

Wilson Alano

**PRODUÇÃO DE CARVÃO A PARTIR DE MADEIRA TRATADA  
UTILIZANDO O MÉTODO DE DESTILAÇÃO PIROLÍTICA  
ESCALONADA (*CHARTHERM*)**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cíntia Soares

Coorientadores: Prof. Dr. Humberto Gracher Riella; Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Ana Pignatel Marcon Martins

Florianópolis - SC  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Alano, Wilson

Produção de carvão a partir de madeira tratada utilizando o método de destilação pirolítica escalonada (*Chartherm*) / Wilson Alano ; orientadora, Cíntia Soares ; coorientador, Humberto Gracher Riella, coorientadora, Maria Ana Pignatel Marcon Martins. – Florianópolis, SC, 2018.

73 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui referências

1. Engenharia Química. 2. Charterização. 3. Destilação Pirolítica Escalonada. 4. Resíduos de Madeira Tratada. 5. Tratamento de Madeira. I. Soares, Cíntia. II. Gracher Riella, Humberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.





Esta dissertação é dedicada aos meus colegas de trabalho, aos meus professores e orientadores, aos meus queridos pais e sogros, à minha família e especialmente à Vanessa e à Laura, amadas esposa e filha.



## AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Maria Ana Pignatel Marcon Martins pela co-orientação, dedicação, suporte e esforços sem medida.

À Professora Dra. Cíntia Soares pela orientação e direcionamento das ações.

Ao Professor Dr. Celso Lopes de Albuquerque Junior pela liberação dos laboratórios do CENTEC para realização dos ensaios.

Ao Me. Elias Rodrigues Pedroso e equipe do Laboratório de Análises Químicas da UNISUL, os quais se mobilizaram para realização das análises das amostras.

A todos os Professores e Profissionais da UNISUL e da UFSC que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação acadêmica e de pós-graduação.

À Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC pela oportunidade da realização da pós-graduação e o convívio com pessoas tão especiais.

À Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL pela abertura, confiança, suporte e incentivo prestados durante todo o percurso.

À equipe da Seed Engenharia, especialmente ao Eng<sup>o</sup> Ivan Nicoletti Ferari, pelo apoio e parceria nas horas mais decisivas desta caminhada.

Aos meus familiares, em especial, pais e sogros, que mesmo à distância torceram para a realização deste sonho.

E, mais que especialmente, à minha esposa Vanessa Mendes Fernandes e à minha filha Laura Fernandes Alano, que durante alguns momentos abriram mão de suas vontades e, com muito amor e compreensão, passaram a tranquilidade necessária para a realização de mais uma etapa em minha carreira.





“Você pode encarar um erro como uma besteira a ser esquecida, ou como um resultado que aponta uma nova direção.”  
(Steve Jobs)



## RESUMO

A grande dificuldade para se destinar resíduos de madeira tratados gerados em várias regiões do Brasil, vem instigando pesquisadores na busca de tecnologias alternativas ao aterro industrial, atualmente difundido como a melhor alternativa técnica e econômica. Porém, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil, a utilização de aterros deve ser feita apenas quando se esgotarem as alternativas com menor impacto ambiental, ou seja, o reuso ou a reciclagem dos resíduos. Neste intuito, a presente dissertação traz à luz um processo de aproveitamento dos resíduos implantado efetivamente na França, porém com pouca difusão em nosso país: o *Chartherm*. Este processo é caracterizado pelo consumo de menor quantidade de energia quando comparado a outros processos da mesma categoria, como a Pirólise, a Incineração e o Coprocessamento de resíduos, uma vez que opera em temperaturas inferiores a 370 °C. Para demonstrar a viabilidade técnica e econômica do processo, realizou-se 9 (nove) bateladas idênticas, diferenciadas apenas pelo tempo de exposição das amostras à temperatura em torno de 350 °C. O produto desta técnica foi um carvão com teor de carbono maior do que antes da exposição das amostras à temperatura, contendo ainda pequenos teores de arsênio, cobre e cromo, podendo ser utilizado na indústria dos pneumáticos como negro de fumo e até na produção de ligas metálicas com maior concentração de carbono fixo.

**Palavras-chave:** *Chartherm*, Resíduos de Madeira Tratada, CCA.



## ABSTRACT

The great difficulty in allocating treated wood residues generated in various regions of Brazil has been instigating researchers in the search for alternative technologies to the industrial landfill, currently widespread as the best technical and economic alternative. However, according to the National Solid Waste Policy (PNRS) in Brazil, the use of landfills should be applied only when the alternatives with less environmental impact, ie reuse or recycling of waste, are exhausted. In this sense, the present dissertation brings to light a process of recovery of residues effectively implanted in France, but with little diffusion in our country: the *Chartherm*. This process is characterized by the consumption of less energy when compared to other processes of the same category, such as Pyrolysis, Incineration and Coprocessing of waste, since it operates at temperatures below 370 ° C. To demonstrate technical and economical feasibility of the process, 9 (nine) identical batches were performed, differentiated only by the time of exposure of the samples at a temperature around 350 ° C. The product of this technique was coal with a higher carbon content than before exposure of the samples to the temperature, also containing small amounts of Arsenic, Copper and Chromium, and it can be used in the Black Carbon tire industry and even in the production of alloys with higher requirements with respect to the fixed carbon concentration.

Keywords: Chartherm, Wood Waste Treated, CCA.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de tratamento por Vácuo-pressão .....	28
Figura 2 – Ilustração do Processo <i>Chartherm</i> .....	36
Figura 3 – Triturador para madeira .....	43
Figura 4 – Amostra de madeira tratada com CCA cominuída .....	44
Figura 5 – Equipamento para realização da granulometria .....	45
Figura 6 – Reator pirolítico .....	46
Figura 7 – Medidor de vazão <i>Brooks Instruments</i> .....	47
Figura 8 – Indicador digital de temperatura .....	47
Figura 9 – Equipamentos para realização do Experimento .....	48
Figura 10 – Fluxograma do processo experimental .....	49
Figura 11 – Aquecimento Forno versus Reator – exposição 30 min. ...	57
Figura 12 – Aquecimento Forno versus Reator – exposição 60 min. ...	58
Figura 13 – Aquecimento Forno versus Reator – exposição 90 min. ...	58
Figura 18 – Aferição do termopar versus termômetro .....	60





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limite máximo no extrato do ensaio lixiviado.....	39
Tabela 2 – Parâmetros analisados e técnicas utilizadas .....	50
Tabela 3 – Codificação das amostras .....	57
Tabela 4 – Aferição do termopar versus termômetro .....	59
Tabela 5 – Resultados dos ensaios realizados nos produtos oriundos da Charterização .....	61
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de Charterização .....	62
Tabela 7 – Concentração de metais no efluente líquido .....	62
Tabela 8 – Consumo Global de Energia ( $\Delta Q$ ) por tonelada de resíduo.	63
Tabela 9 – Consumo de GLP e Gás Natural por tonelada de resíduo ...	63
Tabela 10 – Comparativo de custos para destinação dos resíduos de madeira .....	64



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACA – Arseniato de Cobre Amoniacal  
CCA – Arseniato de Cobre Cromatado  
CCB – Borato de Cobre Cromatado  
CL<sub>50</sub> – Concentração Letal para 50 % da população testada  
CZC – Cromato de Zinco Cromatado  
CENTEC – Centro Tecnológico da Universidade do Sul de Santa Catarina  
DL<sub>50</sub> – Dose Letal para 50 % da população testada  
FCAP – Sais de Flúor, Cromo, Arsênio e Fenol  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
NBR – Norma Brasileira  
PCI – Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)  
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos  
UPM – Usina de Preservação de Madeira  
UTM – Usina de Tratamento de Madeira  
 $\beta$  - Coeficiente de expansão térmica do ar (K<sup>-1</sup>)  
 $\rho$  - Massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\nu$  - Viscosidade cinemática do ar (m<sup>2</sup>/s)  
 $\Delta q_{madeira}$  – Calor necessário para aquecimento da amostra de madeira (J)  
 $\Delta T$  – Variação da temperatura do sistema (K)  
 $\dot{V}_{N_2}$  – Vazão volumétrica do nitrogênio corrigida (L/min)  
 $\dot{V}_{leitura}$  – Vazão volumétrica de nitrogênio lida no medidor de vazão (L/min)  
 $A$  – Área(s) do reator pirolítico (m<sup>2</sup>)  
 $c$  – Calor específico da madeira tratada (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)  
 $C_p$  – Capacidade calorífica à pressão constante (J.gmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)  
 $D$  – Diâmetro (m)  
 $dH$  – Integração da entalpia no intervalo de temperatura do sistema (J.gmol<sup>-1</sup>)  
 $dT$  – Integração no intervalo de temperatura do sistema (K)  
 $g$  – Aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)  
 $Gr$  – Número de *Grashof*  
 $k$  – Condutividade térmica na parede do reator pirolítico (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)  
 $L$  – Comprimento(s) do reator pirolítico (m)  
 $m$  – Massa da amostra (kg)  
 $M$  – Massa molecular do N<sub>2</sub> (g/gmol)  
 $m_{gás}$  – Massa do GLP ou Gás Natural (kg)  
 $Nu$  – Número de *Nusselt*  
 $Pr$  – Número de *Prandtl*

$q_{convecção}$  – Calor total perdido por convecção para o ambiente (J)

$Q_{Total}$  – Quantidade de calor total necessária para cada processo (J)

$Ra$  – Número de *Rayleigh*

$T$  – Temperatura final do sistema (K)

$t$  – Tempo de exposição (min)

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>26</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>26</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>27</b>
2.1 TRATAMENTO DA MADEIRA.....	27
2.2 MADEIRAS PARA TRATAMENTO.....	29
2.3 SUBSTÂNCIAS PARA PRESERVAÇÃO DA MADEIRA.....	31
<b>2.3.1 Óleos solúveis</b> .....	<b>32</b>
<b>2.3.2 Hidrossolúveis</b> .....	<b>32</b>
2.4 ARSENIATO DE COBRE CROMATADO (CCA).....	34
2.5 <i>CHARTHERM</i> (CHARTERIZAÇÃO) .....	35
2.6 DESTINAÇÃO FINAL DA MADEIRA TRATADA NO BRASIL .....	37
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>43</b>
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS .....	43
<b>3.1.1 Triturador</b> .....	<b>43</b>
<b>3.1.2 Amostras</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1.3 Peneiras</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1.4 Balança</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1.5 Forno Mufla</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1.6 Reator pirolítico</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1.7 Gás Nitrogênio</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1.8 Medidor de Vazão</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1.9 Termopar</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1.10 Indicador digital de temperatura</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1.11 Serpentina de cobre</b> .....	<b>48</b>
<b>3.1.12 Recipiente com água</b> .....	<b>48</b>
<b>3.1.13 Equipamento experimental montado</b> .....	<b>48</b>
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	49
3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS NA AMOSTRA .....	50
3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	50
<b>3.4.1 Atmosfera Inerte no Reator</b> .....	<b>50</b>
<b>3.4.2 Aquecimento do forno mufla e do reator</b> .....	<b>51</b>
<b>3.4.3 Aferição do termopar</b> .....	<b>51</b>
<b>3.4.4 Correção do medidor de vazão</b> .....	<b>51</b>
<b>3.4.5 Quantidade de amostra por batelada</b> .....	<b>52</b>
<b>3.4.6 Variação das condições do experimento</b> .....	<b>52</b>
<b>3.4.7 Finalização do experimento</b> .....	<b>52</b>
<b>3.4.8 Retirada e conservação da amostra</b> .....	<b>53</b>
3.5 CUSTO ENERGÉTICO .....	53

<b>3.5.1 Custo Energético com Relação ao Calor Fornecido.....</b>	<b>53</b>
3.6 ANÁLISES LABORATORIAIS DOS PRODUTOS .....	56
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>57</b>
4.1 AQUECIMENTO DO FORNO MUFLA E DO REATOR .....	57
4.2 AFERIÇÃO DO TERMOPAR.....	59
4.3 CORREÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO .....	60
4.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES LABORATORIAIS .....	60
4.5 CUSTO ENERGÉTICO .....	63
4.6 COMPARATIVO ENTRE AS DESTINAÇÕES FINAIS .....	64
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>69</b>







## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento contra cupins e fungos para preservação de madeiras é aplicado efetivamente desde a década de 1940 no Brasil. Devido à realidade político-econômica do país passar por períodos de recessão, instabilidade, mudanças no modelo de governo, entre outros fatores históricos, a utilização da madeira em diversos setores da economia era realizada *in natura*, ou seja, sem quaisquer substâncias contra a ação de pragas degradantes ou à umidade. Estes tipos de tratamento eram caros e nem todas as áreas do país eram supridas pelas poucas indústrias do ramo (CIÊNCIA FLORESTAL, 2015).

Ao longo das últimas décadas, com a regulamentação do processo de tratamento da madeira pela ABNT, bem como com o avanço tecnológico tanto nas substâncias quanto nos métodos de tratamento, houve a “popularização” da utilização do tratamento para madeiras, difundindo, assim, a eficiência e o custo-benefício do investimento em uma casa ou um produto tratado, por exemplo.

A presente dissertação trabalhará a outra face deste cenário, uma vez que com a maior utilização da madeira tratada, houve também um incremento substancial na geração de resíduos, os quais devem passar por algum tipo de tratamento que possibilite sua destinação final.

Várias alternativas para destinação deste tipo de resíduo foram desenvolvidas até o momento, destacando-se a queima como a mais viável. Porém, fazendo-se uma análise energética do processo, vê-se que a simples queima do resíduo não resulta em uma recuperação de energia satisfatória, além de gerar a cinza como resíduo do processo, culminando por ser destinada em célula de aterro industrial Classe I (Resíduo Perigoso). Além deste impacto, considera-se também a emissão atmosférica resultante da queima, a qual requer cuidados especiais e geralmente com custo elevado.

Nesta direção, a presente dissertação apresentará os aspectos técnicos e econômicos do processo conhecido como *Chartherm*, ou Charterização, o qual consiste na destilação pirolítica escalonada do resíduo de madeira por etapas e à baixa temperatura, obtendo como resultado os metais pesados utilizados no tratamento da madeira, bem como o carbono em uma forma que possibilita sua utilização em processos industriais.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica-econômica da aplicação do método de Charterização na destinação final dos resíduos de madeira tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA) obtendo carbono ativo.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Estado da arte;
- b) avaliação técnica do processo de Charterização;
- c) avaliar as emissões atmosféricas das substâncias cobre, cromo e arsênio;
- d) avaliar a qualidade do carbono resultante do processo;
- e) avaliar quimicamente os resíduos oriundos do processo, propondo a destinação final adequada para estes;
- f) comparar técnica e economicamente o aproveitamento energético do processo com a destinação final mais difundida no país.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TRATAMENTO DA MADEIRA

Os primeiros dados sobre tratamento da madeira no Brasil datam da década de 1900, com a importação, pelo país, de uma usina de tratamento de madeira sob pressão. A referida usina foi instalada em Juiz de Fora, Minas Gerais, com o intuito de tratar dormentes para instalação nas estradas de Ferro da Companhia Estradas de Ferro Central do Brasil (CAMPO DIGITAL, 2013).

Porém, apenas em 1931, o Governo Federal inicia as primeiras pesquisas voltadas para a preservação de madeiras no então denominado Laboratório de Ensaio de Materiais, o qual viria a se chamar IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, em São Paulo.

No início da década de 1940 entra em funcionamento a primeira usina de tratamento de madeiras de capital privado utilizando o método de vácuo-pressão (CAVALCANTE, 1986).

Com o aumento da demanda de madeira tratada para suprir as obras do governo, como as ampliações da malha ferroviária (dormentes) e da rede de distribuição de energia elétrica (postes), o método de tratamento foi se difundindo, gerando um número cada vez maior de pesquisas no setor. Surgem então as primeiras Dissertações de Mestrado e Teses de Doutorado na área.

A partir dos anos de 1965 e 1967, quando entram em vigor a Lei 4797 de 20/10/1965 e os Decretos de Lei 58.016 de 08/08/1966 e 61.248 de 30/05/1967, respectivamente, o tratamento de madeiras ganha espaço no mercado e o desenvolvimento do setor avança em direção à aplicação em outros setores da economia, fazendo com que o processo se dissemine e o acesso à madeira tratada seja realizado de maneira mais abrangente ao longo das décadas seguintes (CIÊNCIA FLORESTAL, 2015).

Atualmente, o processo industrial para tratamento de madeiras mais difundido é realizado pelo método de vácuo-pressão, também denominado osmopressurização, tendo em vista a eficiência e a fácil operação dos equipamentos.

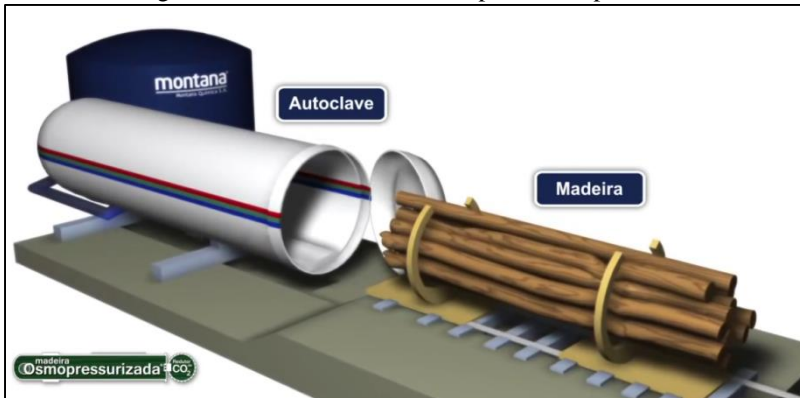
O processo de osmopressurização consiste basicamente nas seguintes etapas (MONTANA QUÍMICA S.A., 2008):

- a) inserção da madeira seca e beneficiada (sem cascas, galhos, folhas) na autoclave;
- b) um vácuo inicial retira a maior parte do ar existente nas células da madeira, criando espaço para a entrada da substância preservativa;

- c) sob vácuo, uma solução contendo 60 % de arseniato de cobre cromatado (CCA) é transferido do reservatório para a autoclave;
- d) aplica-se, então, alta pressão na autoclave fazendo com que o produto penetre na madeira durante um determinado tempo de operação, atingindo, assim, a saturação do produto na madeira;
- e) a pressão é reduzida novamente e a solução excedente é devolvida para o reservatório;
- f) aplica-se um novo vácuo para retirada do excesso de produto da superfície da madeira;
- g) os excessos de solução citados nos itens “e” e “f” podem ser reutilizados no tratamento de novos lotes de madeiras;
- h) a madeira é então retirada da autoclave e transferida para um pátio coberto, onde deverá secar por um período médio de 12 dias com o intuito de eliminar os excessos de produtos eventualmente existentes na superfície das madeiras.

A Figura 1 ilustra o início do processo de osmopressurização descrito acima.

Figura 1 – Sistema de tratamento por Vácuo-pressão.



Fonte: Montana Química S.A. (2015) (editado pelo autor).

As substâncias utilizadas para a preservação da madeira são muito diversificadas, cuja composição varia conforme o fabricante, bem como pelo tipo de aplicação desejada e o equipamento para realização do tratamento.

Algumas das principais substâncias serão citadas no próximo item, caracterizando o panorama atual do país no que tange à qualidade das substâncias utilizadas.

## 2.2 MADEIRAS PARA TRATAMENTO

Com a exploração descontrolada de espécies nativas entre as décadas de 1930 e 1940 e devido às características do solo não propícias ao cultivo de algumas espécies, o Brasil sentiu a necessidade de importar espécies exóticas, sendo o estado de São Paulo o pioneiro nesta estratégia.

Entre 1947 e 1948 foram introduzidos, do sudeste dos Estados Unidos, o *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, e do Chile, o *Pinus radiata*, sendo este último praticamente dizimado pela *Diploidia pinae*, após alguns anos. (REVISTA BRASIL FLORESTAL, 1977).

O *Pinus elliottii*, que nos Estados Unidos, ocorre desde o sul do Estado da Carolina do Sul até a Flórida, estendendo-se a oeste até quase o Rio Mississippi, e o *Pinus taeda*, que é encontrado nos Estados de Nova Jersey, Flórida, Texas, Arkansas, Oklahoma, Vale do Mississippi e Tennessee, espécies estas plantadas em larga escala no sul do País, compreendendo os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e região sul de São Paulo.

Estas regiões são propícias pois o *Pinus elliottii* necessita de invernos frios com temperaturas mínimas de 0 °C e não suporta períodos secos com déficit hídrico. Já o *Pinus taeda* está plantado em vários locais da região sul. Em altitudes superiores a 1200 m, apresenta crescimento excelente, superior ao do *Pinus elliottii*. Em contraste, os plantios em outras regiões indicam a pouca conveniência de se utilizar esta espécie nos reflorestamentos. (REVISTA BRASIL FLORESTAL, 1977).

O conhecimento das propriedades de cada madeira, é importante do ponto de vista da sua melhor utilização. As propriedades da madeira variam em função de cada espécie. Existem ainda variações entre árvores de uma mesma espécie, afetadas, principalmente, por fatores genéticos e ambientais. Ocorrem também variações influenciadas pelo sistema de manejo adotado. (REVISTA DA MADEIRA, 2004).

Em relação à posição na árvore, as propriedades podem variar tanto no sentido medula-casca (radial), quanto no sentido base-copa (longitudinal). As variações mais importantes são as que ocorrem no sentido medula-casca, associadas, às vezes, com outras no sentido da altura da árvore.

Um estudo foi conduzido para determinação das características físicas e mecânicas do *Pinus elliottii*.

Foram obtidos os dados de rendimento em madeira serrada, em %, densidade básica, em g/cm<sup>3</sup>, contração volumétrica total (retratibilidade), em %, resistência à flexão estática, em MPa, e resistência à compressão paralela às fibras, em MPa. (REVISTA DA MADEIRA, 2004).

Dados obtidos, mostraram que a massa desta espécie é composta de celulose, hemiceluloses, lignina, substâncias extrativas e água. Em uma peça de madeira, a massa da matéria sólida e dos extrativos permanece constante.

Por outro lado, o teor de umidade pode oscilar entre grandes limites, o que além de causar mudança no peso da madeira, quando removido abaixo da umidade de saturação das fibras, provoca também redução nas suas dimensões. É necessário, portanto, padronizar o teor de umidade da madeira quando da determinação da densidade.

Dependendo da condição de umidade da amostra, a densidade pode ser descrita de várias formas. Internacionalmente, é aceito o teor de umidade da madeira de 12 % como média de equilíbrio, sendo bastante comum determinar a densidade a essa umidade.

Para as condições brasileiras, adota-se umidade igual a 15 %. A segunda forma, também muito adotada, é a densidade básica, que é a relação entre a massa da madeira anidra e o seu volume saturado, ou seja, acima da umidade de saturação das fibras.

Revista da Madeira (2004) relata ainda que a variabilidade da densidade tem grande importância tecnológica e, por isso, sempre foi objeto de vários estudos. As variações da densidade de madeiras entre as diferentes espécies são devidas às diferenças na estrutura anatômica da madeira e na quantidade de substâncias extrativas presentes por unidade de volume.

A estrutura da madeira é caracterizada pelo tamanho e pela quantidade proporcional de diferentes tipos de células, tais como fibras, traqueídeos, vasos, dutos de resina, raios da madeira, e pela espessura da parede celular.

Para madeiras da mesma espécie, as variações de densidade provocadas por idade da árvore, genótipo, índice de sítio, clima, localização geográfica e tratos silviculturais são decorrentes de alterações nesses componentes estruturais e químicos. Os efeitos, em geral, são interativos e difíceis de serem avaliados isoladamente.

A densidade da madeira numa mesma árvore varia da medula para a casca e da base do tronco para a copa. Quando se estuda a variação no sentido medula-casca, podem frequentemente ser encontradas pequenas reduções na densidade da madeira mais recentemente formada, isto é, nas camadas mais próximas à casca.

O cerne geralmente contém maior quantidade de substâncias extrativas que o albúrnio; isto explica porque a densidade do cerne em muitas espécies é maior que a do albúrnio. Para a densidade no sentido base-copa da árvore, não existe modelo de variação definido.

A densidade é uma das propriedades que mais fornecem informações sobre as características da madeira. Há uma correlação positiva entre a densidade e as propriedades mecânicas da madeira. Além disso, a densidade é correlacionada às características de trabalhabilidade (pior), durabilidade natural (maior) e impregnabilidade da madeira (menor), entre outras. (REVISTA DA MADEIRA, 2004).

Quanto à variação da densidade, principalmente em árvores de climas tropicais, nota-se uma ampla faixa de variação, desde valores próximos a  $200 \text{ kg/m}^3$  até extremos, que podem chegar a  $1.200 \text{ kg/m}^3$ .

Apesar de ser considerada uma madeira de baixa resistência, a utilização do *Pinus elliottii* tem sido crescente e os indicadores apontam que cerca de 35 % do volume de madeira serrada produzida é formada por madeira dessa espécie. No país existem, aproximadamente, 1,5 milhões de hectares de plantações.

Portanto, tratam-se de espécies fundamentais para o fornecimento de matéria-prima, com destaque as Regiões Sul e Sudeste.

Apesar desta grande potencialidade, no Brasil pouco é utilizado para finalidades nobres dessa madeira por problemas de conhecimento, utilização e cultura. (REVISTA DA MADEIRA, 2011).

A floresta de *Pinus* é diferenciada pelo seu “multiuso” porque, após o corte, sua madeira pode ser destinada à indústria laminadora, que a utiliza para fabricação de compensados; para indústria de Madeira Laminada Colada, que utiliza para fins estruturais; para a indústria de serrados, que a transforma em madeira beneficiada ou é convertida em móveis; para a indústria de papel e celulose; para a indústria de MDF; para fins de construção civil como telhados e, mesmo o seu resíduo, tem sido aproveitado como biomassa para geração de vapor e energia. (REVISTA DA MADEIRA, 2011).

Devido à grande diversidade de organismos xilófagos em nosso país, a madeira de *Pinus* deve sim ser tratada e preservada para que tenha um melhor desempenho durante sua vida útil.

## 2.3 SUBSTÂNCIAS PARA PRESERVAÇÃO DA MADEIRA

Ao longo dos anos e do desenvolvimento dos métodos de preservação das madeiras, inúmeras técnicas e substâncias foram testadas, as quais nem sempre mostraram os resultados esperados, ora no âmbito técnico, ora no aspecto operacional.

A seguir far-se-á menção às características das substâncias que obtiveram melhores resultados nos aspectos supracitados, iniciando pelos preservantes óleos solúveis e, na sequência, os hidrossolúveis.

### **2.3.1 Óleos solúveis**

As substâncias óleos solúveis são pouco utilizadas atualmente no tratamento das madeiras, tanto pela maior complexidade operacional para sua aplicação, quanto pela toxicidade apresentada pelas características químicas das mesmas (MORRELL, 2012).

As principais substâncias óleos solúveis utilizadas nos processos de tratamento da madeira são:

- a) alcatrão;
- b) creosoto;
- c) naftenatos;
- d) óleo de antraceno;
- e) óxido de bis (tributil-estanho) – TBTO;
- f) pentaclorofenol;
- g) quinolato de cobre.

Entre os citados acima, destaca-se o creosoto como o mais utilizado na preservação de postes de eucalipto, uma vez que possui características químicas específicas para a preservação da madeira quando em contato com o solo (FERRARINI, 2012).

### **2.3.2 Hidrossolúveis**

Diferentemente dos óleos solúveis, estes tipos de preservantes utilizam a água como veículo para difundirem a substância no interior da madeira a ser tratada. Este é um fator que coloca os hidrossolúveis como mais utilizados atualmente no tratamento da madeira, uma vez que, por terem toxicidade relativamente mais baixa que os óleos solúveis, têm seu manuseio e operacionalidade facilitados, bem como resultam em menor lixiviação (REVISTA DA MADEIRA, 2007).

Apesar destas características, os preservantes hidrossolúveis são geralmente compostos por mais de uma substância, as quais aliam as respectivas características químicas para resultar em um tratamento adequado a cada tipo de aplicação, como maior reação química com os componentes da madeira, minimização de corrosão sobre metais e proteção contra o maior número de agentes xilófagos. Para prover estas características, os compostos geralmente utilizados na composição destes



sais são: arsênio, boro, cobre, cromo, flúor e zinco (REVISTA DA MADEIRA, 2007).

Dentre estes tipos de preservantes, as seguintes composições podem ser destacadas:

- a) arseniato de cobre amoniacal (ACA): conhecido também como chemonite, é composto por uma mistura de sais de arsênio (50,2 %) e sais de cobre (49,8 %) aplicado sob pressão e muito utilizado nos Estados Unidos e no Canadá;
- b) arseniato de cobre cromatado (CCA): também conhecido como celcure, é o preservativo hidrossolúvel mais utilizado mundialmente. Aplicado sob pressão, apresenta composições variáveis no que tange à concentração de arsênio, cobre e cromo;
- c) borato de cobre cromatado (CCB): chamado comumente de wolmanit CB, surgiu no intuito de substituir o arsênio na composição do CCA e responde bem quando não é aplicado em madeiras expostas ao contato com o solo. São aplicados tanto sob pressão quanto em métodos caseiros, como a imersão, por exemplo;
- d) FCAP: composto por sais de flúor, cromo, arsênio e fenol, é altamente tóxico à organismos xilófagos;
- e) cloreto de zinco cromatado (CZC): tem como características o controle da lixiviação e o controle do efeito corrosivo do cloreto de zinco puro, não sendo recomendado quando as madeiras serão utilizadas em temperaturas elevadas e locais com baixa umidade relativa, condições nas quais a madeira pode se deteriorar quimicamente. Além disto, age também como retardante de chama;
- f) compostos de boro: por serem pouco solúveis, o ácido bórico e o tetraborato de sódio necessitam de aquecimento durante a aplicação, a qual pode ser feita por imersão ou pulverização. (REVISTA DA MADEIRA, 2007).

## 2.4 ARSENIATO DE COBRE CROMATADO (CCA)

Conforme citado no item 2.2.2 b), o CCA é o preservativo hidrossolúvel mais utilizado no mundo, atualmente, por possuir algumas características que facilitam seu manuseio e resultados a longo prazo.

Como sua aplicação é muito difundida, as Usinas de Preservação de Madeiras (UPM) os utilizam sob pressão através das autoclaves, sendo este método justificado pelas rápidas reações de fixação dos produtos com a madeira. As autoclaves se mostram eficientes, tanto operacional quanto economicamente, pois o produto utilizado em excesso no tratamento de um lote de madeiras pode ser reutilizado no tratamento de lotes posteriores, sem que a qualidade do tratamento seja comprometida.

Encontrado em formulações variadas de arsênio, cobre e cromo, seus componentes propiciam as seguintes características específicas:

- arsênio: eficiente contra insetos xilófagos;
- cobre: em combinação com outros materiais, torna-se um excelente fungicida;
- cromo: fundamental para a fixação dos outros elementos químicos nas fibras da madeira.

Reunindo as características dos três componentes, o CCA garante à madeira tratada resistência contra fungos e insetos, possibilitando a utilização das madeiras para finalidades diversas, como postes, mourões, casas, dormentes, entre outras aplicações, principalmente porque a resistência aos fungos também proporciona a resistência à umidade, fazendo com que a madeira possa ser empregada em situações nas quais a exposição ao solo seja inevitável (MONTANA QUÍMICA S.A., 2008).

Para que as madeiras a serem preservadas garantam a eficiência do processo de vácuo-pressão, devem ser beneficiadas antes de submetidas ao processo de tratamento, necessitando ser descascadas e conterem a mínima umidade possível, pois assim a penetração do CCA será facilitada, atingindo o nível mais próximo do centro da peça possível durante a submissão ao tratamento na autoclave.

Outras características da madeira não sofrem alterações após o tratamento com CCA, como a condutividade elétrica, a combustibilidade, a corrosividade a metais em contato, não exala odores e vapores após o tratamento, e ainda proporcionam maior durabilidade aos acabamentos realizados na superfície tratada.

Os postes de madeira tratada apresentam muitas vantagens em relação aos postes de concreto e metálico: produto renovável, que

demanda baixa energia para a sua produção; baixa condutividade elétrica, o que reduz os riscos de acidentes e desligamentos por fugas ou descargas elétricas; maior suporte de tensão de impulso atmosférico, em relação aos postes metálicos; é mais leve que o poste de concreto, diminuindo os custos de transporte; maior resistência mecânica ao choque; maior facilidade de instalação; menor necessidade de acessórios, como por exemplo, ferragens, travessas, proporcionando economia de escala. O poste de madeira tratada é um produto competitivo, de vida útil prolongada e apresenta custo anual inferior aos postes produzidos com outros materiais, como o concreto (CIÊNCIA FLORESTAL, 2015).

## 2.5 *CHARTHERM* (CHARTERIZAÇÃO)

A incineração da madeira tratada com CCA é a destinação final mais eficiente para os resíduos gerados nos diversos processos que utilizam a madeira preservada.

Porém, devido à toxicidade dos componentes deste preservativo hidrossolúvel, a legislação vigente no Brasil é muito rigorosa no que tange às emissões atmosféricas, exigindo a comprovação da eficiência deste processo através de laudos específicos para os componentes do CCA.

No intuito de minimizar o impacto deste processo de destinação das madeiras tratadas, bem como proporcionar um método de recuperação energética mais eficaz, foi desenvolvido em Bordeaux, na França, o processo *Chartherm* ou Charterização.

A tradução livre da palavra *Chartherm* nos sugere “temperatura que reduz a carvão” ou “temperatura que carboniza”.

A definição é fundamentada quando se analisa o processo *Chartherm* e observa-se que a descrição dele propõe a queima da madeira à baixa temperatura, diferentemente da incineração, que opera com temperaturas acima de 1.273 K.

A destinação por *Chartherm* ainda é pouco difundida no Brasil em virtude tanto da resistência à mudança, quanto pelo desconhecimento da eficiência da técnica.

O processo de Charterização é composto por processos unitários bem definidos e fundamentais para descaracterizar a madeira e facilitar a separação dos produtos e resíduos após a redução térmica.

O processo é composto basicamente pelas seguintes etapas:

- a) trituração: responsável por picar a madeira até um comprimento máximo de 0,05 m. Nessa etapa também extrai e separa os componentes metálicos existentes nas peças de madeira (pregos,

- parafusos, pequenas chapas metálicas, etc), condicionando a madeira picada para envio ao próximo processo;
- b) processamento térmico: nesta etapa ocorre a Charterização propriamente dita, ou seja, é realizada a redução térmica em uma coluna de destilação pirolítica escalonada que opera em regime contínuo e com dois fluxos em contracorrente;
  - c) centrifugação pneumática: após deixarem o processador térmico pela base, os resíduos da queima são enviados para a centrífuga pneumática no intuito de separar os minerais do carbono, possibilitando o beneficiamento deste último.

O resultado destas operações é o carbono inerte, com pureza maior que 99 %, granulometria inferior a  $15 \cdot 10^{-6}$  m, podendo ser utilizado diretamente em processos industriais na forma de carvão ativo e negro de fumo, por exemplo (MONTANA QUÍMICA S.A., 2010).

A Figura 2 ilustra o processo de *Chartherm*, mostrando seus componentes operacionais.

Figura 2: Ilustração do processo *Chartherm*.



Fonte: adaptado de HELSEN; BOSMANS (2010).

Os números indicados na Figura 2 designam os equipamentos componentes do processo, discriminados por etapa, como segue:

- a) Trituração:

- 1 correia transportadora;
- 2 triturador;
- 3 silo para madeira triturada.

b) Charterização:

- 4 funil de alimentação;
- 5 reator;
- 6 gerador de gás quente;
- 7 queimador;
- 8 compressor;
- 9 lavador de gases e chaminé;
- 10 extrator e transportador de carvão.

c) Separação:

- 11 moinho de rolos;
- 12 centrífuga pneumática;
- 13 coletor de carvão;
- 14 armazenamento de carvão;
- 15 acondicionamento de metais pesados.

O processo de *Chartherm* está operando em escala industrial na França, sendo responsável pela destinação anual de aproximadamente 30.000 t de resíduos de madeira tratada naquele país. Os resultados demonstram um rendimento médio de 280 kg de carbono e 50 kg de resíduos (contendo a maioria dos metais do CCA) a cada tonelada do resíduo processada.

## 2.6 DESTINAÇÃO FINAL DA MADEIRA TRATADA NO BRASIL

Os resíduos oriundos da utilização da madeira tratada com CCA sempre foram tidos como problemáticos, pois, apesar de terem as mesmas aplicações da madeira comum, não podem ter a destinação trivialmente adotada para estas, uma vez que estão impregnadas por produto composto por substâncias químicas danosas à vida e à qualidade do meio ambiente em que estão expostas.

Atualmente no Brasil, a destinação final dos resíduos mais complexos passa pela avaliação de duas referências, as quais mostram o caminho para que o resíduo tenha o melhor tratamento pertinente à sua característica físico-química: ABNT NBR 10004:2004 a 10007:2004 e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

O conjunto de normas ABNT NBR que discorrem sobre classificação e caracterização de resíduos é dividida em 4 normas específicas, sendo:

- 1) ABNT NBR 10004:2004: Resíduos Sólidos – Classificação;
- 2) ABNT NBR 10005:2004: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos;
- 3) ABNT NBR 10006:2004: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
- 4) ABNT NBR 10007:2004: Amostragem de Resíduos Sólidos.

Deste conjunto de normas apresentado acima, a NBR 10004:2004 é a norma que interessa ao desenvolvimento do trabalho por dispor sobre as características e as classificações aplicadas aos resíduos sólidos, bem como das substâncias que enquadram os resíduos como perigosos, apresentando anexos com os nomes específicos das substâncias.

A NBR 10004:2004 categoriza os resíduos em 2 classes:

Classe I - Perigosos: apresentam propriedades físico-químicas e infecto-contagiosas, podendo ocasionar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente. Apresentam uma ou mais das seguintes características:

- a) toxicidade;
- b) inflamabilidade;
- c) reatividade;
- d) patogenicidade;
- e) corrosividade.

Classe II - Não-Perigosos: esta classe subdivide-se em:

- Classe II A – Não inertes: aqueles que não se enquadram como Resíduos Classe I ou Classe II B – Inertes, podendo apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;

- Classe II B – Inertes: todos aqueles que quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água. (ABNT, 2004).

Os trabalhos voltados para determinação das concentrações de cromo e arsênio em madeiras tratadas com CCA, geralmente utilizam os postes como objeto de pesquisa, uma vez que há inúmeros postes tratados disponíveis para realização do trabalho, bem como estes estão expostos há anos às intempéries, resultando em um excelente produto para análise do comportamento do preservante no tocante à lixiviação.

Segundo Ferrarini *et al.* (2012), os resultados encontrados na análise de caracterização de postes tratados com CCA apresentaram variações consideráveis nos postes analisados, obtendo concentrações de arsênio entre 2,7 e 9,2 mg/L e de cromo entre 0,6 e 6,1 mg/L. Comparando-se as concentrações de arsênio com a Tabela 1, pode-se classificar a madeira tratada com CCA como resíduo perigoso Classe I, uma vez que ultrapassou em todas as amostragens o limite máximo de 1,0 mg/L.

Tabela 1: Limite máximo no extrato do ensaio lixiviado.

Parâmetro	Código de identificação	Limite máximo no lixiviado (mg/L)
Inorgânicos		
Arsênio	D005	1,0
Cromo Total	D009	5,0

Fonte: ABNT (2004).

Já a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, prevê como principais objetivos em seu artigo 7.º:

- a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
- redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;
- incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
- incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao

reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético (BRASIL, 2010).

Em suma, a PNRS determina que as fábricas e indústrias tentem evitar o desperdício durante o ciclo de vida do produto.

Desde a aquisição da matéria-prima, passando pela fabricação do produto até o momento do descarte final do resíduo, os geradores devem procurar alternativas sustentáveis para o aumento da reciclabilidade dos resíduos industriais gerados no parque fabril do país.

Este comportamento fará com que a indústria elimine a disposição final dos resíduos em aterros, deixando estes apenas para a recepção dos rejeitos.

Para que um resíduo seja considerado rejeito, todas as alternativas e tecnologias de reciclagem disponíveis devem ter sido pesquisadas e não terem resultado em uma valorização, recuperação energética ou possibilidade de reuso.

Porém, o que se vê atualmente nas cidades é a busca pela destinação de menor custo financeiro, ou seja, sem levar em consideração os preceitos estabelecidos pelas normas técnicas ou pelas legislações ambientais vigentes.

Atualmente, o cenário da destinação final para a madeira tratada na Região Sul do país não é nada animador, ressaltando que esta região tem importância nacional em virtude de seu parque moveleiro, bem como das inúmeras madeireiras e serralherias distribuídas pelos municípios que compreendem a região.

Em entrevista com representantes do SINDIMAD - Sindicato da Indústria da Madeira e do Mobiliário da AMUREL (Associação dos Municípios da Região de Laguna), o qual tem atualmente 99 empresas filiadas, fora relatada a dificuldade da maioria das empresas do setor moveleiro e das madeireiras da região no que tange à destinação final de seus resíduos, uma vez que a principal técnica disponível é a destinação em célula de aterro industrial Classe I.

A resposta para este comportamento se dá primeiramente pelo custo benefício da destinação e depois pela falta de empreendimentos que venham ao encontro da PNRS, dando opções para o gerador de destinar corretamente seus resíduos, buscando o alinhamento aos preceitos ambientais instituídos pela legislação em vigor e realizando o aproveitamento energético dos resíduos com características propícias a tais métodos.

Os métodos que podem ser empregados na destinação das madeiras oriundas das serrarias e indústrias moveleiras são listados a seguir:



- a) briquetagem: se baseia na compactação da serragem, formando cilindros compactos com maior densidade do resíduo e com baixa umidade relativa;
- b) substituição da lenha: o empreendimento ideal para destinar esta madeira deve possuir um sistema de controle de emissões, como lavador de gases, por exemplo, pois a queima dos resíduos de madeira tratada emite poluição atmosférica significativa em virtude dos metais constituintes do preservante utilizado na madeira tratada;
- c) produção de vapor e energia elétrica: aproveitamento da madeira como combustível para a geração de energia e vapor em outros processos utilitários na indústria;
- d) incineração: queima da madeira a altas temperaturas, sem aproveitamento energético do processo e com altos níveis de emissões de poluentes na atmosfera. Embora eficiente, este tipo de tecnologia ainda é muito dispendioso frente à receita líquida da maioria dos geradores de resíduos;
- e) reuso da madeira na fabricação de bens, como mobiliário de uso externo, caixas de lixo, “decks”, cavaletes, parapeitos, paletes, etc.;
- f) incorporação da madeira em objetos a base de fibra de madeira com plástico ou fibra de madeira com cimento;
- g) em alguns países, pela escassez de madeira, utilizam-se os resíduos de madeira de clareamento para a produção da pasta de papel.

Baseado no exposto, este trabalho visa trazer uma nova alternativa para o mercado da destinação de resíduos de madeira tratada, ainda pouco explorada, porém com potencial competitivo nos âmbitos técnico, econômico e ambiental.



### 3 METODOLOGIA

Este tópico será responsável por descrever os materiais e métodos utilizados para realização dos experimentos, mostrando as características e a importância de cada equipamento, bem como os métodos de calibração, quando utilizados.

Todos os experimentos e análises laboratoriais desenvolvidas nesta dissertação foram realizados no CENTEC – Centro Tecnológico da Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, localizado no município de Tubarão, região Sul de Santa Catarina.

#### 3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

A técnica do *Chartherm* em escala laboratorial requer que o reator opere com atmosfera livre de oxigênio no intuito de evitar a combustão da amostra. Sendo assim, os materiais e equipamentos empregados durante o desenvolvimento dos ensaios serão descritos a seguir.

##### 3.1.1 Triturador

O triturador utilizado para cominuir a madeira é de fabricação regional e seu funcionamento é realizado pela utilização de 2 (duas) facas dispostas a 180° uma em relação a outra.

Figura 3: Triturador para madeira.



Fonte: arquivo do autor (2018).

### 3.1.2 Amostras

As amostras submetidas ao processo de Charterização são formadas por resíduos de madeira de pinus (*pinus elliottii*) tratados com CCA, coletados diretamente na fonte geradora, em uma Usina de Tratamento de Madeira (UTM) na região de Tubarão – SC.

Estes resíduos de madeira tratada com CCA foram fracionados no triturador do item 3.1.1 no intuito de garantir a uniformidade do lote no que tange às características da madeira e à concentração do CCA no mesmo, conforme evidenciado na Figura 4.

Figura 4: Amostra de madeira tratada com CCA cominuída.



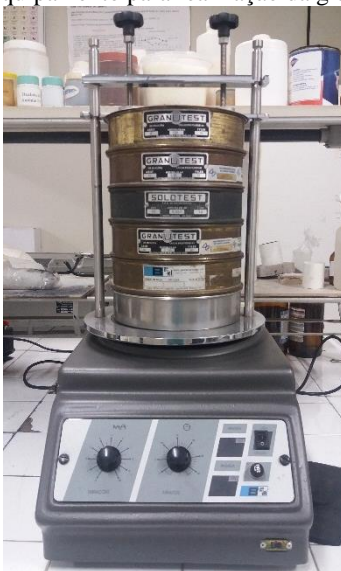
Fonte: arquivo do autor (2018).

### 3.1.3 Peneiras

Conjunto de peneiras com diferentes diâmetros e equipamento vibratório para separação da madeira cominuída em diferentes granulometrias (Figura 5).

No ensaio granulométrico foram utilizadas as malhas Tyler Mesh 14 (1,190 mm), 32 (0,500 mm), 48 (0,297 mm), 60 (0,250 mm) e 80 (0,180 mm), uma vez que a madeira tratada cominuída possuía características compreendidas nesta faixa de diâmetros.

Figura 5: Equipamento para realização da granulometria.



Fonte: arquivo do autor (2018).

### 3.1.4 Balança

A balança utilizada para pesar tanto as amostras quanto os produtos da Caracterização é da marca Marte, modelo AS2000C, com capacidade de 2,0 kg e precisão de 0,01 g.

### 3.1.5 Forno Mufla

O aquecimento do reator foi realizado por um forno mufla, marca Quimis, modelo Q318M, com faixa inicial de trabalho de 573,15 K e capacidade de aquecimento até 1.173,15 K.

### 3.1.6 Reator pirolítico

É confeccionado em aço carbono, possui fundo fixo e tampa superior removível, a qual é fechada com parafusos, conforme demonstrado na Figura 6.

Possui diâmetro e profundidade internos iguais a 9,10 cm e 17,00 cm, respectivamente. O volume interno do reator é igual a 1,10 L.

A parte inferior interna possui pequenos orifícios para que a difusão do nitrogênio na câmara pirolítica torne a atmosfera inerte.

A vedação do reator é garantida por um anel de cobre localizado na parte interna da tampa. Esta, além dos furos para fixação dos parafusos, possui outros 3 orifícios: um para passagem do tubo que alimenta o reator com gás nitrogênio, outro contendo uma conexão para remoção dos gases oriundos da reação no interior do reator e o último orifício serve para introdução do termopar, possibilitando o contato direto do instrumento com a amostra no interior do reator e, assim, o controle do processo.

Figura 6: Reator pirolítico.



Fonte: arquivo do autor (2018).

### 3.1.7 Gás Nitrogênio

Utilizado para gerar a atmosfera inerte no interior do reator, evitando a combustão da amostra submetida à Caracterização.

O gás utilizado é oriundo de um cilindro de gás nitrogênio, do tipo 5.0 analítico (99,999 % de pureza), com regulador de pressão ajustado para 1,0 atm.

### 3.1.8 Medidor de Vazão

A vazão volumétrica do gás nitrogênio foi medida através de medidor de vazão da marca *Brooks Instruments*, com capacidade nominal de medição de 0,4 a 5,0 L de ar/min, conforme Figura 7.

Figura 7: Medidor de vazão *Brooks Instruments*.



Fonte: adaptado pelo autor do site Brooks Instruments (2018).

### 3.1.9 Termopar

O termopar utilizado para determinação da temperatura é do tipo “K”, com limites de detecção entre 73,15 K e 1.473,15 K.

### 3.1.10 Indicador digital de temperatura

A Figura 8 mostra o medidor de temperatura modelo Novus N480D, no qual o termopar é conectado.

Figura 8: Indicador digital de temperatura.



Fonte: arquivo do autor (2018).

### 3.1.11 Serpentina de cobre

Serpentina confeccionada em cobre recozido e com diâmetro interno de 4,0 mm. O conjunto possui 8,0 espiras com diâmetro interno de 10,0 cm e anilha em uma das extremidades para a conexão da serpentina à tampa do reator.

### 3.1.12 Recipiente com água

O recipiente é confeccionado em metal ou vidro para acondicionar a serpentina, a água de arrefecimento da serpentina e as substâncias componentes dos gases da Charterização.

A água foi utilizada à temperatura ambiente (293,15 a 298,15 K).

### 3.1.13 Equipamento experimental montado

A Figura 9 a seguir, mostra o posicionamento de cada equipamento utilizado para realização dos experimentos, caracterizando a ligação entre eles, bem como a seqüência e importância de cada um no sistema.

Figura 9: Equipamentos para realização do experimento.

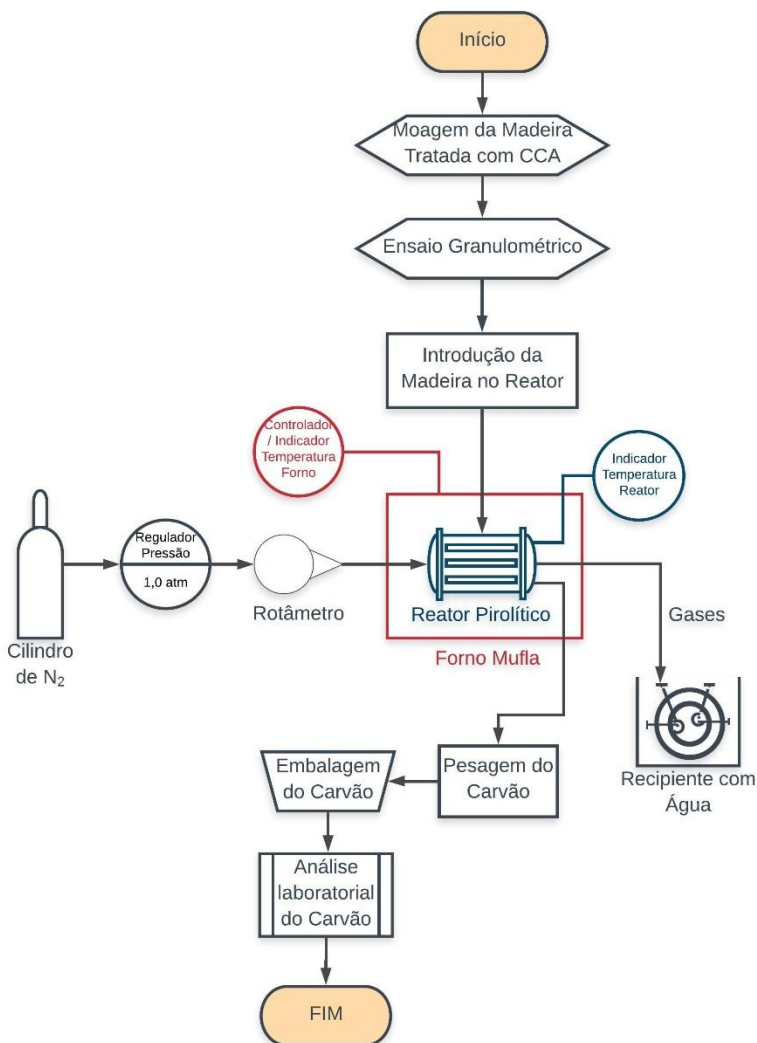


Fonte: arquivo do autor (2018).

O fluxograma apresentado na Figura 10, tem o intuito de demonstrar as etapas pertencentes ao experimento, elucidando o entendimento da Figura 9.

Figura 10: Fluxograma do processo experimental.





Fonte: elaborado pelo autor (2018).

### 3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram separadas e pesadas a partir de um mesmo lote de madeira tratada e triturada, garantindo, assim, a uniformidade da qualidade da madeira tratada com CCA. Esta medida evita possíveis

desvios oriundos do processo de tratamento que dá origem aos resíduos analisados.

### 3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS NA AMOSTRA

Antes de iniciar o experimento propriamente dito, uma amostra de 30,0 g do lote de madeira triturada foi enviada para análise de alguns parâmetros, os quais são listados juntamente à respectiva técnica de determinação no Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros analisados e técnicas utilizadas.

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Metodologia</b>
Umidade	%	gravimetria (105 °C)
Matéria volátil	%	gravimetria (calcinação a 850 °C – por 7 min)
Teor de cinzas	%	gravimetria (calcinação a 850 °C – por 12 h)
Teor de carbono fixo	%	Cálculo
Massa específica aparente	g/cm <sup>3</sup>	Método Eschka
Teor de enxofre	%	relação massa × volume
Arsênio	mg/kg	digestão ácida e espectrofotometria de absorção atômica - grafite
Cobre	mg/kg	digestão ácida e espectrofotometria de absorção atômica - grafite
Cromo	mg/kg	digestão ácida e espectrofotometria de absorção atômica - grafite

Fonte: CENTEC UNISUL (2018).

### 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.4.1 Atmosfera Inerte no Reator

Para garantir que o interior do reator não contenha oxigênio, o gás nitrogênio é inserido no reator a uma taxa de 1,28 L/min durante 3 min,

possibilitando, assim, o início do aquecimento do forno mufla e do reator, respectivamente.

A vazão de gás nitrogênio é mantida na mesma vazão, ininterruptamente, durante todo o período do experimento.

### **3.4.2 Aquecimento do forno mufla e do reator**

O forno mufla foi aquecido a uma taxa média de 10,86 K/min até atingir a temperatura de operação, a qual foi mantida entre 663,15 e 673,15 K.

Já o reator pirolítico operou na temperatura indicada pela literatura consultada (HELSEN, 2006), ou seja, no máximo em 623,15 K e o aquecimento do mesmo foi realizado à taxa média igual a 7,21 K/min.

Ajustes na temperatura do forno podem se fazer necessários durante os ensaios devido à variação de temperatura no interior do reator em determinados momentos do experimento.

### **3.4.3 Aferição do termopar**

No intuito de verificar a assertividade dos apontamentos do termopar, foi realizada a calibração do mesmo conforme NBR 14610:2015 (ABNT, 2015).

Para tanto, fora utilizada água pura, balão volumétrico, manta de aquecimento e termômetro aferido.

A execução dos passos indicados na norma supracitada foi realizada com 8 (oito) pontos de temperatura, realizando medições simultaneamente de 10 em 10 K.

### **3.4.4 Correção do medidor de vazão**

Como mencionado no item 3.1.8, o medidor de vazão é calibrado para medição de vazão do ar.

Segundo o fabricante do instrumento, a correção para obtenção de um valor fidedigno é utilizar o percentual do gás nitrogênio no ar, ou seja, o valor lido no instrumento deve ser multiplicado por 0,80.

$$\dot{V}_{N_2} = \dot{V}_{leitura} \times Fator\ de\ Correção \quad (1)$$

### **3.4.5 Quantidade de amostra por batelada**

Para garantir que toda a massa de madeira inserida no reator esteja exposta a condições homogêneas, cada batelada do experimento é realizada com 50,0 g de madeira tratada cominuída.

A massa de 50,0 g foi considerada para garantir um rendimento mínimo de 20,0 % a cada batelada, tendo em vista que as análises laboratoriais do produto requerem cerca de 10,0 g por amostra.

### **3.4.6 Variação das condições do experimento**

Segundo Helsen e Hacala (2006), a temperatura no interior do reator deve ser mantida no máximo a 623,15 K, pois nesta condição o processo de destilação pirolítica ocorre de modo a proporcionar a liberação dos hidrocarbonetos e metais da estrutura da madeira triturada, deixando apenas o mineral com maior teor de carbono.

Esta informação dá subsídios para que uma única variável seja alterada a cada batelada, isto é, o tempo de permanência da amostra exposta à 623,15 K.

Para garantir os resultados obtidos com a variação dos tempos de submissão das amostras ao processo de Charterização, 3 (três) bateladas para cada período estipulado foram realizadas, resultando em 9 (nove) amostras de madeira tratada cominuída e submetida ao processo de Charterização.

Ainda em comparação ao processo realizado em escala laboratorial por Helsen e Hacala (2006), onde o tempo indicado foi de 100,0 min de exposição à temperatura máxima de 623,15 K, no presente trabalho foram fixados 3 (três) intervalos de tempo de exposição da amostra à Charterização: 30,0, 60,0 e 90,0 min.

Esta alteração em relação à literatura almeja a redução dos custos com energia do processo, porém, atingindo o mesmo percentual de carbono presente no produto.

Durante a realização de cada batelada, o tempo supracitado é contado a partir do momento em que o termopar indica que a temperatura interna atingiu 613,15 K, mantendo a temperatura entre 613,15 e 623,15 K até a finalização da respectiva batelada.

### **3.4.7 Finalização do experimento**

Com a finalização do tempo indicado no item 3.4.6, o forno mufla é desligado, o reator é retirado do interior do forno, porém, a injeção de

gás nitrogênio é mantida, tanto para garantir a manutenção da atmosfera inerte, bem como auxiliar no resfriamento do produto da Charterização.

### **3.4.8 Retirada e conservação da amostra**

O resfriamento do conjunto citado no item anterior é mantido até que a temperatura indicada pelo termopar atinja 353,0 K, possibilitando a retirada do produto do reator.

Procede-se, então, com a desmontagem do reator e a pesagem do produto da Charterização, catalogando a amostra para controle e análises laboratoriais.

Cada amostra do produto é guardada de modo a preservá-la temporariamente até a realização das análises.

Para tanto, faz-se a injeção de pequena quantidade de gás nitrogênio no recipiente para preservação da amostra, garantindo a integridade da mesma.

## **3.5 CUSTO ENERGÉTICO**

O principal ponto de avaliação para comprovar a viabilidade econômica do processo é o consumo de energia necessário para a destilação pirolítica da madeira, o qual deve contabilizar as etapas de Charterização, moagem e centrifugação do produto charterizado.

### **3.5.1 Custo Energético com Relação ao Calor Fornecido**

Todas as bateladas foram realizadas utilizando-se o forno mufla citado no item 3.1.15. Porém, como a eficiência energética do forno situa-se abaixo de 10 %, o cálculo da energia necessária para o processo será realizado onde o reator opera alimentado por GLP ou gás natural e está na posição vertical com todas as faces expostas ao ar.

Os dados utilizados na realização dos cálculos foram obtidos durante os experimentos, os quais são característicos do processo, como a variação de temperatura, o tempo de cada batelada e as propriedades de cada material.

O grande consumo de energia se dá no primeiro estágio do processo, ou seja, no aquecimento da amostra até o patamar de 613,15 K, uma vez que tanto o resíduo de madeira quanto o reator estão à temperatura ambiente, ou seja, cerca de 298,15 K.

Após esta etapa, a energia fornecida é utilizada apenas para garantir a manutenção da temperatura, ou seja, compensar as fugas de

energia provocadas pela variação de temperatura do gás nitrogênio, bem como pela troca térmica existente entre a parede do reator e o meio ambiente em que ele se encontra.

As equações subsequentes demonstram os cálculos necessários em cada etapa do processo e os respectivos consumos por tipo de combustível.

A energia necessária para fazer com que a madeira seja charterizada, foi calculada com base na equação:

$$\Delta q_{madeira} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2)$$

Como o calor específico do resíduo de madeira tratada é igual a 1.758,12 J/kg.K, utilizou-se como base de cálculo 1.000,0 kg de resíduos de madeira para determinação da necessidade energética para elevar a temperatura dessa massa de 301,15 K até 623,15 K.

O reator pirolítico opera à pressão constante. Então, o cálculo da variação de entalpia devido à adição do gás nitrogênio no sistema pode ser realizado como:

$$dH = C_p dT \quad (3)$$

Considerando que a capacidade calorífica do nitrogênio é variável com a temperatura, a equação (3) deve ser reescrita como:

$$dH = \left( a + bT + \frac{c}{T^2} \right) dT \quad (4)$$

Substitui-se os coeficientes para determinação da variação de entalpia para o gás nitrogênio, determinando assim a quantidade de energia em relação ao tempo de experimento.

Para determinação da dissipação de calor pelas paredes do reator pirolítico, fora levada em consideração a convecção natural existente em todas as faces do cilindro, ou seja, no topo, no fundo e na parede lateral.

A taxa de dissipação de calor por convecção natural em um cilindro é dada pela Equação (5), conforme segue:

$$q_{convecção} = \left( \frac{Nu_L \cdot k}{L_{topo}} \cdot A_{topo} + \frac{Nu_L \cdot k}{L_{lateral}} \cdot A_{lateral} + \frac{Nu_L \cdot k}{L_{fundo}} \cdot A_{fundo} \right) \cdot \Delta T \quad (5)$$

Os números de *Nusselt* (*Nu*) para o topo e fundo do reator são calculados pelas respectivas equações:

$$Nu_{topo} = 0,54 \cdot Ra_{topo}^{1/3} \quad (6)$$

e

$$Nu_{fundo} = 0,27 \cdot Ra_{fundo}^{1/3} \quad (7)$$

Sendo o número de *Rayleigh* ( $Ra$ ) proporcional a:

$$Ra_{topo/fundo} = Gr \cdot Pr \quad (8)$$

Por sua vez, o número de *Grashof* ( $Gr$ ) é determinado através da equação:

$$Gr_{topo/fundo} = \frac{\beta \cdot g}{\nu^2} \cdot L_{topo/fundo}^3 \cdot \Delta T \quad (9)$$

O número de *Prandtl* ( $Pr$ ) e o termo  $\frac{\beta \cdot g}{\nu^2}$  são tabelados por substância e temperatura.

No entanto, para a convecção na parte lateral do reator, deve-se levar em consideração a proporção entre o Diâmetro ( $D$ ) e o Comprimento ( $L$ ) do mesmo, atendendo à seguinte relação:

$$\frac{D}{L_{lateral}} \geq \frac{35}{Gr_{lateral}^{1/4}} \quad (10)$$

Quando a equação (10) é atendida, pode-se considerar que a convecção natural na lateral do cilindro ocorre com as mesmas características de uma placa plana vertical, tornando o cálculo relativamente mais prático.

Logo, o número de *Nusselt* ( $Nu$ ) para a lateral do reator é dado por:

$$Nu_{lateral} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (11)$$

Os números de *Rayleigh* ( $Ra$ ) e *Grashof* ( $Gr$ ), possuem as mesmas propriedades das equações (8) e (9), alterando-se apenas a dimensão analisada, ou seja:

$$Ra_{lateral} = Gr \cdot Pr \quad (12)$$

e

$$Gr_{lateral} = \frac{\beta \cdot g}{\nu^2} \cdot L_{lateral}^3 \cdot \Delta T \quad (13)$$

Logo, com a substituição das propriedades físicas do ar e os respectivos cálculos das trocas em cada face do reator, chega-se à taxa de dissipação de calor total, em J/s.

Com os valores de consumo de energia por unidade de tempo, pode-se calcular a energia total necessária para cada batelada do experimento.

Para determinação da quantidade necessária de GLP e de gás natural foram utilizados os valores de Poder Calorífico Inferior (PCI) do GLP como 46.883,20 kJ/kg e 46.911,48 kJ/kg para o gás natural na Equação (14):

$$m_{gás} = \frac{Q_{total}}{PCI_{gás}} = \frac{\Delta q_{madeira} + \left( dH \cdot \frac{V_{N_2} \cdot \rho_{N_2}}{1000 M_{N_2}} \right) \cdot t + q_{convecção} \cdot t}{PCI_{gás}} \quad (14)$$

### 3.6 ANÁLISES LABORATORIAIS DOS PRODUTOS

Após a realização de cada batelada, o produto resultante foi enviado para análise dos mesmos parâmetros indicados na Tabela 2 supracitada.

Além das amostras sólidas, 3 amostras líquidas, representando os períodos de 30, 60 e 90 min de exposição, foram enviadas para análise laboratorial para determinação das concentrações de cobre, cromo e arsênio presentes, almejando verificar a quantidade de metais emitidas durante o processo de Charterização da madeira, possibilitando, assim, a determinação dos percentuais de metais arrastados pelas emissões do processo.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação da metodologia descrita no item 3 e seus respectivos subitens, culminou nos resultados apresentados nos itens a seguir.

Cada batelada experimental foi identificada por um número e a respectiva data de realização da mesma, resultando nos códigos descritos na Tabela 3, os quais serão utilizados a partir desta seção.

Tabela 3: Codificação das amostras.

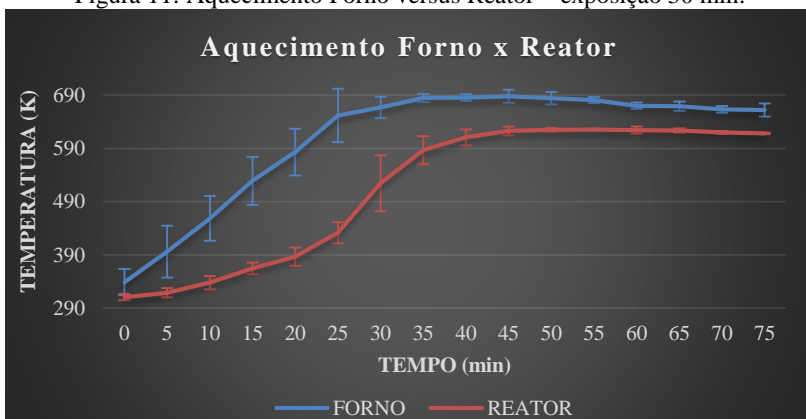
Tempo de Exposição (min)	30	60	90
Código da Amostra	04-12/04/18	05-12/04/18	06-14/04/18
	07-19/04/18	08-19/04/18	09-20/04/18
	10-20/04/18	11-24/04/18	12-24/04/18

Fonte: elaborado pelo autor (2018).

### 4.1 AQUECIMENTO DO FORNO MUFLA E DO REATOR

A Figura 11 demonstra a média e o desvio padrão do aquecimento do forno e do reator para a exposição das amostras 04, 07 e 10 à Characterização por 30 minutos.

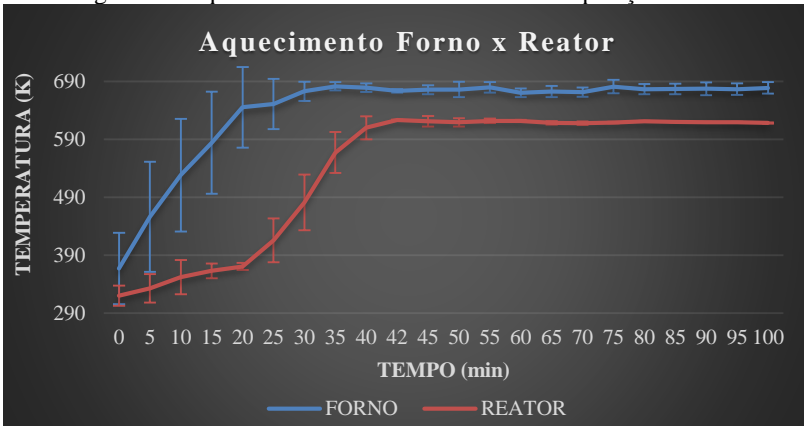
Figura 11: Aquecimento Forno versus Reator – exposição 30 min.



Fonte: elaborado pelo autor (2018).

O comportamento das amostras 05, 08 e 11, quando expostas à Charterização por 60 minutos, é demonstrado na Figura 12 a seguir, destacando os valores médios e seus respectivos desvios padrão.

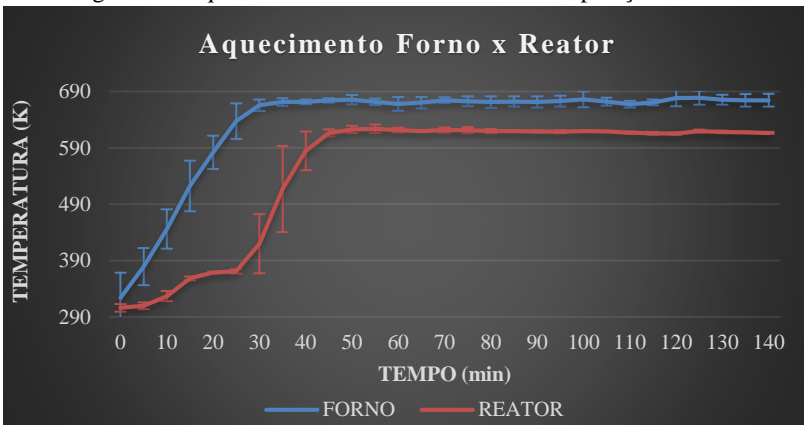
Figura 12: Aquecimento Forno versus Reator – exposição 60 min.



Fonte: elaborado pelo autor (2018).

Na Figura 12, fica nítida a estabilização da temperatura em torno de 370,0 K durante aproximadamente 5 (cinco) minutos, tempo este relacionado à eliminação da umidade existente na madeira tratada.

Figura 13: Aquecimento Forno versus Reator – exposição 90 min.



Fonte: elaborado pelo autor (2018).

Na Figura 13, a qual demonstra o comportamento do aquecimento do Forno e do Reator para as amostras 06, 09 e 12, expostas à Charterização por 90 minutos, pode-se notar o mesmo efeito destacado na Figura 10, porém com melhor visibilidade da estabilização da temperatura entre 20 e 25 minutos de experimento, mais uma vez simbolizando a eliminação da umidade da madeira tratada.

#### 4.2 AFERIÇÃO DO TERMOPAR

Aplicando o método detalhado no item 3.4.3, a aferição do termopar apresentou os dados descritos na Tabela 4.

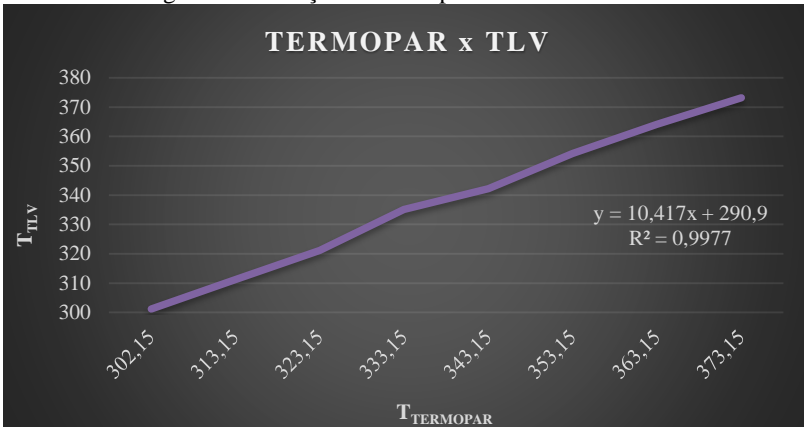
Tabela 4: Aferição do termopar versus termômetro.

<b>PONTO</b>	<b>T<sub>TLV</sub> (K)</b>	<b>T<sub>TERMOPAR</sub> (K)</b>	<b>Erro (K)</b>
1	301,15	302,15	1,00
2	311,15	313,15	2,00
3	321,15	323,15	2,00
4	335,15	333,15	-2,00
5	342,15	343,15	1,00
6	354,15	353,15	-1,00
7	364,15	363,15	-1,00
8	373,15	373,15	0,00

Fonte: elaborado pelo autor (2018).

A Figura 14 comprova que o coeficiente de determinação quadrado resultante da relação entre os dados das medidas do termopar e do termômetro apresentou resultado satisfatório, atestando assim que as medidas tomadas com o termopar são fidedignas e podem servir de base para os apontamentos gerados nos experimentos.

Figura 14: Aferição do termopar versus termômetro.



Fonte: elaborado pelo autor (2018).

#### 4.3 CORREÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO

A vazão de nitrogênio utilizada para a realização dos experimentos foi lida no instrumento como 1,60 L/min.

Logo, a vazão corrigida do gás nitrogênio nos experimentos foi determinada pela Equação (1), resultando em 1,28 L/min.

#### 4.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES LABORATORIAIS

As Tabelas 5 e 6 demonstram as médias e respectivos desvios padrão, com valores calculados em base seca, para os resultados obtidos com a aplicação do método de Charterização nos diferentes períodos de exposição das amostras.

Tabela 5: Resultados dos ensaios realizados nos produtos oriundos da Charterização.

Ensaio	Tempo de Exposição (min)		
	30	60	90
Umidade (%)	-	-	-
Matéria volátil (%)	57,46 ± 8,06	53,44 ± 4,99	54,3 ± 4,55
Teor de cinzas (%)	4,31 ± 0,17	4,2 ± 0,29	4,05 ± 0,04
Teor de carbono fixo (%)	38,23 ± 7,90	42,36 ± 4,80	41,65 ± 4,52
Teor de enxofre (%)	0,40 ± 0,13	0,36 ± 0,02	0,31 ± 0,00
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,20 ± 0,01	0,20 ± 0,00	0,20 ± 0,01
Arsênio (%)	2,14 ± 0,74	1,69 ± 0,42	2,3 ± 1,42
Cobre (%)	0,96 ± 0,21	0,85 ± 0,15	0,89 ± 0,08
Cromo (%)	0,73 ± 0,04	0,68 ± 0,13	0,72 ± 0,11

Fonte: relatórios de ensaios CENTEC UNISUL (2018).

Percebe-se que o teor de cinzas tem pequena variação em seus valores, enquanto a variação no teor de matéria volátil tem extremos que podem atingir aproximadamente 17,0 %, sendo determinante para o cálculo do teor de carbono fixo.

A diferença na constituição química da madeira pode afetar diretamente o rendimento de gases durante a carbonização devido à baixa resistência à degradação térmica dos compostos de celulose (SANTOS *et al.*, 2016).

Já o teor de carbono fixo, apesar de apresentar valores abaixo do indicado por Helsen (2009) (99,9 %), está situado na faixa obtida por Azevedo (2013) (aproximadamente 30,0 %), no entanto, no presente trabalho o dispêndio energético é muito menor devido à operação do sistema a temperatura inferior e com menores tempos de exposição.

Tabela 6: Resultados dos ensaios de Charterização.

Amostra	Tempo de Exposição (min)	Massa Resultante (%)	Teor de Carbono (%)
04-12/04/18	30,00	37,74 ± 4,20	38,23 ± 7,90
07-19/04/18			
10-20/04/18			
05-12/04/18	60,00	36,42 ± 1,79	42,36 ± 4,80
08-19/04/18			
11-24/04/18			
06-14/04/18	90,00	36,79 ± 1,21	41,65 ± 4,52
09-20/04/18			
12-24/04/18			

Fonte: elaborado pelo autor (2018).

Nota-se na Tabela 7, que o rendimento de cada batelada resultou em valores acima do indicado por Helsen (2009), a qual cita em torno de 29,65 %, em relação à massa inicial de resíduos de madeira tratada.

A Tabela 7 mostra as concentrações de cobre, cromo e arsênio no efluente líquido gerado com a lavação dos gases, os quais foram direcionados pela serpentina para um recipiente contendo 1 L de água, proporcionando o arrefecimento dos gases e fazendo com que os metais fossem retidos no líquido.

Tabela 7: Concentração de metais no efluente líquido.

Amostra	Tempo de Exposição (min)	Concentração (mg/L)		
		Cobre	Cromo	Arsênio
07-19/04/18	30,00	0,0063	0,0049	0,0119
08-19/04/18	60,00	0,0053	0,0046	0,0141
06-14/04/18	90,00	0,0043	0,0033	0,0087

Fonte: elaborado pelo autor (2018).

Embora a concentração de metais no efluente líquido esteja abaixo dos limites para caracterizá-lo como Resíduo Classe I (Tabela 1), este deve ser enviado a uma estação de tratamento de efluentes físico-química, sendo esta projetada para realizar a decantação dos metais, formando um lodo, que após caracterizado, poderá ser enviado a aterros Classe IIA.

#### 4.5 CUSTO ENERGÉTICO

As Tabelas 8 e 9, apresentam os resultados obtidos com a soma dos resultados das equações (2), (4) e (5), bem como as correções de unidade necessárias:

$$Q_{Total} = \Delta q_{madeira} + \left( dH \cdot \frac{\dot{V}_{N_2}}{1000} \cdot \frac{\rho_{N_2}}{M_{N_2}} \right) \cdot t + q_{convecção} \cdot t \quad (15)$$

Tabela 8: Consumo Global de Energia ( $Q_{Total}$ ) por tonelada de resíduo

Tempo Exposição (min)	Tempo Aquecimento (min)	Energia Necessária (kJ)
30	43,33 ± 6,51	579.954,05 ± 1990,83
60	42,33 ± 2,52	580.672,08 ± 788,94
90	49,33 ± 6,03	580.022,32 ± 928,71

Fonte: elaborado pelo autor (2018).

A energia necessária para realização dos experimentos, resultou em valores muito próximos entre si, uma vez que a principal etapa energética do processo é o aquecimento até a eliminação da umidade da amostra.

A manutenção da temperatura durante o experimento requer o controle de injeção de combustível apenas para reposição das perdas por troca térmica com o ambiente externo.

Tabela 9: Consumo de GLP e Gás Natural por tonelada de resíduo.

Tempo de Exposição (min)	Quantidade	
	GLP (kg)	Gás Natural (kg)
30	12,37 ± 0,04	12,36 ± 0,04
60	12,39 ± 0,02	12,38 ± 0,02
90	12,37 ± 0,02	12,36 ± 0,02

Fonte: elaborado pelo autor (2018).

As quantidades de combustível indicadas na Tabela 10, mostram que, independentemente do combustível a ser escolhido, o rendimento será basicamente o mesmo, uma vez que o GLP e o gás natural possuem poder calorífico inferior muito próximos.

#### 4.6 COMPARATIVO ENTRE AS DESTINAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos pelo método de Charterização, realizou-se um comparativo entre os custos com a operação de um processo de Charterização e os preços das técnicas mais aplicadas para destinação final destes resíduos na Região Sul de Santa Catarina, apresentado na Tabela 10.

Os sinais positivos indicam a diferença percentual entre a Charterização e as técnicas convencionais, mostrando assim que o processo é viável técnica, ambiental e economicamente.

Tabela 10: Comparativo de custos para destinação dos resíduos de madeira.

Tipo Destinação	Relação dos Custos
Aterro Classe IIA	+ 41,67 %
Coprocessamento	+ 466,67 %
Incineração	+ 750,00 %

Fonte: elaborado pelo autor (2018).



## 5 CONCLUSÃO

A realização desta dissertação possibilitou o maior conhecimento de um dos mais importantes setores da economia, uma vez que a madeira tratada é utilizada na confecção de móveis, postes, bens de consumo e até casas, itens estes necessários aos mais variados níveis da sociedade brasileira.

A presente dissertação mostrou, ainda, o panorama nacional relativo ao tratamento da madeira e, principalmente, relativo à destinação dos resíduos gerados nos mais variados processos que utilizam a madeira com preservativos.

Os itens a seguir respondem ao proposto nos objetivos específicos desta dissertação.

### 5.1 Avaliação técnica do processo de Charterização

Após a realização das bateladas necessárias para a geração das amostras, comprovou-se que o processo é tecnicamente viável, principalmente em escala laboratorial, pois tanto a operação quanto o controle das condições propostas por este estudo são de fácil execução.

### 5.2 Avaliar as emissões atmosféricas

Amostras dos efluentes líquidos gerados nas bateladas foram analisadas para verificação da concentração de cobre, cromo e arsênio, mostrando que o arraste destes gases acontece, porém em níveis ínfimos quando comparados com a concentração inicial na madeira tratada.

### 5.3 Avaliar a qualidade do carbono resultante do processo

As análises dos produtos gerados em cada batelada mostraram que o processo de Charterização promoveu um aumento significativo na concentração de carbono fixo em relação à concentração inicial na madeira tratada, porém não fora atingida a concentração indicada na literatura consultada.

Alguns motivos podem ser citados para explicar este comportamento, como: granulometria das amostras, tempo de reação e a disposição física do reator.

#### 5.4 Avaliação química dos resíduos oriundos do processo

O processo não gerou resíduos, uma vez que as amostras não foram submetidas à separação por moagem e centrifugação, ou seja, o produto foi enviado bruto para realização das análises laboratoriais pertinentes.

#### 5.5 Comparação técnica e econômica

Atualmente, a destinação final mais utilizada e recomendada para os resíduos de madeira tratada com CCA são os aterros industriais Classes I ou II, os quais apenas postergam um problema para as futuras gerações.

Mesmo com os resultados das análises apresentando percentuais abaixo do esperado quando comparados à literatura consultada, conclui-se que tecnicamente o processo de *Chartherm* é viável, porém, devido à grande difusão dos aterros como destinação mais “prática”, a inserção de novas técnicas de destinação final para estes resíduos ainda é um obstáculo a ser vencido regionalmente.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora o intuito do trabalho ora apresentado tenha um foco técnico-econômico, outras variantes do processo podem ser estudadas para a melhoria e otimização do processo de Charterização, a citar:

- a) influência da granulometria no tempo de reação;
- b) influência da posição do reator em relação ao fluxo de nitrogênio em seu interior;
- c) retroalimentação do efluente gasoso gerado pela reação como combustível para aquecimento do sistema;
- d) aplicação da Charterização em outras espécies de madeira e/ou seus subprodutos;
- e) caracterização morfológica do carvão.



## REFERÊNCIAS

AZEVEDO, C. H. S. et al. Influência da temperatura final de carbonização e da taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico e teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 1279-1287, jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14610:2015**: Indicador de temperatura com sensor – Calibração por comparação. Rio de Janeiro: Abnt, 2015. 07 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**: Resíduos Sólidos - Classificação. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 71 p.

ATKINS, P. W.. **Físico-Química**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 252 p.

BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010. **Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010**. Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 20 out. 2015.

**CAMPO DIGITAL**. Campo Mourão: Faculdade Integrado de Campo Mourão, v. 08, n. 01, ago. 2013. Semestral. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjytqLEhpHcAhXNnJAKHdcIDbEQFggpMAA&url=http%3A%2F%2Frevista.grupointegrado.br%2Frevista%2Findex.php%2Fcampodigital%2Farticle%2Fdownload%2F1117%2F507&usg=AOvVaw2XQ-4s\\_aTYkN3ye7IUCThp](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjytqLEhpHcAhXNnJAKHdcIDbEQFggpMAA&url=http%3A%2F%2Frevista.grupointegrado.br%2Frevista%2Findex.php%2Fcampodigital%2Farticle%2Fdownload%2F1117%2F507&usg=AOvVaw2XQ-4s_aTYkN3ye7IUCThp)>. Acesso em: 16 out. 2015.

**CAVALCANTE, M. S.** Histórico da preservação de madeiras. In: LEPAGE, E. S. Manual de Preservação de Madeiras. São Paulo: IPT, 1986. Pág.: 9-39.

**CIÊNCIA FLORESTAL**. Santa Maria: Departamento de Ciências Florestais/centro de Ciências Rurais/universidade Federal de Santa Maria, v. 25, n. 01, jan. 2015. Trimestral. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/issue/view/788/showToc>>. Acesso em: 16 out. 2015.

COMPANHIA DE GÁS DO ESTADO DO CEARÁ (Brasil). **O GÁS NATURAL**. 2017. Disponível em: <[http://www.cegas.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=70&Itemid=158](http://www.cegas.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=158)>. Acesso em: 07 mai. 2018.

CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. BRASÍLIA, DF: Conselho Nacional do Meio Ambiente, 16 maio 2011.

FERRARINI, Suzana Frighetto. **ESTABELECIMENTO DE METODOLOGIA PARA REMOÇÃO DE COBRE, CROMO E ARSÊNIO DE RESÍDUOS DE MADEIRA TRATADA COM ARSENIATO DE COBRE CROMATADO - CCA**. 2012. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Tecnologia de Materiais, Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/3307>>. Acesso em: 12 out. 2015.

FERRARINI, Suzana Frighetto et al. Classificação de resíduos de madeira tratada com preservativos à base de arseniato de cobre cromatado e de boro/flúor. **Química Nova**, [s.l.], v. 35, n. 9, p.1767-1771, 2012. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s0100-40422012000900012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422012000900012&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422012000900012&script=sci_arttext)>. Acesso em: 01 nov. 2015.

GERALDO, Flávio C.. Destinação de Resíduos de Madeira Tratada. In: **SIMPÓSIO MADEIRA & CONSTRUÇÃO**, 3., 2015, São Paulo. **Simpósio**. São Paulo: Abpm - Associação Brasileira de Preservadores de Madeira, 2015. p. 1 - 21. Disponível em: <<http://www.abpm.com.br/static/site/pdf/apresentacoes/3Simposio-Madeira-e-Construcao.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2015.

HELSEN, Lieve et al. Low-temperature pyrolysis of CCA-treated wood: thermogravimetric analysis. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**. Heverlee, p. 65-86. 08 jan. 1999. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00034-0)>. Acesso em: 08 jan. 2018.

HELSEN, Lieve; BOSMANS, Anouk. Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENHANCED LANDFILL MINING, 1., 2010, Houthalen-helchteren. **Symposium**. Houthalen-helchteren: International Symposium On Enhanced Landfill Mining, 2010. p. 1 - 41. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/228920819\\_Waste-to-Energy\\_through\\_thermochemical\\_processes\\_matching\\_waste\\_with\\_process](http://www.researchgate.net/publication/228920819_Waste-to-Energy_through_thermochemical_processes_matching_waste_with_process)>. Acesso em: 16 out. 2015.

HELSEN, Lieve. The *Chartherm* process, what's in the name? **Waste Management**. Belgium, p. 1649-1657. maio 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08003632?via=ihub>>. Acesso em: 12 out. 2015.

HELSEN, Lieve; HACALA, Amélie. Formation of metal agglomerates during carbonisation of chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste: Comparison between a lab scale and an industrial plant. **Journal Of Hazardous Materials**. Leuven (heverlee), p. 1438-1452. abr. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406003980>>. Acesso em: 02 fev. 2017.

JEAN-SEBASTIAN HERY (França). "*Chartherm*" R&d Department. **A COMPLETE INDUSTRIAL PROCESS TO RECYCLE CCA-TREATED WOOD**. Bordeaux: Thermya, 2004. 08 p. Disponível em: <<http://www.ccaresearch.org/ccaconference/pre/pdf/HERY.PDF>>. Acesso em: 14 set. 2015.

MONTANA QUÍMICA S.A. (São Paulo) (Ed.). **Madeira Tratada com Osmose® K33 C - Óxido**: Informativo Técnico - Divisão Osmose. São Paulo: Montana Química S.a., 2008. 3 p. Disponível em: <<http://www.montana.com.br/Perguntas-Freq/Madeira-Tratada/CCA-Osmose-K33-C>>. Acesso em: 12 out. 2015.

MONTANA QUÍMICA S.A. (São Paulo) (Ed.). **CCA – Seguro, Confiável e Comprovado**: Informativo Técnico - Divisão Osmose. São Paulo: Montana Química S.a., 2008. 3 p. Disponível em: <[http://www.montana.com.br/download/1185/file/InfTec\\_CCA-Seguro-Confiavel-Comprovado.pdf](http://www.montana.com.br/download/1185/file/InfTec_CCA-Seguro-Confiavel-Comprovado.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2015.

MONTANA QUÍMICA S.A. (São Paulo) (Ed.). **Destinação Final de Madeira Tratada com CCA: Informativo Técnico - Divisão Osmose.** São Paulo: Montana Química S.a., 2010. 5 p. Disponível em: <<http://www.montana.com.br/Comunicacao/Publicacoes/Informativo-Tecnico>>. Acesso em: 15 out. 2015.

MORRELL, Jeffrey J. **Wood Pole Maintenance Manual: 2012 edition.** 2012. ed. Corvallis: Forestry Communications Group, 2012. 56 p.

**REVISTA DA MADEIRA: REMADE.** Caxias do Sul, RS: Porthus Comunicação Ltda, n. 68, dez. 2002. Bimestral. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=261&subject=Preserva%E7%E3o&title=Preserva%E7%E3o](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=261&subject=Preserva%E7%E3o&title=Preserva%E7%E3o)>. Acesso em: 15 out. 2015.

**REVISTA DA MADEIRA: REMADE.** Caxias do Sul, RS: Porthus Comunicação Ltda, n. 77, nov. 2003. Bimestral. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=467&subject=Res%EDduos&title=Gest%E3o%20de%20res%EDduos%20s%F3lidos%20na%20ind%FAstria%20madeireira](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=467&subject=Res%EDduos&title=Gest%E3o%20de%20res%EDduos%20s%F3lidos%20na%20ind%FAstria%20madeireira)>. Acesso em: 16 out. 2015.

**REVISTA DA MADEIRA: REMADE.** Caxias do Sul: Porthus Comunicação Ltda, n. 86, dez. 2004. Bimestral. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=677&subject=>](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=677&subject=>)>. Acesso em: 08 out. 2018.

**REVISTA DA MADEIRA: REMADE.** Caxias do Sul, RS: Porthus Comunicação Ltda, n. 103, mar. 2007. Bimestral. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1061&subject=Preservantes&title=Madeira preservada e seus conceitos](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1061&subject=Preservantes&title=Madeira preservada e seus conceitos)>. Acesso em: 15 out. 2015.

**REVISTA DA MADEIRA: REMADE.** Caxias do Sul: Porthus Comunicação Ltda, n. 128, ago. 2011. Bimestral. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1545&subject=Pinus&title=Pinus%20uma%20madeira%20de%20alto%20potencial](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1545&subject=Pinus&title=Pinus%20uma%20madeira%20de%20alto%20potencial)>. Acesso em: 08 out. 2018.



SANTOS, R. C. et al. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, jun. 2016.

WELTY, James R.; RORRER, Gregory L.; FOSTER, David G.. **FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE MOMENTO, CALOR E DE MASSA**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 703 p. Tradução e Revisão Técnica: VERÔNICA CALADO.