elementos traçadores

Fonte: Autor da dissertação.

**Tabela 10** - Composição elementar e concentração dos elementos no filtro de amostragem de gás do processamento de rejeitos sólidos não compactáveis.

<b>Emissão gasosa (RNC)</b>	
<b>Elemento químico</b>	<b>Concentração (%)</b>
<b>C</b>	66,43
<b>Cl</b>	9,39
<b>Si</b>	6,90
<b>Ba</b>	3,12
<b>Zn</b>	2,81
<b>Ca</b>	2,48
<b>Fe</b>	2,29
<b>Pb*</b>	1,43
<b>K</b>	1,34
<b>Cu</b>	1,10
<b>Cs*</b>	0,518
<b>P</b>	0,540
<b>S</b>	0,441
<b>Al</b>	0,413
<b>Cr</b>	0,0873
<b>Co*</b>	0,0854
<b>Mg</b>	0,0831
<b>Ni</b>	0,0766
<b>Ti</b>	0,0573
<b>Sr</b>	0,0475
<b>Mn</b>	0,0382
<b>Mo</b>	0,02

\*elementos traçadores

Fonte: Autor da dissertação.

A análise anterior habilita considerar que a maior parte dos elementos traçadores está presentes nos gases de saída do processo, visto que para a determinação exata da quantidade total dos elementos presente nos gases, é necessário o aprimoramento do sistema,

devido à ausência de equipamento específico para medição de vazão de gases na linha de exaustão. No entanto, foi assumido que a composição química dos gases é semelhante de acordo com os elementos químicos presentes no filtro de amostragem; em contrapartida, não foi possível até o momento inferir sobre os aspectos de balanço de massa devido à dificuldade na avaliação da concentração total.

Embora os valores determinados de concentração dos elementos químicos no filtro de amostragem não apresentem dados suficientes para a correlação dos valores da concentração total do gás de saída, é possível afirmar que em ambos os casos é significativa a presença dos elementos traçadores nos filtros.

A comparação entre a emissão gasosa do processamento a plasma térmico dos rejeitos sólidos compactáveis e não compactáveis simulados está em concordância com os resultados apresentados na seção 5.5. Observa-se que a concentração dos elementos traçadores no filtro é maior para o processamento de rejeitos compactáveis. De fato uma investigação mais profunda deste comportamento seria necessária para a completa descrição dos mecanismos físico-químicos em questão.

Os dois casos mostram uma maior concentração do elemento carbono, indicando um processo de combustão incompleta como sugere BYUN et al (2012). A elevada concentração de carbono na linha de gases de exaustão também pode estar associada ao processo de degradação do eletrodo de grafite empregado para a geração do arco elétrico.

### **5.7 Atividade estimada**

Os resultados da atividade estimada das escórias apresentados na Tabela 11 demonstram que, apesar da maior parte dos isótopos volatilizarem durante o processo, ainda assim indicam valores significativos de concentração de isótopos retidos na escória para armazenamento.

**Tabela 11** - Estimativa da atividade em relação à massa de isótopo.

Amostra	Massa (g)			Atividade Estimada (Bq)		
	Co	Cs	Pb	Co	Cs	Pb
Sem tratamento	$5,69 \times 10^{-1}$	$7,89 \times 10^{-1}$	$5,00 \times 10^0$	$2,36 \times 10^{13}$	$2,60 \times 10^{13}$	$1,40 \times 10^{13}$
RSC1	$2,95 \times 10^{-1}$	$1,18 \times 10^{-1}$	$2,21 \times 10^{-1}$	$1,25 \times 10^{13}$	$3,90 \times 10^{11}$	$6,32 \times 10^{11}$
RSC2	$8,00 \times 10^{-2}$	$8,87 \times 10^{-3}$	$8,65 \times 10^{-2}$	$3,38 \times 10^{12}$	$2,93 \times 10^{10}$	$2,47 \times 10^{11}$
RSC3	$5,86 \times 10^{-2}$	$2,05 \times 10^{-3}$	$2,11 \times 10^{-2}$	$2,47 \times 10^{12}$	$6,79 \times 10^9$	$6,03 \times 10^{10}$
RSC4	$4,00 \times 10^{-2}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,64 \times 10^{-2}$	$1,69 \times 10^{12}$	$3,64 \times 10^9$	$4,67 \times 10^{10}$
RSC5	$2,54 \times 10^{-4}$	0	$9,49 \times 10^{-5}$	$1,07 \times 10^{10}$	0	$2,71 \times 10^8$
RNC1	$4,85 \times 10^{-1}$	$5,67 \times 10^{-1}$	$2,89 \times 10^0$	$2,05 \times 10^{13}$	$1,88 \times 10^{12}$	$8,24 \times 10^{12}$
RNC2	$4,81 \times 10^{-1}$	$2,50 \times 10^{-1}$	$2,76 \times 10^0$	$2,03 \times 10^{13}$	$8,26 \times 10^{11}$	$7,89 \times 10^{12}$
RNC3	$3,60 \times 10^{-1}$	$6,13 \times 10^{-2}$	$2,18 \times 10^0$	$1,52 \times 10^{13}$	$2,03 \times 10^{11}$	$6,23 \times 10^{12}$
RNC4	$2,85 \times 10^{-1}$	$2,03 \times 10^{-3}$	$1,76 \times 10^0$	$1,20 \times 10^{13}$	$6,73 \times 10^9$	$5,04 \times 10^{12}$
RNC5	$2,76 \times 10^{-1}$	$8,43 \times 10^{-4}$	$9,59 \times 10^{-1}$	$1,17 \times 10^{13}$	$2,79 \times 10^9$	$2,74 \times 10^{12}$
RNC6	$2,50 \times 10^{-1}$	$4,76 \times 10^{-4}$	$5,76 \times 10^{-1}$	$1,06 \times 10^{13}$	$1,57 \times 10^9$	$1,65 \times 10^{12}$
RNC7	$2,65 \times 10^{-1}$	$2,00 \times 10^{-4}$	$8,76 \times 10^{-2}$	$1,12 \times 10^{13}$	$6,61 \times 10^8$	$2,50 \times 10^{11}$

Fonte: Autor da dissertação.

Devido à maior concentração em massa dos elementos traçadores nos rejeitos não compactáveis (RNC), observa-se que a atividade dos traçadores retidos no material sólido produzido após o tratamento neste rejeito, assume valores mais elevados comparado ao RSC e correspondentes aos respectivos tempos de tratamento (veja Figuras 25 e 26). Interessante observar que o cobalto no RSC, comparativamente aos demais elementos traçadores, a atividade decai mais rapidamente nos tempos iniciais de processo. Este efeito é devido também à queda brusca da quantidade em massa de cobalto retido no material sólido produzido após o tratamento (veja Figura 25).

Observa-se, para todos os traçadores, que a atividade estimada decresce com o tempo de processo acompanhando a relação direta com quantidade de massa retida na escória e há uma tendência de saturação para tempos superiores a 20 min, com excessão do chumbo para rejeitos não compactáveis (RNC). Fixando os demais parâmetros operacionais do sistema, o tempo de processo dita se todo o material será fundido ou gaseificado durante o tratamento. Para tempos muito curtos (menores que 5 min), geralmente observa-se ainda material não fundido como sólido resultante do processo (escória), o que justifica a maior concentração em massa e conseqüentemente, a maior atividade dos traçadores retidos na

escória. A partir de 20 min de processo, praticamente todo o material orgânico é gaseificado e portanto resta somente como sólido de produção a matéria inorgânica fundida (escória) que retem o traçador. Este processo de gaseificação ou volatilização do material tratado intensifica o carreamento de traçadores para linha de exaustão, reduzindo a concentração em massa na escória fundida e vetrificada.

## 6 CONCLUSÕES

O trabalho aqui exposto representa uma contribuição importante na etapa de tratamento de rejeitos radioativos sólidos, por meio do tratamento térmico a plasma de arco transferido, visto que o processo tem a capacidade de reduzir o volume substancialmente. As investigações foram conduzidas com foco no efeito do tempo e da composição do rejeito simulado considerando os aspectos de redução volumétrica e de retenção de traçadores estáveis nas linhas de gases e sólidos de produção.

Os resultados mostram que durante 30 min de tratamento o fator de redução volumétrica para rejeito sólido compactável e não compactável assume valores de 1:99 e 1:77, respectivamente. Nos rejeitos não compactáveis, e portanto, com maior fração de rejeitos inorgânicos, a porcentagem de retenção dos isótopos estáveis na escória vitrificada é mais elevada, concordando com resultados reportados na literatura. A atividade estimada para todos os traçadores e tipo de rejeitos relacionam-se diretamente com sua massa retida na escória vitrificada, e, portanto, diminui com o tempo de processo e assumem valores correspondentes mais elevados no processamento dos rejeitos radioativos não compactáveis.

A originalidade do trabalho correlaciona-se diretamente com as características inovadoras do sistema, demonstrando um elevado potencial de aplicação ao tratamento de rejeitos radioativos sólidos compactáveis e não compactáveis com o emprego de eletrodos de grafite para geração de arco elétrico transferido.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Neste cenário, entre as duas classes de rejeitos sólidos estudados, as diferenças encontradas são suficientes para seguir o estudo dos subprodutos do processo a plasma no que diz respeito à evolução temporal dos mecanismos físicos-químicos que regem as taxas de produção de compostos nas fases gasosa e condensada durante os tratamentos térmicos. Assim sendo, para atividades futuras, deve ser realizado o aprofundamento das investigações no sentido de elucidar sobre estes mecanismos com o desafio de reter os traçadores em maior porcentagem na escória vitrificada, reduzindo assim o fluxo de gases contaminados com traçadores na linha de exaustão. Este desafio também pode ser superado com o aperfeiçoamento do sistema experimental e do processo, considerando os resultados dos experimentos obtidos no presente estudo e aos reportados na literatura seguindo o estado da arte. Este panorama sugere a realização de experimentos comparativos ao presente estudo em processos de tratamento empregando ambientes de plasma mais oxidantes (oxigênio, vapor de água) gerados de tochas de plasma de arco não transferido operando em relativamente baixas correntes.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOULOS, M.; FAUCHAIS, P.; PFENDER, E. **Fundamentals and Applications. Thermal plasma**, v. 1, 1995.

BYUN, Youngchul et al. Thermal plasma gasification of municipal solid waste (MSW). **Gasification for Practical Applications**, p. 183-210, 2012.

CALIARI, F. R. **Desenvolvimento de processo de deposição via plasma térmico de materiais cerâmicos e metálicos em substrato de liga de titânio para aplicações aeroespaciais**. 119 f. Tese (Doutorado Materiais e Processos para aplicações Industriais) Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2016.

CAMELO, A. P.. **A construção social do risco e o controverso programa nuclear brasileiro: entre o científico, o político e o público**. 2015. 275 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/287782>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

CASTRO, A. M. **Avaliação do perfil dos resíduos de serviços de saúde de Belo Horizonte quanto à presença de rejeitos radioativos na destinação final**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2005.

CHARAKHOVSKI, L.; ESSIPTCHOUK, A.; OTANI, C.; PETRACONI, G.; MARQUESI, A.; SAUCHYN, V.; KHVEDCHYN, I.; OLENOVICH, A.; LIAVONCHYK, A.; SKAMAROKHAU, D.; HALINOUSKI, A. A. **On the Internal Gas Dynamics and Efficiency of a Vortex Water-Vapor Plasma Generator**. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, v. 90, p. 586-597, 2017.

CNEN – NN – 6.09. **Crêterios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**. Comissão Nacional de Energia Nuclear, Set. 2002. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm609.pdf>

CNEN – NN – 8.01. **Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**. Comissão Nacional de energia Nuclear, Abr. 2014. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm801.pdf>

CUBAS, Anelise Leal Vieira et al. **Eliminação de organoclorados por plasma térmico de corrente contínua**. 2004.

DECKERS, Jan. **Plasma treatment of Radioactive waste**. Belgoprocess 29 September, 2010.



DECKERS, J. **Incineration and plasma processes and technology for treatment and conditioning of radioactive waste.** In: Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies. Woodhead Publishing, 2011. p. 43-66.

DMITRIEV, SA, F.A. LIFANOV, A.EU. SAVKIN, V.N. POPKOV, M.A. POLKANOV, V.A. GORBUNOV, N.A. SPIRIN, YU.A. OSKOLKOV, M.YU. BUROV, S.YU. SHVETSOV. **Plasma plant for radioactive waste treatment.** WM'01 Conference, February 25-March 1, 2001, Tucson, AZ.

DUCHARME, Caroline. **Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes.** Research Paper I. School of Engineering and Applied Science, Columbia University, 2010.

ESSIPTCHOUK, A. M.; CHARAKHOVSKI, L. I.; FILHO, G. P.; et al. **Thermal and power characteristics of plasma torch with reverse vortex.** Journal of Physics D: Applied Physics, v. 42, n. 17, p. 175205, 2009.

FABRY, Frédéric et al. **Waste gasification by thermal plasma: a review.** Waste and Biomass Valorization, v. 4, n. 3, p. 421-439, 2013.

FILIUS, K.D., WHITWORTH, C.G., 1996. **Emissions characterization and off-gas system development for processing simulated mixed waste in a plasma centrifugal furnace.** Hazard. Waste Hazard. Mater. 13, 143–152.

FRIDMAN, A. **Plasma Chemistry.** Cambridge University Press: New York, 2008.

GARAMSZEGHY, M., 2011. **Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies,** Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies.

GERALDO, B. **Utilização de métodos radioanalíticos sequenciais para determinação de isótopos de urânio. Plutônio, amerício, cúrio e netúnio em rejeitos radioativos.** 2012. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

GHILOUFI, I AND AMOUROUX, J. **Eletrolyses effects on the cesium volatility during thermal plasma vitrification of radioactive wastes.** J. High temp. Mater. Processes (2008).

GHILOUFI, I. **Simulation of raioelement volatility during vitrification of radioactive wastes by arc plasma.** Journal of Harzadous Materials, 163 (2009) 136-142

GIROLD C. **Incineration/vitrication de déchets radiactifs et combustion de gaz de pyrolyse en plasma d'arc.** Ph. D. Thesis, Université de Limoges, France, 1997.

HEBERLEIN, J AND MURPHY, A. **Thermal plasma waste treatment.** J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008)

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2003. **Radioactive Waste Management Glossary,** Acta Acustica. Agency International Atomic Energy.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Application of thermal technologies for processing of radioactive waste**, TECDOC-1527, Vienna (2006).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants**, Nuclear Energy Series No. NW-T-1.18, IAEA, Vienna (2009).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY- IAEA. **Disposal of Radioactive Waste – Specific Safety Requirements**. Vienna, 2011 (Safety Standards Series No. SSR-5).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Research Reactors**, IAEA Safety Standards Series No. SSG-40, IAEA, Vienna (2016).

IWAO, T.; INABA T. **Treatment of Waste by dc Arc Discharge Plasma**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 7, n°5, p.684- 692. October 2000.

LI, Jun et al. **Application of thermal plasma technology for the treatment of solid wastes in China: an overview**. Waste management, v. 58, p. 260-269, 2016.

MARINGER, F. J. et al. Radioactive waste management: Review on clearance levels and acceptance criteria legislation, requirements and standards. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 81, p. 255-260, 2013.

MARUMO, J. T. **Avaliação da contaminação provocada por para-raios radioativos de Amerício-241 descartados em lixões**. Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais – IPEN/CNEN, 2006.

MOURAO, R.; MARQUESI, A. R.; GORBUNOV, A. V.; PETRACONI, G; HALINOUSKI, A. A.; OTANI, C.. **Thermochemical Assessment of Gasification Process Efficiency of Biofuels Industry Waste with Different Plasma Oxidants**. IEEE Transactions on Plasma Science, v. 43, p. 3760-3767, 2015.

MENEZES, R. A. A; BESSA, I.; MENEZES, M. A. **O plasma térmico ± Solução final para os resíduos perigosos**. In: SEMINÁRIO DE MEIO AMBIENTE, ABM- Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, p. 1-17, out. 1999.

MIRANDA, F. S. **Estudo do pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar utilizando plasma em líquidos**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Paraíba, 2013.

MOSSE, A. L.; SAVCHIN, V. V.; SHILOV, V. V. Testing and calculating a two-chamber plasma furnace for processing of radioactive wastes. **Journal of Engineering Physics and Thermophysics**, v. 81, n. 3, p. 598-606, 2008.

NAGATA, N.; BUENO, M. I. M. S.; PERALTA-ZAMORA, P. G. **Métodos Matemáticos para Correção de Interferências Espectrais e Efeitos Interelementos na Análise Quantitativa por Fluorescência de Raios-X**. Química Nova, v. 24, n. 4, p. 531-539, 2001.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas Analíticas Nucleares de Fluorescência de Raios X Por Dispersão de Energia (EDXRF) e por Reflexão Total (TXRF)**, 1999. Disponível em: <http://www.cena.usp.br/apostilas/Virgilio/CEN-5723/EDXRFTXRF.doc>. Acesso em: 16 julho 2019.

POLKANOV, M. A., Semenov, K. N., Arustamov, A. E., Gorbunov, V. A., Kadyrov, I. I., Kobelev, A. P., ... & Dmitriev, S. A. **Comparative Analysis of Technologies for Treatment of Solid Radioactive Waste of Nuclear Power Plants-11470**. WM2011 Conference, March 7-11, 2011. Phoenix, AZ, USA.

PRADO, E. S. P., MIRANDA, F. S., PETRACONI, G. & POTIENS JR, A. J. Use of plasma reactor to viabilise the volumetric reduction of radioactive wastes. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 168, p. 108625, 2020.

PRADO, E.S., DELLAMANO, J., CARNEIRO, A.L.G., SANTOS, R.C., PETRACONI, G., POTIENS Jr, A.J., 2017. **Technical feasibility study on volumetric reduction of radioactive wastes using plasma technology**. 2017 Int. Nucl. Atl. Conf. - Inac. 2017.

ROTH, J. R. **Industrial plasma engineering: principles**, v. 1, Institute of physics publishing: London, 1995.

SANTOS, Elenir Souza et al. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X na determinação de espécies químicas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 3413-3432, 2013.

SOLOMONENKO, O. **Thermal Plasma Torches and Technologies: Plasma Torches, Basic Studies and Design**. Annals of Physics, p. 397, 2003.

SOUZA, Daiane Cristini Barbosa de. **Desenvolvimento de método para caracterização de embalados de rejeitos radioativos**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. 2013.

STANTEC. **Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices**. British Columbia Ministry of Environment, 2011.

TADDEI, M. H. T. et al. **Determination of scaling factors to estimate the radionuclide inventory of wastes from the IEA-R1 research reactor**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, v. 303, n. 3, p. 2467-2481, 2015.

TADDEI, M. H. T. **Determinação de fatores de escala para estimativa do inventário de radionuclídeos em rejeitos de média e baixa atividade do reator IEA-R1**. 2013a. Dissertação (Doutoramento) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

TAO, X.; QI F.; YIN Y.; DAI, X. **CO<sub>2</sub> Reforming of CH<sub>4</sub> by Combination of Thermal Plasma and Catalyst.** International Journal of Hydrogen Energy, 33, 1262-1265, 2008.

TESSARO, Ana Paula Gimenes. **Desenvolvimento de métodos radiométricos para a caracterização de rejeitos radioativos.** 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2015.

TZENG, C.C., KUO, Y.Y., HUANG, T.F., LIN, D.L., YU, Y.J., 1998. **Treatment of radioactive wastes by plasma incineration and vitrification for final disposal.** J. Hazard. Mater. 58, 207–220.

YAZICIOĞLU, Özge; KATIRCIOĞLU, T. Yaşar. **Applications of Plasma Technology in Energy Sector.** Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, v. 3, n. 1, p. 18-44, 2017.

ZHUKOV, M. F.; ZASYPKIN, I. M.; TIMOSHEVSKII, A. N.; MIKHAILOV, B. I.; DESYATKOV, G. A. **Thermal Plasma Torches: Design, Characteristics, Application.** Cambridge: CAMBRIDGE INTERNATIONAL SCIENCE PUBLISHING, 2007.

ZWILAG (Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG). Disponível em <<https://www.zwilag.ch/en/plasma-plant-content---1--1047.html>>, acessado em 07/10/2019 às 12h45min.



---

---

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino**  
**Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000**  
**Fone/Fax(0XX11) 3133-8908**  
**SÃO PAULO – São Paulo – Brasil**  
**<http://www.ipen.br>**

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**

---

---