

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec

Daniela Luize Perez de Oliveira

**Influência do tratamento térmico na força de corte da madeira de *Pinus
elliottii***

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica

Rio Grande
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec

Daniela Luize Perez de Oliveira

**Influência do tratamento térmico na força de corte da madeira de *Pinus
elliottii***

Orientador: Prof. Dr. Cleiton Rodrigues Teixeira
Coorientador: Prof. Dr. Darci Alberto Gatto

Rio Grande
2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **06/2016** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos três dias do mês de março de dois mil e dezesseis, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, às oito horas no CIDECSUL Sala Lagoas – FURG, a que se submeteu o mestrando **Daniela Luize Perez de Oliveira**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Simulação e Controle de Processos de Fabricação do PPMec, com o seguinte título: **Influência do tratamento térmico na força de corte da madeira de *Pinus elliottii***, referendada pela Câmara Assessora do Curso, o Prof. Dr.-ing Walter Lindolfo Weingaertner, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann e Prof. Dr. Rafael Beltrame, sob a presidência do Professor Cleiton Rodrigues Teixeira. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Cleiton Rodrigues Teixeira: APROVADO
2. Walter Lindolfo Weingaertner: APROVADO
3. Rodrigo Panosso Zeilmann: APROVADO
4. Rafael Beltrame: Aprovado

Foi concedido um prazo de 60 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. [Assinatura]
CPF: 343 657 960 20
 2. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER [Assinatura]
CPF: 246 457 029 04
 3. RODRIGO P. ZEILMANN [Assinatura]
CPF: 695997770-34
 4. Rafael Beltrame [Assinatura]
CPF: 003.553.630-62
- Daniela Luize Perez de Oliveira: [Assinatura]

*Este trabalho é dedicado
aos meus pais, Celso e Zeli
e ao meu irmão, Marcio,
pelo carinho, compreensão e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos e amados Pais, Celso e Zeli pelo amor e apoio incondicional;

Ao meu irmão, Marcio, pela torcida;

Aos meus orientador e coorientador, Prof. Dr. Cleiton Rodrigues Teixeira e Prof. Dr. Darci Alberto Gatto pela oportunidade, inspiração e conhecimentos transmitidos;

Aos colegas do PPGCEM da UFPel, Ezequiel, Paula e Sabrina, pelo auxílio em alguns testes e por todas as valiosas ideias trocadas e discutidas;

Aos colegas do PPMec da FURG, Adilar, Edilson, Geordano, Tárrique e Thaís, pelo convívio, troca de experiências, muitos cafés e amizade;

Às minhas queridas amigas, que compreenderam minhas ausências e estiveram na torcida, em especial Luísa e Lívia, que me auxiliaram nas questões do mestrado ao longo desses dois anos;

Aos técnicos, Bruno e Cristiano, do laboratório do PPMec, e Bruno, do laboratório de Edificações da FURG, pelo auxílio com máquinas e equipamentos;

Ao Prof. Me. Carlos Casanova, pela paciência e auxílio com máquinas e equipamentos;

Aos operadores do MEV, no Ceme-Sul, Rudmar e Érica, pela colaboração na realização das análises;

Aos Srs. Nelson e Luiz da marcenaria da FURG, que viabilizaram a confecção dos corpos de prova;

Às empresas Ambar Florestal por ceder as toras de madeira e a Serraria Bojuru por promover o desdobro das toras.

A FAPERGS pelo apoio financeiro.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina”.

Cora Coralina

RESUMO

Nas últimas décadas o reflorestamento comercial de *Pinus elliottii*, tem crescido no extremo sul do Brasil. O *Pinus* possui uma rápida taxa de crescimento, porém sua estabilidade dimensional e durabilidade contra ataques biológicos são baixas, necessitando assim, de uma melhora nas propriedades para aceitação comercial. A rápida taxa de crescimento do *Pinus* faz com que haja consideráveis diferenças físicas e anatômicas entre a madeira localizada próxima à medula (lenho juvenil) e a madeira localizada próxima à casca (lenho adulto). Dentre vários tratamentos utilizados para a melhoria das propriedades da madeira, o tratamento térmico se destaca. Ele consiste em aquecer a madeira até uma temperatura abaixo da temperatura de carbonização (abaixo de 280°C). A transformação das toras em produto final envolve diversas operações de usinagem, isto é, operações com ferramentas de corte que visam conferir formas, dimensões e acabamentos ao produto, onde é desenvolvida a força de corte. Como o processo de termorreificação tem se mostrado como uma tendência, é interessante ter o conhecimento da força de corte em madeiras termorreificadas. Para tanto, foram realizadas análises em corpos de prova de madeira de *Pinus elliottii* tratados as temperaturas de 160°C, 180°C, 200°C e 220°C, por quatro horas, além da testemunha (corpo de prova não tratado, servindo como controle) tanto para lenho adulto quanto para lenho juvenil. Os corpos de prova tiveram suas massas, suas dimensões e rugosidade verificados antes e após o tratamento. Também foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por infravermelho. Foram realizados os testes de dureza Janka e testes de usinagem, em uma plaina limadora no intuito de se conhecer a força de corte desenvolvida durante o processo de usinagem de madeira à diferentes tratamentos, para tanto, os parâmetros de usinagem: velocidade de corte, avanço e profundidade, foram mantidos constantes em todos os experimentos. As forças no processo de corte foram determinadas por um sistema dedicado composto por uma célula de carga piezelétrica, um amplificador de sinais e um microcomputador com sistema de aquisição. As análises se concentraram na face longitudinal tangencial da madeira (90°-0°) que é a desenvolvida em processos de aplainamento. Ao final de todas as análises, verificou-se que houve perda de massa para todos os corpos de prova, o comportamento da massa específica aparente e da dureza Janka não seguiram essa tendência. Verificou-se um escurecimento dos corpos de prova. A força de corte apresentou uma elevação em seu valor para peças tratadas termicamente, sendo essas menores no lenho juvenil do que no lenho adulto.

Palavras chave: Tratamento térmico em madeira, Usinagem de madeira, *Pinus elliottii*.

ABSTRACT

At last few decades, the commercial reforestation of *Pinus elliottii* has grown in South Brazil. *Pinus* has a quickly growth but its dimensional stability and durability against biological demand are low, requiring improvements in its properties for commercial acceptance. The quickly growth means that there are considerable physical and anatomical differences between wood next to the pith (juvenile wood) and wood next to the bark (mature wood). Among other treatments used to improve wood properties, the thermal one points. The thermal treatment consists in heat the wood below its carbonization (below 280°C). Processing the wood on a final product involves some machining operations (operations with cutting tools, aiming shape, dimension and finishing to the product), where cutting force is developed. As thermal treatment has proven to be a trend, it is interesting to have the knowledge of cutting force at thermal treated wood. For these, were analyzed *Pinus elliotti* wood specimens heat treated at follow temperatures: 160°C, 180°C, 200°C and 220°C, for four hours, besides the control one, for both mature and juvenile wood. The specimens had their masses, their dimensions and roughness checked before and after thermal treatment. Scanning electron microscopy and Fourier transform infra red spectroscopy were also analyzed. Tests like Janka hardness and machining were performed. For the machining one, a shaping machine was used in order to meet the cutting force developed in wood with different heat treatments, the results were obtained through systematic tests of machining with orthogonal cutting. The machining parameters: cutting speed, feed and depth, were kept constant in all experiments. The morphological structure of the measurement system used, basically consists of a transducer, a signal amplifier, and a computer acquisition module A/D for recording data. The transducer employed is a piezoelectric one, for system management, a commercial program dedicated to this purpose was used. Analysis were made at tangential surface (90°-0° direction), which is developed in shaping processes. At the end of all analyzes, it was found that there was mass loss for all specimens, the behavior of bulk density and Janka hardness did not follow this trend. It was observed a darkening at specimens. The cutting force showed an increase in value for heat treated specimens, being these ones smaller for juvenile wood than to mature wood.

Keywords: Wood thermal treatment, Wood machining, *Pinus elliottii*.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS.....	9
2.1. Gerais.....	9
2.2. Específicos	9
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	10
3.1. Ciência da madeira.....	10
3.1.1. Classificação sistemática (taxonomia) do vegetal	10
3.1.1.1. Gimnospermas	11
3.1.1.2. Coniferales (Coníferas)	12
3.1.1.3. Pinaceae	12
3.1.1.4. Gênero Pinus	12
3.1.1.5. Espécie Pinus elliottii Engelm.	13
3.1.2. Estrutura macroscópica do tronco	13
3.1.2.1. Casca.....	14
3.1.2.2. Cambio.....	14
3.1.2.3. Anéis de crescimento	15
3.1.2.4. Cerne	15
3.1.2.5. Alburno.....	16
3.1.2.6. Raios.....	16
3.1.2.7. Medula	16
3.1.2.8. Lenho juvenil e adulto	16
3.1.3. Planos anatômicos	18

3.1.4. Estrutura anatômica	18
3.1.4.1. Estrutura da parede celular	19
3.1.4.2. Estrutura da parede de gimnospermas	20
3.1.5. Composição química	21
3.1.6. Propriedades tecnológicas	22
3.1.6.1. Secagem	22
3.1.6.2. Massa específica	23
3.1.6.3. Dureza.....	24
3.2. Modificação térmica da madeira.....	24
3.2.1. Variáveis do processo	25
3.2.2. Modificações químicas	26
3.2.2.1. Hemiceluloses.....	26
3.2.2.2. Celulose	26
3.2.2.3. Lignina.....	26
3.2.2.4. Extrativos	27
3.2.3. Modificações físicas	27
3.2.3.1. Cor	27
3.2.3.2. Perda de massa e mudanças dimensionais.....	27
3.2.3.3. Cristalinidade	27
3.2.3.4. Propriedades mecânicas.....	28
3.2.3.5. Estabilidade dimensional.....	28
3.2.3.6. Higroscopicidade.....	28
3.3. Usinagem	29
3.3.1. Processo de aplainamento	30
3.3.2. Conceitos básicos na usinagem	32
3.3.2.1. Movimentos na usinagem	32
3.3.2.2. Grandezas de corte.....	33

3.3.2.3.	Velocidades na Usinagem.....	33
3.3.3.	Usinagem de madeira	34
3.3.3.1.	A peça.....	34
3.3.3.2.	Tipos de corte ortogonal.....	35
3.3.3.3.	A ferramenta de corte.....	35
3.3.3.4.	O corte 90°-0°	37
3.3.3.5.	Tipos de cavaco	39
3.3.4.	Forças na usinagem	41
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1.	Matéria prima para confecção dos corpos de prova.....	45
4.2.	Verificação de massa e dimensional	49
4.3.	Verificação da rugosidade	50
4.4.	Tratamento térmico dos corpos de prova	52
4.5.	Determinação da perda de massa pós tratamento térmico	53
4.6.	Verificação da dureza Janka	54
4.7.	Análise de espectroscopia por infravermelho (FTIR).....	55
4.8.	Ensaio de usinagem	56
4.9.	Análise da estrutura externa por microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	59
4.10.	Análise estatística.....	61
4.11.	Fluxograma das principais atividades do trabalho.....	61
5.	RESULTADOS E ANÁLISE	63
5.1.	Alteração na coloração.....	63
5.2.	Alteração (perda) de massa	64
5.3.	Verificação da massa específica aparente	66
5.4.	Verificação da rugosidade	69
5.5.	Verificação da Dureza Janka.....	69

5.6.	Força de corte	71
5.7.	Análise de espectrometria por infravermelho (FTIR)	78
5.8.	Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)	79
6.	CONCLUSÕES.....	83
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
	APÊNDICES	91
	ANEXOS	91

1. INTRODUÇÃO

Sendo a madeira um material de admiráveis propriedades, a mesma é utilizada há milhares de anos, fazendo com que o seu consumo eleve-se cada vez mais, o que induz a uma necessidade de florestas de rápido crescimento, como no caso do Pinus, árvore originária dos Estados Unidos e cujo cultivo adaptou-se bem no Sul do Brasil, possui boa trabalhabilidade e é de fácil secagem, porém é susceptível ao ataque de fungos. De um modo geral, as madeiras de árvores reflorestadas exibem estabilidade dimensional e durabilidade inferiores às árvores de florestas naturais (Hill, 2006). Além disto, apresentam diferenças físicas e anatômicas entre os lenhos juvenil e adulto, merecendo uma maior atenção a este detalhe.

Visando melhorias, para esta madeira, tratamentos impermeabilizantes e preservativos são utilizados, no entanto, alguns deles têm impactos negativos no meio ambiente. Fato que desencadeou na procura de novos tratamentos, que não apresentem riscos a natureza, e neste sentido a modificação térmica se mostrou como uma solução interessante. O tratamento térmico ou termorretificação da madeira é uma técnica que, possui inúmeras variáveis de processo, e consiste, basicamente, em aquecer a madeira até uma temperatura abaixo a de sua carbonização. (Hill, 2006 e Silva, 2012). Com o resultado da aplicação de calor, ocorrem modificações químicas e físicas, sendo as propriedades da madeira termorretificada altamente dependentes da variação do tratamento aplicado. (Hill, 2006). Uma vez tratada termicamente, a madeira pode ser usada para: cercas, terraços, portas, janelas, pisos, revestimentos, móveis externos e internos, confecção de paredes à prova de som, decks de barcos, parques infantis, instrumentos musicais, dentre outros. (Araújo, 2010 e Cademartori, 2012).

A obtenção de um produto final, para consumo, como alguns dos citados acima, envolve o processamento da madeira, da forma e da dimensão até o acabamento, ocorrendo diversas operações de usinagem, onde desenvolve-se a força de corte, cujo conhecimento é de fundamental importância para o cálculo da estrutura e dos mecanismos de acionamento das máquinas operatrizes, para a determinação da potência de usinagem e consequentemente a determinação do rendimento da máquina para diferentes cargas e velocidades de trabalho.

(FERRARESI, 1995). Logo, se torna interessante o conhecimento da força de corte desenvolvida durante o processamento da madeira termicamente tratada.

Essa dissertação divide-se em seis capítulos. No capítulo 1 é realizada uma breve apresentação do trabalho, contendo o problema, a relevância e a justificativa. No capítulo 2 é apresentado o que já se tem estudado até o presente momento sobre o tema abordado, é nele que ocorre uma preparação para a compreensão da metodologia adotada. No capítulo 3 são abordados os materiais métodos utilizados para o alcance dos objetivos propostos bem como o método estatístico. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela aplicação da metodologia. As conclusões são apresentadas no capítulo de número 5 e as sugestões para próximos trabalhos encontram-se no capítulo 6.

2. OBJETIVOS

2.1. Gerais

Conhecer a influência do tratamento térmico na força de corte durante o processo de usinagem de aplainamento, da madeira de *Pinus elliottii*.

2.2. Específicos

- Avaliar o efeito das diferentes temperaturas (testemunha, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C) de tratamento térmico no processo de usinagem;
- Entender o comportamento dos lenhos, juvenil e adulto, perante o processo de tratamento térmico, verificando-se a perda de massa, massa específica aparente, dureza Janka, rugosidade, composição química (FTIR) e mudança na estrutura da parede celular (MEV).

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Ciência da madeira

A madeira é uma estrutura biológica complexa, um composto de muitos tipos de células e substâncias químicas que agem em conjunto para servir as necessidades de uma planta viva. Na tentativa de compreender a madeira no quesito tecnológico, tem-se, muitas vezes, negligenciado o fato fundamental e básico de que a árvore evoluiu ao longo de milhões de anos para servir as funções principais (de condução de água das raízes para as folhas, sustentação mecânica do corpo da planta e armazenamento de matéria bioquímica). Não há nenhuma propriedade (física, mecânica, química ou biológica) da madeira que não derive do fato de que a mesma é formada para satisfazer as necessidades da árvore viva. Para satisfazer essas necessidades, a madeira tem células desenvolvidas e interconectadas de modo a desempenhar essas funções. (Wood Handbook, 2010).

3.1.1. Classificação sistemática (taxonomia) do vegetal

A madeira provem de árvores. Esse é o fato mais importante a ser lembrado na compreensão da natureza da madeira, que evoluiu como um tecido funcional das plantas, e não como um material concebido para satisfazer as necessidades dos que com ela trabalham. Assim, conhecer a madeira, entendendo o seu desenvolvimento na natureza, é um quesito fundamental para se trabalhar com sucesso. (Hoadley, 2000).

De acordo com Burger e Richter (1991) e Hoadley (2000), o reino vegetal é composto de várias classificações principais. As de interesse por produzirem xilema secundário (lenho) pertencem as divisões (filo) das Gimnospermas e das Angiospermas. Estes Filos estão subdivididos em ordens, famílias, gêneros e espécies. Ainda segundo Hoadley (2000), as Gimnospermas, (plantas de sementes nuas), incluem todas as árvores produtoras de “madeira macia”, já as Angiospermas (plantas de sementes cobertas) incluem todas as árvores de “madeira dura”.

Existem grandes diferenças botânicas e de estrutura anatômica entre Gimnospermas e Angiospermas. Abaixo, serão abordados apenas os aspectos da Gimnospermas, visto que esse trabalho foi desenvolvido com *Pinus elliottii*.

Segundo Joly (1983) e Judd et al. (2009), na classificação sistemática, o *Pinus elliottii* se encontra conforme a Figura 1.

Figura 1 - Classificação sistemática do *Pinus elliottii*.

Vida	
Domínio	• Eucarya
Reino	• Vegetal
Divisão (Filo)	• Gymnospermae
Classe	• Coniferopsida
Ordem	• Coniferae
Família	• Pinaceae
Gênero	• Pinus
Espécie	• elliottii

3.1.1.1. Gimnospermas

De acordo com Judd et al.. (2009), as gimnospermas representam cerca de 15 famílias, 80 gêneros e cerca de 820 espécies e crescem na maior parte do planeta, desde os 72° Norte até os 55° Sul.

Marchiori (1996), afirma que no grupo das plantas produtoras de madeira, as gimnospermas cumprem um papel insubstituível, onde constituem o grupo produtor das chamadas “madeiras macias” ou madeiras de “fibras longas”, onde o termo “madeira macia” (uma tradução literal de “softwood”, de larga utilização nos países de língua inglesa) não mostra uma estreita vinculação com a dureza da madeira, visto que com respeito a esta propriedade mecânica, existe um vasto número de

angiospermas que possuem madeiras menos resistentes do que a mais “macia” das gimnospermas. O termo “madeira de fibra longa” explica-se pela predominância no lenho das gimnospermas de um único tipo celular: o traqueoide longitudinal, já as fibras verdadeiras caracterizam o xilema secundário das angiospermas dicotiledôneas.

3.1.1.2. Coniferales (Coníferas)

Sob o ponto de vista econômico e ecológico, Judd et al.. (2009) mencionam que as coníferas constituem o maior e mais importante agrupamento de gimnospermas, compreendendo sete famílias, 65 gêneros e mais de 600 espécies.

3.1.1.3. Pinaceae

A família Pinaceae é a maior e mais importante (em termos ecológicos e econômicos) da ordem das coníferas. É provavelmente a principal fonte de madeira no mundo. São, em geral, árvores de grande porte, com frequência apresentando casca e/ou folhas aromáticas, presença de canais resiníferos no lenho e nas folhas. Apesar de nenhuma pinácea ocorrer naturalmente no Brasil, muitas espécies são cultivadas com finalidades ornamentais e vários pinheiros (*Pinus* sp.) adquiriram grande importância para a silvicultura nacional. Compreende nove gêneros e cerca de 200 espécies. (Marchiori, 1996 e Judd et al., 2009).

3.1.1.4. Gênero *Pinus*

Segundo Marchiori (1996), o *Pinus* é de grande importância florestal, tanto devido à qualidade da madeira produzida, valorizada tanto para fins construtivos e mobiliários, quanto para a produção de celulose e resina. É de fácil cultivo e largamente utilizados em reflorestamentos, inclusive no Brasil. Sua madeira caracteriza-se pela presença de canais resiníferos longitudinais e radiais, rodeados por células epiteliais de paredes muito finas. Reúne cerca de 90 espécies.

3.1.1.5. Espécie *Pinus elliottii* Engelm.

Originário do Sudeste dos Estados Unidos, onde é conhecido como “slash pine” ou “american pitch pine”, este pinheiro cresce em terras de baixa altitude (até 150m), nos estados de Mississippi, Alabama, Georgia, Carolina do Sul e Flórida. Em razão do excelente crescimento em zonas de clima subtropical úmido, é largamente cultivado no Sul do Brasil. As árvores alcançam de 25 a 30m de altura com D.A.P. (diâmetro a altura do peito, corresponde a 1 metro e 30 centímetros) de 60 a 90 cm. A casca, acinzentada e sulcada em indivíduos jovens, modifica-se com o passar do tempo, apresentando placas espessas (entre dois e quatro centímetros) e marrom avermelhadas em exemplares adultos. (Marchiori, 1996).

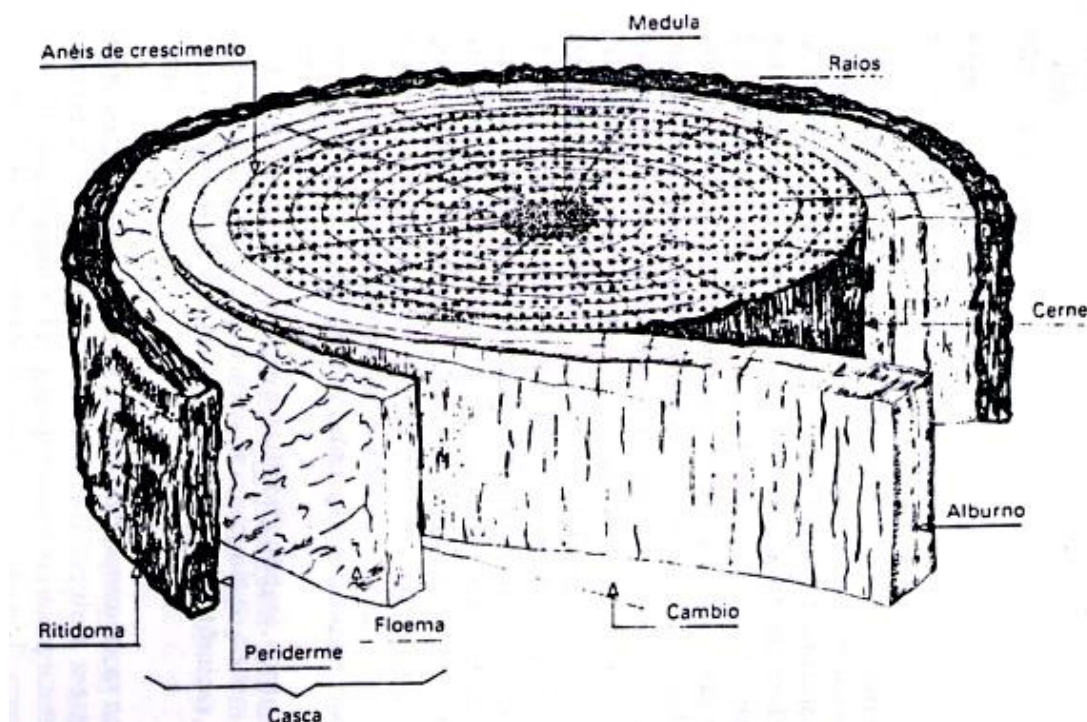
No Anexo 1 se encontram mais informações sobre a madeira de *Pinus elliottii*.

3.1.2. Estrutura macroscópica do tronco

Burger e Richter (1991), afirmam que a madeira é um conjunto heterogêneo de diferentes tipos de células com propriedades específicas para desempenharem funções vitais, tais como: condução de líquidos; transformação, armazenamento e transporte de substâncias nutritivas; e sustentação do vegetal.

Em uma seção transversal de um tronco típico, com exceção do câmbio e em muitos casos dos raios, as seguintes partes, da Figura 2, se destacam macroscopicamente:

Figura 2 - Seção típica de um tronco.



Fonte: Burger e Richter, 1991.

3.1.2.1. Casca

A casca é de grande importância na identificação de árvores vivas, sendo responsável pelo armazenamento e condução de nutrientes exercidos pelo floema (células adaptadas para conduzir materiais sintetizados pela planta). Protege o vegetal contra o ressecamento, ataques fúngicos, injúrias mecânicas e variações climáticas. (Burger e Richter, 1991 e Cutler et al., 2011).

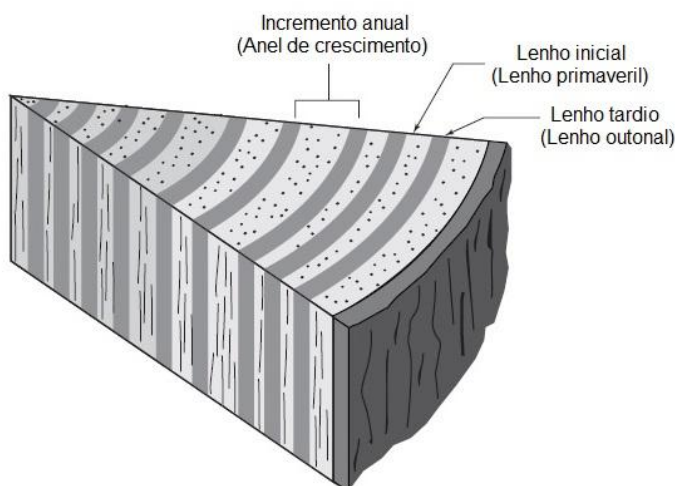
3.1.2.2. Cambio

Segundo Burger e Richter (1991), o câmbio é um tecido meristemático (apto a gerar elementos celulares). Permanece ativo durante toda a vida do vegetal e é responsável pela formação dos tecidos secundários que constituem o xilema e a casca.

3.1.2.3. Anéis de crescimento

De acordo com Burger e Richter (1991), é através da contagem dos anéis de crescimento que se permite conhecer a idade das árvores. Em um anel de crescimento típico distinguem-se normalmente duas partes: O lenho inicial (lenho primaveril) que possui uma coloração clara e que ocorre no início do período vegetativo, sendo menos denso e o lenho tardio (lenho outonal), que apresenta uma coloração escura, ocorrendo no fim do período vegetativo, sendo mais denso. É essa alternância de cores que evidencia os anéis de crescimento de muitas espécies, em especial das gimnospermas. A Figura 3 evidencia os anéis de crescimento.

Figura 3 - Lenhos inicial e tardio.



Fonte: Wood Handbook 2010 (adaptação).

3.1.2.4. Cerne

Cutler et al. (2011), definem o cerne como sendo a parte interna da madeira de um tronco que perdeu a habilidade de conduzir a água, sendo apresentando geralmente uma coloração mais escura do que o alburno devido aos materiais nele depositados.

3.1.2.5. Alburno

Segundo Cutler et al. (2011), o alburno é parte externa do Xilema secundário de uma árvore ou arbusto contendo células vivas, materiais de reserva e água.

3.1.2.6. Raios

Para Burger e Richter (1991), os raios são faixas horizontais de comprimento indeterminado, sendo formados por células parenquimáticas (elementos que desempenham primordialmente a função de armazenamento de substâncias nutritivas, dispostas radialmente no tronco). Além da função de armazenamento, os raios fazem também o transporte horizontal de nutrientes na árvore.

3.1.2.7. Medula

A medula é a parte que normalmente ocupa o centro do tronco, tendo como função o armazenamento de substâncias nutritivas. Por ser constituída de tecido parenquimático (que possui células vivas e lignificadas), é uma região suscetível a apodrecimentos causados por fungos (toras ocas). (Burger e Richter, 1991 e Cutler et al., (2011).

3.1.2.8. Lenho juvenil e adulto

De acordo com Néri (2003), no passado, quando a maior parte da madeira utilizada industrialmente era proveniente de árvores adultas de florestas naturais, não se dava importância à diferenciação de zonas no tronco, porém, com decaimento do suprimento de árvores adultas com grandes diâmetros, tornou-se comum o aproveitamento da madeira em ciclos curtos, como por exemplo, as espécies de reflorestamento como é o caso do Pinus.

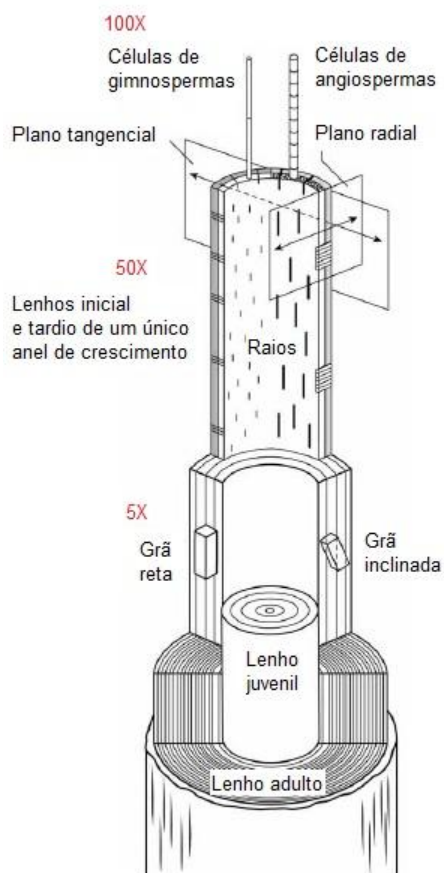
A Madeira juvenil é a madeira produzida na região próxima a medula da árvore; para madeiras de gimnospermas, é geralmente definida como o material do quinto ao vigésimo anel de crescimento (contando da medula em direção à casca),

dependendo da espécie. Madeiras juvenil e adulta possuem consideráveis diferenças nas propriedades físicas e anatômicas. (Wood Handbook, 2010).

Quando considerada a região próxima à medula ou a região próxima à casca, a madeira apresenta características anatômicas distintas. Tais características são mais evidentes nas coníferas do que nas folhosas (angiospermas dicotiledôneas). (Néri, 2003).

A Figura 4 evidencia a posição dos lenhos juvenil e adulto dentro do tronco, além de evidenciar as células que compõem angiospermas e gimnospermas, anéis de crescimento e orientação de grã. Segundo Burger e Richter (1991), a orientação da grã refere-se à disposição geral dos elementos verticais constituintes do lenho em relação ao eixo da árvore.

Figura 4 - Ilustração de um corte de uma árvore em diversas magnificações.



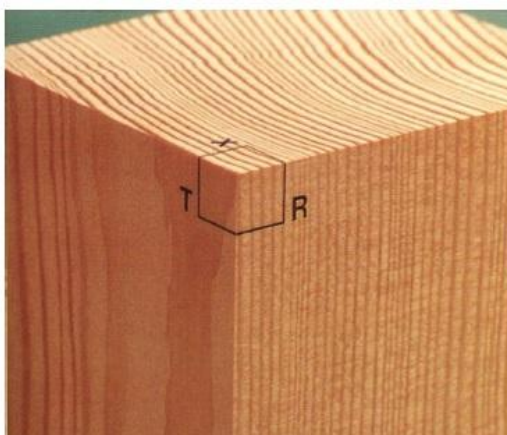
Fonte: Wood Handbook, 2010 (Adaptação).

3.1.3. Planos anatômicos

Além da aparência, também o comportamento físico mecânico da madeira difere em cada um dos três sentidos convencionais de corte: transversal (X), perpendicular ao eixo da árvore; longitudinal radial (R), paralelo aos raios ou perpendicular aos anéis de crescimento; e longitudinal tangencial (T), tangenciando os anéis de crescimento, ou perpendicular aos raios; Fenômeno conhecido como anisotropia. (Burger e Richter, 1991; Hoadley, 2000; e Wood Handbook, 2010). Os planos anatômicos podem ser visualizados na Figura 5.

O Wood Handbook (2010), ainda utiliza o termo “ortotrópico” para designar a variação independente das propriedades mecânicas da madeira ao longo de seus três eixos (perpendiculares entre si).

Figura 5 - Planos convencionais de corte na madeira: longitudinal tangencial (T), longitudinal radial (R) e transversal (X).



Fonte: Hoadley, 2000.

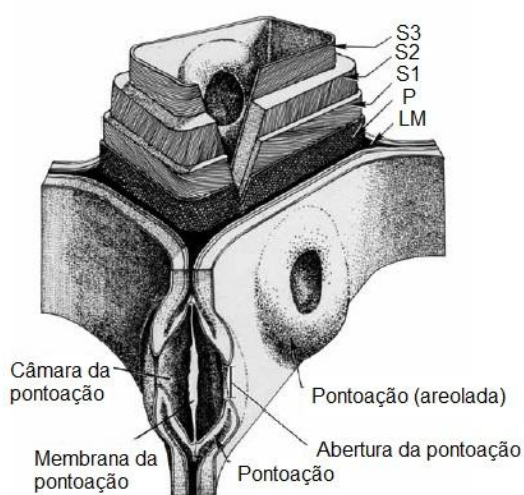
3.1.4. Estrutura anatômica

Anatomia da madeira é, segundo Burger e Richter (1991), o estudo dos diversos tipos de células que constituem o lenho (xilema secundário).

3.1.4.1. Estrutura da parede celular

A parede celular, segundo o Wood Handbook (2010), fornece à madeira a maioria de suas propriedades. Contrariamente ao lúmen (que é um espaço vazio), a própria parede da célula é uma estrutura altamente regular, de um tipo de célula para a outra, entre espécies, e ainda quando se compara gimnospermas e angiospermas. A parede celular consiste em três regiões principais: a lamela média (LM), a parede principal (P) e a parede secundária (S1, S2 e S3), conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Corte esquemático da parede celular, incluindo o detalhe da pontuação areolada.



Fonte: Wood Handbook, 2010 (adaptada).

Os elementos estruturais básicos da parede celular, de acordo com Burger e Richter (1991), são as microfibrilas (de celulose), que estão contidas na matrix (massa básica composta principalmente de pectina e hemicelulose).

O Wood Handbook (2010), explica que cada uma das células individuais deve se aderir uma a outra, de forma a assegurar que as células possam agir como um todo unificado. Isso significa que elas devem ser interligadas para permitir o movimento dos produtos bioquímicos da planta. Esta adesão é fornecida pela lamela média, que é a camada de material da parede celular entre duas ou mais

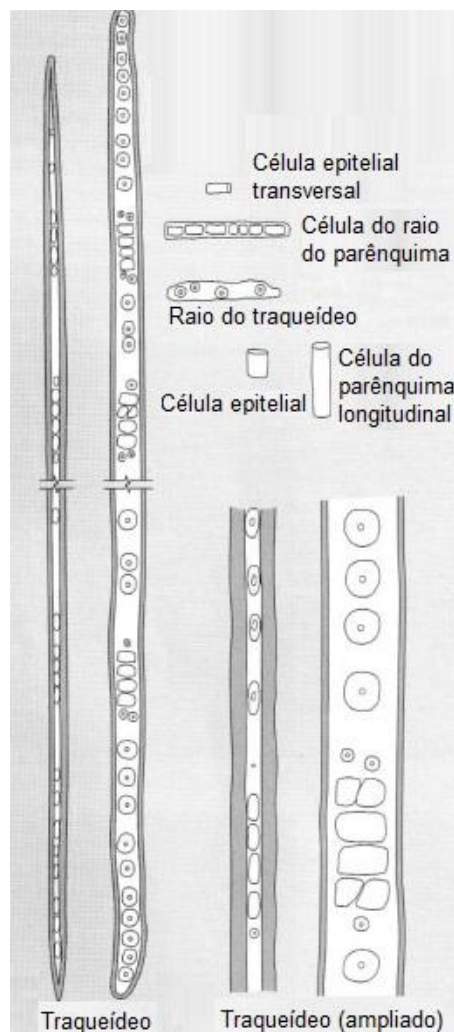
células. Essa camada é a mais externa da parede celular. No caso das plantas que produzem madeira, a lamela média é lignificada. A próxima camada, formada por protoplastos no interior da lamela média, é a parede primária. O domínio da parede celular remanescente, encontrado em praticamente todas as células da madeira é a parede celular secundária, que é composta por três camadas: S1, S2 e S3. Essas estruturas podem ser observadas na Figura 6.

O Wood Handbook (2010) ainda complementa que qualquer discussão sobre parede celular em madeira deve ser acompanhada também da discussão de como as células se modificam para permitir a comunicação e o transporte entre células na planta viva. Estas modificações são conhecidas por pontuações, que são finas áreas nas paredes celulares entre duas células que constituem um aspecto crítico da estrutura de madeira, muito frequentemente negligenciado em tratamentos tecnológicos da mesma. O tipo, a quantidade e o tamanho são característicos de certas espécies, auxiliando na identificação, e podem afetar diretamente como a madeira se comporta em diversas situações, incluindo a de como a madeira interage com revestimentos superficiais. As pontuações possuem três domínios: a membrana, a abertura e a câmara. Essas estruturas podem ser observadas na Figura 6.

3.1.4.2. Estrutura da parede de gimnospermas

Embora pareça complicado à primeira vista, a estrutura das gimnospermas, Figura 7, é relativamente simples quando comparada a das angiospermas. A maioria das células encontradas na madeira de coníferas são traqueídeos, que compreendem 90% a 95% do volume de madeira. Traqueídeos são células fibrosas cerca de 100 vezes compridas do que são em diâmetro. Algumas espécies de coníferas também têm canais de resina, passagens tubulares alinhadas com células do parênquima (epiteliais). (Hoadley, 2000).

Figura 7 - Alguns tipos de células de gimnospermas.



Fonte: Hoadley, 2000 (adaptação).

3.1.5. Composição química

De acordo com APA Engineered Wood Handbook (2002), a madeira possui em sua composição os seguintes elementos químicos: Carbono (49% em peso seco), Hidrogênio (6% em peso seco), Oxigênio (44% em peso seco) e Outros (1% em peso seco). Já as substâncias presentes na madeira são: Celulose (entre 40 e 44%, em peso seco em estufa), Hemicelulose (entre 15 e 35%, em peso seco em estufa) e Lignina (entre 18 e 35%, em peso seco em estufa).

Os compostos mencionados acima, de acordo com Hill (2006) e Hoadley (2000), são caracterizados como segue:

- Celulose: polímeros de cadeias longas, múltiplos de moléculas mais simples chamadas monômeros que estão ligadas de ponta a ponta;
- Hemicelulose: assim como a celulose, são polissacarídeos, mas são compostos de um número de diferentes unidades de glicoses. Geralmente é menos ordenada do que a celulose, embora às vezes possa formar unidades cristalinas;
- Lignina: polímero fenólico altamente amorfo de peso molecular indeterminado. É responsável por fornecer rigidez à parede da célula e também exerce a função de adesivo serve para ligar as células individuais na região lamela média.

3.1.6. Propriedades tecnológicas

3.1.6.1. Secagem

O teor de umidade é uma propriedade física que tem grande influência na usinabilidade da madeira. (Kollmann e Cotê, 1984 apud Lucas Filho, 2004).

A água contida na madeira pode estar presente de duas maneiras:

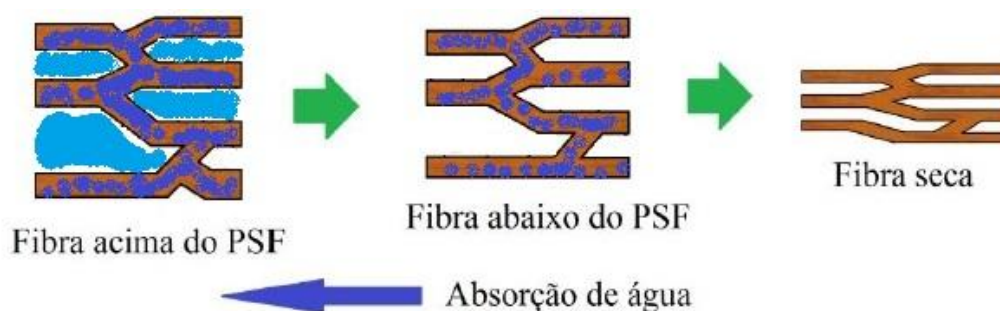
- Água livre (capilar) e;
- Água de impregnação (higroscópica).

A água livre é que se encontra preenchendo as cavidades celulares (lúmens), enquanto que a água de impregnação é encontrada nas paredes celulares. (Hoadley, 2000 e Wood Handbook, 2010).

De acordo com Hoadley (2000), o ponto de saturação das fibras (PSF), é aquele em que as cavidades celulares não contém mais água livre, mas as paredes celulares encontram-se saturadas com a água de impregnação, e segundo o Wood Handbook (2010), é um valor de cerca de 30%, podendo variar entre espécies e entre partes de uma mesma árvore.

Durante o processo de secagem da madeira, a primeira água a ser removida é a água livre, visto que as forças que a mantêm ligada são apreciavelmente menores do que as forças que mantêm a água de impregnação existente na parede celular (SKAAR, 1972 apud Manríquez, 2012). A representação da perda de água durante a secagem está esquematizada na Figura 8.

Figura 8 - Perda de água nas fibras da madeira.



Fonte: Manríquez, 2012 (Adaptação).

3.1.6.2. Massa específica

A massa específica é uma propriedade física, sendo a de maior importância na madeira, pois dela dependem estreitamente suas propriedades tecnológicas. A variação natural de peso em madeiras de iguais dimensões reflete a quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume ou a quantidade de espaços vazios nelas existentes (sendo que a presença de incrustações e conteúdos como, gomo-resinas, cristais, sílica etc. quando em grande quantidade, também pode aumentar o peso da madeira). Como a composição anatômica é peculiar a cada espécie, a massa específica da madeira apresenta uma variação natural de 0,13 a 1,4 g/cm³. (Burger e Richter, 1991).

É interessante lembrar que a massa específica varia de acordo com vários fatores: cerne, alburno, lenho inicial, lenho tardio e, sobretudo, com o teor de umidade. Portanto, uma comparação, para ser válida, deve ser feita nas mesmas condições. (Burger e Richter, 1991).

A massa específica é um indicador do esforço na madeira e pode prever características com dureza, usinabilidade e resistência à impressão. (Hoadley, 2000).

3.1.6.3. Dureza

A dureza é uma propriedade mecânica intimamente associada à massa específica. (Burger e Richter, 1991). É geralmente definida como sendo a resistência a indentação, a dureza mais utilizada para avaliação da madeira é a dureza Janka. (Wood Handbook, 2010).

3.2. Modificação térmica da madeira

A termorreificação ou modificação térmica da madeira é definida por Hill (2006), como sendo a aplicação de calor na madeira objetivando impor melhorias em seu desempenho.

A aplicação de calor na madeira resulta em uma degradação associada com alterações químicas do material. Quando cuidadosamente controladas, as alterações de propriedade oriundas da modificação térmica, podem ser utilizadas para determinadas aplicações. Tem havido uma grande quantidade de atividade comercial neste setor, principalmente na Finlândia, França e Países Baixos. (Hill, 2006).

Segundo Hill (2006), a modificação térmica é invariavelmente realizada a temperaturas entre 180°C e 260°C, temperaturas inferiores a 140°C resultam em apenas ligeiras alterações nas propriedades do material e temperaturas mais altas, resultam em uma degradação inaceitável para o substrato.

Como resultado da injeção de calor, Hill (2006) menciona que ocorrem alterações químicas dos constituintes macromoleculares e propriedades físicas e biológicas são alteradas. Estas alterações incluem:

- Melhorias da estabilidade dimensional, dependendo das condições de tratamento;
- Redução da higroscopicidade;
- Melhoria da resistência ao ataque microbiológico;
- Frequentemente, um aumento nos módulos durante as fases iniciais do aquecimento, com uma redução após;
- Redução na resistência ao impacto, módulo de ruptura e a fratura;
- Redução da resistência à abrasão;
- Tendência a rachar e quebrar em partes, nós a se soltar;
- Escurecimento do material.

As propriedades da madeira termorretificada são altamente dependentes do tipo de tratamento aplicado, e é muito importante se levar isto em conta na hora de comparar os vários métodos existentes.

3.2.1. Variáveis do processo

Hill (2006) menciona que existe uma grande variedade de métodos de modificação térmica que podem ser aplicados a madeira, entre essas variações pode-se citar:

- Temperatura e duração do processo (podem variar entre 180°C a 280°C e 15 minutos a 24 horas);
- Atmosfera de tratamento (ar, vácuo ou atmosfera inerte);
- Sistema aberto ou fechado (uso ou não de caixa selada);
- Espécie da madeira (as espécies correspondem ao tratamento de diferente maneiras);
- Sistemas úmido ou seco (presença ou não de água ou vapor de água);
- Dimensões da madeira a ser tratada (devido a taxa de transferência de calor);
- Uso de catalisadores (utilização de produtos que aceleram o processo de degradação).

3.2.2. Modificações químicas

3.2.2.1. Hemiceluloses

A hemicelulose é o componente mais afetado (Esteves e Pereira, 2009). Quando a madeira é aquecida, seu componente mais instável termicamente, a hemicelulose, começa a se degradar. As hemiceluloses são os componentes mais reativos, pois elas degradam em baixas temperaturas, entre 160°C e 220°C, devido a sua baixa massa molecular. A perda de hemiceluloses leva a um aumento do grau de cristalinidade de amostras de madeira. (Hill, 2006 e Poncksac, 2006 apud Silva, 2012).

3.2.2.2. Celulose

A celulose é o componente mais resistente ao aquecimento, e isto é atribuído principalmente à porção cristalina (Esteves e Pereira, 2009). É geralmente aceito que a degradação da celulose ocorra a uma temperatura mais elevada do que aquela da hemicelulose, embora algumas evidências sejam contraditórias. É provável que ocorra uma pequena degradação térmica a temperaturas relativamente baixas, mas a uma taxa bem mais baixa do que a que ocorre com as hemiceluloses. As regiões amorfas da celulose são as mais susceptíveis a degradação térmica, as regiões cristalinas degradam a temperaturas mais elevadas. (Hill, 2006). O efeito da degradação da celulose começa a ser importante em torno de 220°C. (Boonstra e Tjeerdsma, 2006; Li, Enriksson, Gellerstedt, 2005 apud Silva, 2012).

3.2.2.3. Lignina

De acordo com Silva (2012), a lignina é o componente mais estável da madeira durante o tratamento térmico e tem um comportamento termoplástico após 150°C, sendo que sua estrutura é diferente entre coníferas e dicotiledôneas. A degradação da lignina ocorre a temperaturas acima de 200°C, porém há evidências de que ocorrem modificações a temperaturas mais baixas. (Hill, 2006).

3.2.2.4. Extrativos

Os extrativos são degradados ou deixam a madeira ao mesmo tempo que novos extrativos emergem da degradação da madeira (Esteves e Pereira, 2009). Na faixa entre 100°C e 180°C, os extrativos são encontrados no interior da amostra, com temperaturas próximas a 200°C os extrativos migram para a superfície, e para temperaturas acima de 200°C, já não são mais detectados. (Hill, 2006).

3.2.3. Modificações físicas

3.2.3.1. Cor

Ocorre um escurecimento da peça de madeira, mudança relacionada a temperatura e tempo de tratamento. (Hill, 2006).

3.2.3.2. Perda de massa e mudanças dimensionais

O aquecimento da madeira ocasiona uma redução da massa e do seu volume, o que varia de acordo com o método de tratamento, temperatura e tempo de exposição. (Seborg et al., 1953; Stamm, 1956; Rusche, 1973b; Fung et al., 1974 apud Hill, 2006.)

3.2.3.3. Cristalinidade

Durante os estágios iniciais do tratamento, ocorre um aumento no grau de cristalinidade, mas conforme o tempo se estende, ocorre a decomposição da hemicelulose, acompanhada pela queda da cristalinidade. (Hirai et al., 1972 apud Hill, 2006).

3.2.3.4. Propriedades mecânicas

De acordo com Hill (2006), são:

- Força e resistência: normalmente diminuem com o tratamento térmico;
- Módulo de elasticidade: em alguns casos, quando o tratamento é realizado por curtos períodos, ocorre um leve aumento.
- Módulo de ruptura: ao contrário do que ocorre com o módulo de elasticidade, nem a baixas temperaturas ocorre um aumento do valor desta propriedade;

3.2.3.5. Estabilidade dimensional

Ocorre a melhoria da estabilidade dimensional quando a madeira é termicamente tratada. O efeito observado é dependente do processo de aquecimento adotado. (Hill, 2006).

3.2.3.6. Higroscopicidade

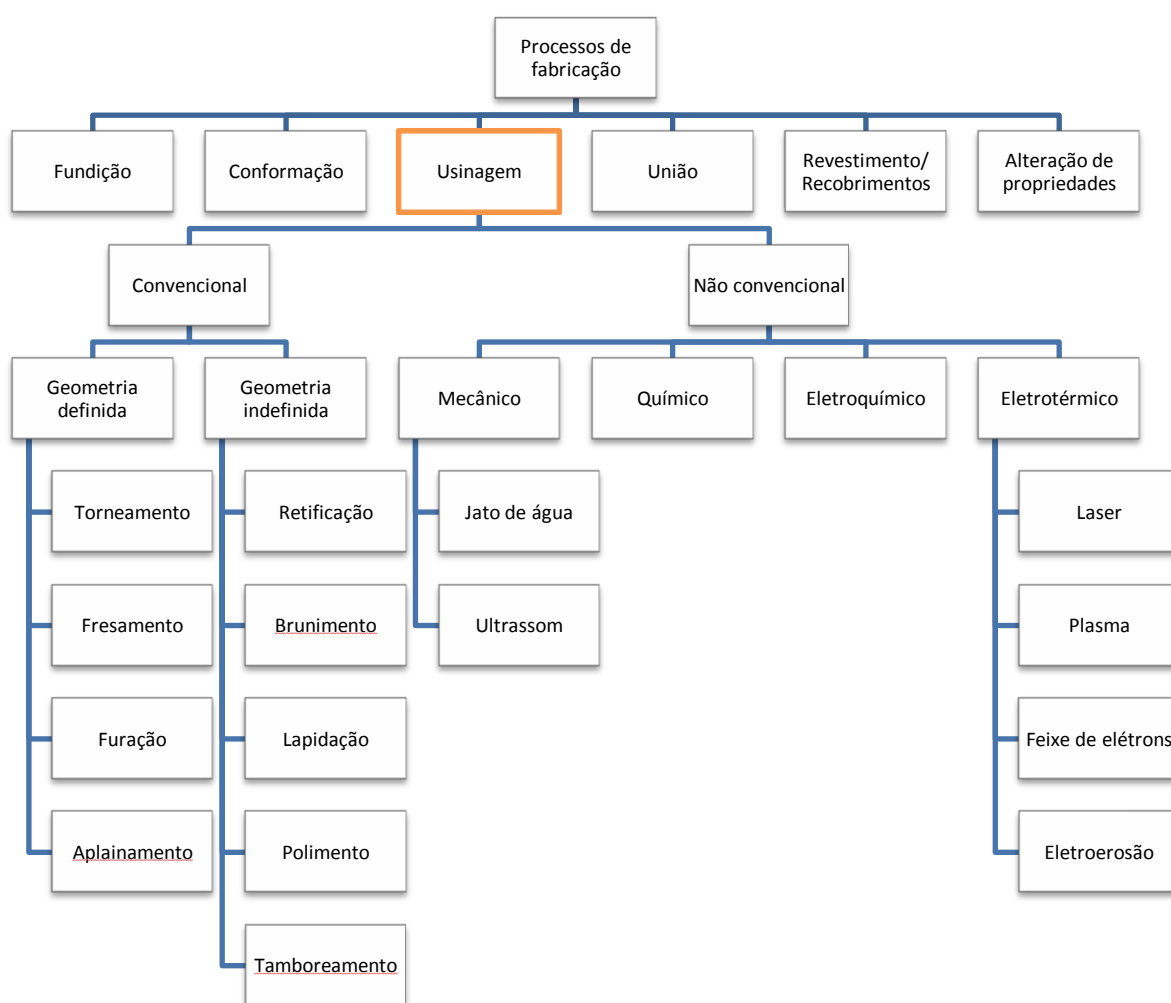
A higroscopicidade da madeira é consideravelmente reduzida quando tratada termicamente. Essa propriedade é afetada pelo tempo e temperatura do processo. (Hill, 2006).

No Brasil, atualmente, diversos trabalhos têm sido realizados no que diz respeito à termorretificação, autores como Silva (2012), Moura et al. (2012), Calonego et al. (2014); Cademartori (2012), Zanuncio (2014), Poubel (2013), Anjos (2014), Menezes (2013); Araújo (2010); Manríquez (2012); Güths et al. (2014), tem empregado diferentes metodologias para promover uma melhoria das propriedades da madeira,

3.3. Usinagem

O processo de fabricação é o ato de transformar matérias-primas em produtos acabados através de diversos processos, seguindo planos bem organizados em todos os aspectos. A Figura 9 ilustra a classificação dos processos de fabricação segundo a DIN 8580, destacando o processo de usinagem.

Figura 9 - Classificação do processo de fabricação com destaque para a usinagem.



Segundo a NBR 6175, entende-se por processo de usinagem, o processo de fabricação que, através da remoção de cavaco por uma determinada ferramenta de corte, visa conferir a uma peça: forma, dimensão, acabamento especificado, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens. Por cavaco, entende-se a porção

de material removida da peça pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. No que diz respeito à ferramenta cortante, se ela possuir uma única superfície de saída, é dita ferramenta monocortante; quando possuir mais de uma superfície de saída é chamada ferramenta multicortante.

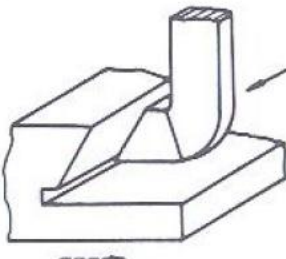
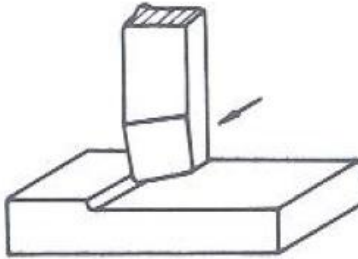
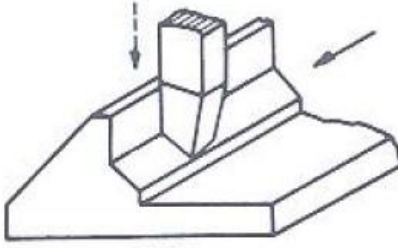
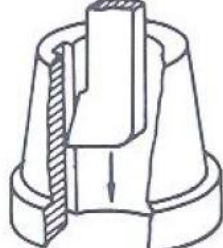
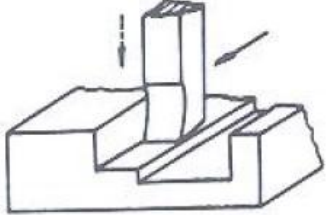
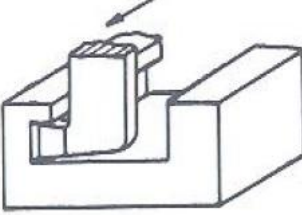
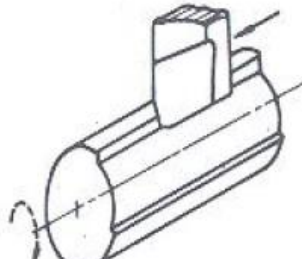
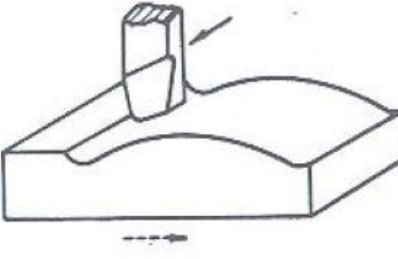
Quando o processo de usinagem visa obter na peça as dimensões finais ou um acabamento superficial especificado, ou ambos, é denominado como sendo um processo de acabamento, agora, quando visa obter na peça a forma e dimensões próximas das finais, é denominado processo de desbaste, ocorrendo anteriormente ao processo de acabamento. (NBR 6175).

3.3.1. Processo de aplainamento

O aplainamento é o processo mecânico de usinagem que se destina a obtenção de superfícies regradadas, geradas por um movimento retilíneo alternante da peça ou da ferramenta, o processo pode ocorrer horizontal ou verticalmente, destinando-se tanto a operações de desbaste quanto as de acabamento. (NBR 6175 e Ferraresi, 1995). A Figura 10 ilustra as diversas variações do processo de aplainamento.

Trent e Wright (2000) utilizam diferentes termos para denominar o processo de aplainamento. Quando o movimento de corte é efetuado pela ferramenta (plaina limadora), “shaping” e quando o movimento é efetuado pela peça (plaina de mesa), “planing”.

Figura 10 - Variações no processo de aplainamento.

Aplainamento de guias	Aplainamento de superfícies
	
Aplainamento de perfis	Aplainamento de rasgo de chave
	
Aplainamento de rasgos	Aplainamento de ranhuras em 'T'
	
Aplainamento de superfícies cilíndricas de revolução	Aplainamento de superfícies cilíndricas
	

Fonte: Ferraresi, 1995 (adaptação).

3.3.2. Conceitos básicos na usinagem

3.3.2.1. Movimentos na usinagem

Diniz et al. (2001) cita que os movimentos na usinagem são aqueles referentes à ferramenta e à peça durante a usinagem, permitindo a ocorrência da mesma. Podem ser considerados como ativos, quando promovem a remoção de material, ou como passivos, que apesar de não promover remoção de material, são fundamentais para a realização do processo.

Por estarem diretamente envolvidos à remoção de material, os movimentos ativos estão descritos abaixo.

- Movimento de corte: movimento entre a ferramenta e a peça que, sem a ocorrência simultânea do movimento de avanço, provocaria a remoção de cavaco durante uma única rotação ou um curso da ferramenta. (Ferroresi, 1995).
- Movimento de avanço: movimento entre a ferramenta e a peça que, juntamente com o movimento de corte, possibilita uma remoção contínua ou repetida do cavaco, durante várias rotações ou curso da ferramenta. O movimento de avanço pode ser contínuo, como no caso da furação, ou intermitente, como no caso do aplainamento. (Diniz et al., 2001).
- Movimento efetivo de corte: movimento entre a ferramenta e a peça, a partir do qual resulta o processo de usinagem. Quando o movimento de avanço é contínuo, o movimento efetivo é o resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço, já quando o movimento de avanço é intermitente, o movimento efetivo é o próprio movimento de corte. (Diniz et al, 2001).

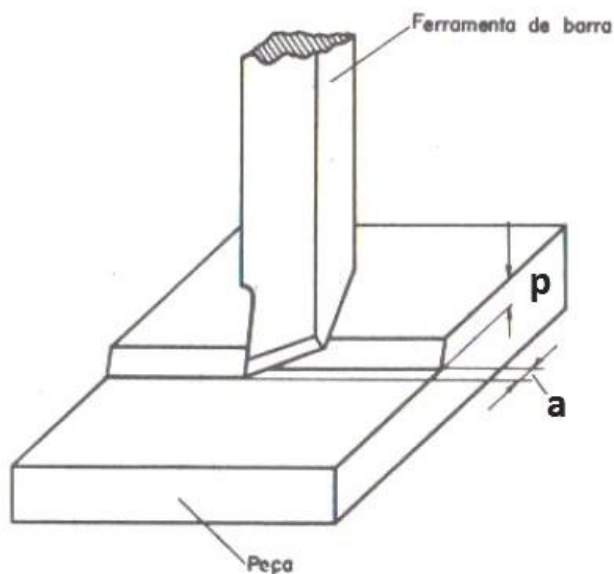
3.3.2.2. Grandezas de corte

De acordo com Ferraresi (1995), as grandezas de corte são aquelas que devem ser ajustadas na máquina para remoção de cavaco. São elas:

- Avanço (a): percurso de avanço em cada volta ou a cada curso;
- Profundidade de Corte (p): profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte;
- Espessura de Penetração (e): espessura de corte em cada curso ou revolução.

A Figura 11 ilustra as grandezas de corte expressas no processo de aplainamento.

Figura 11 - Grandezas de corte no processo de Aplainamento.



Fonte: Ferraresi, 1995.

3.3.2.3. Velocidades na Usinagem

Segundo Ferraresi (1995), as velocidades envolvidas no processo de usinagem são:

- Velocidade de corte (v_c): velocidade instantânea no ponto de referência na aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte;
- Velocidade de avanço (v_a): velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço;
- Velocidade efetiva de corte (v_e): velocidade instantânea do ponto de referência na aresta cortante, segundo a direção efetiva de corte.

3.3.3. Usinagem de madeira

A usinagem de madeira é um processo de ruptura por tensão. Seja manualmente ou através uma máquina, a força é transmitida para a madeira através de uma ferramenta de corte. A ferramenta tem sua geometria definida, e a madeira tem propriedades físicas e mecânicas características. A direção e o sentido da força são ditados pela geometria da ferramenta, e essa determina como os esforços são desenvolvidos. As propriedades mecânicas da madeira determinam como os esforços são resistidos, portanto, as características da madeira juntamente com as da ferramenta indicam o modo de ruptura (corte). (Hoadley, 2000).

Dois fatores são importantes a este respeito. Uma delas é a geometria da ferramenta, na qual a área de corte (A) da cunha da ferramenta é suficientemente pequena de modo a que a força (F) aplicada à ferramenta irá causar uma tensão (F / A) maior do que a tensão madeira. O segundo fator é a condição da madeira, seu teor de umidade, sua temperatura e defeitos. (Hoadley, 2000).

Silva et al. (1999) apud Lucas Filho (2004), concluíram que com relação à estrutura microscópica da madeira, em qualquer operação de usinagem as fibras da madeira são arrancadas e, raramente, cortadas e este efeito pode ser explicado pela grande dimensão dos gumes das ferramentas em relação às dimensões das fibras.

3.3.3.1. A peça

A natureza anisotrópica da madeira é de grande influência no processo de usinagem, fatores como variações de densidade (entre e dentro das espécies),

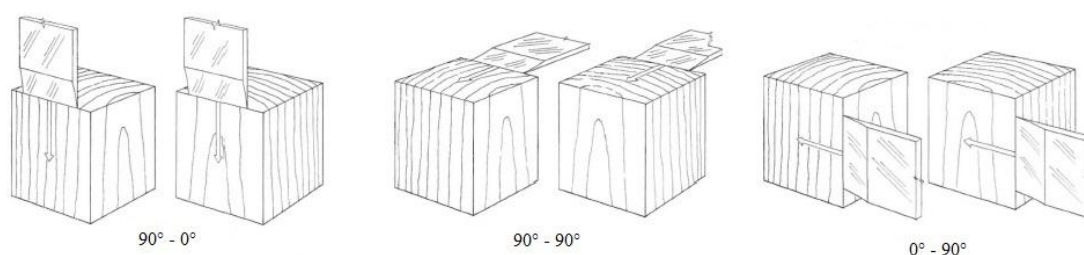
orientação da grã, extrativos contidos no cerne de algumas espécies (abrasivos), defeitos como nós, umidade da peça (afeta a resistência mecânica), plano de corte adotado, afetam as forças desenvolvidas no processo. (Hoadley, 2000).

3.3.3.2. Tipos de corte ortogonal

Para fins de estudo, afirma Hoadley (2000), classificam-se os planos convencionais de corte em: longitudinal, representado na figura 12 pela notação $90^\circ - 0^\circ$; transversal, representado na Figura 12 pela notação $90^\circ - 90^\circ$; e radial representado na Figura 12 pela notação $0^\circ - 90^\circ$.

Essa classificação foi desenvolvida na década de 1950 por M. W. McKenzie como uma base para a classificação da ação do corte ortogonal, sendo descrita por dois números, onde primeiro representa o ângulo do gume da ferramenta e a “fibra” da madeira e o segundo o ângulo entre a direção de corte e a “fibra” da madeira. (Hoadley, 2000).

Figura 12 - Os três tipos de corte ortogonal.



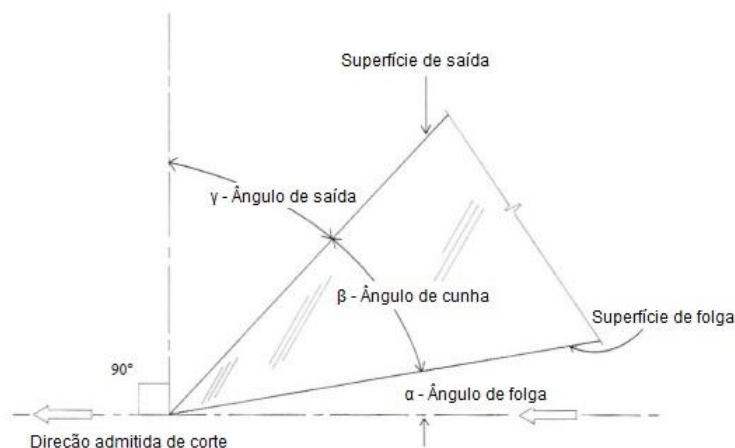
Fonte: Hoadley, 2000 (adaptação).

3.3.3.3. A ferramenta de corte

a - Ângulos de ferramenta

Os ângulos na cunha de corte são: γ - ângulo de saída, β - ângulo de cunha e α - ângulo de folga (incidência), e estão representados na Figura 13.

Figura 13 - Ângulos na cunha de corte.



Fonte: Hoadley, 2000 (adaptação).

Dependendo da circunstância, a geometria da ferramenta de corte pode variar consideravelmente. O ângulo de cunha sempre será um valor positivo. Os ângulos de saída e de folga podem ser negativos, o que para o ângulo de folga indica interferência entre peça e ferramenta. (Hoadley, 2000).

b - Materiais para ferramenta de corte

Stemmer (1995), afirma que são exigências básicas de uma ferramenta de corte: dureza a frio, dureza a quente, tenacidade, resistência à abrasão, estabilidade química e facilidade de obtenção a preços econômicos. Porém, não há no mercado material que reúna todas as exigências, fazendo-se necessária a verificação das exigências primárias e secundárias, de modo a se poder escolher o material mais adequado para cada caso.

Para Diniz et al. (2001), a seleção do material para a ferramenta de corte é baseada numa série de fatores, dentre eles: material a ser usinado, processo de usinagem, condição da máquina operatriz, forma e dimensão da ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem e condições da operação.

Não existe uma classificação geral de materiais para ferramentas, porém, baseado nas características químicas, eles podem ser agrupados da seguinte

maneira: aços rápidos, aços rápidos com cobertura, metal duro, metal duro com cobertura, material cerâmico, nitreto de boro cúbico e diamante. (Diniz et al., 2001).

No caso da usinagem da madeira, são de particular interesse a resistência à abrasão (devido à presença de partículas muito duras, semelhante aos cristais de sílica), a tenacidade (devido a intermitência do corte), a rigidez e a estabilidade química devido a possibilidade de oxidação da ferramenta. (Lucas Filho, 2004).

c - Metal duro

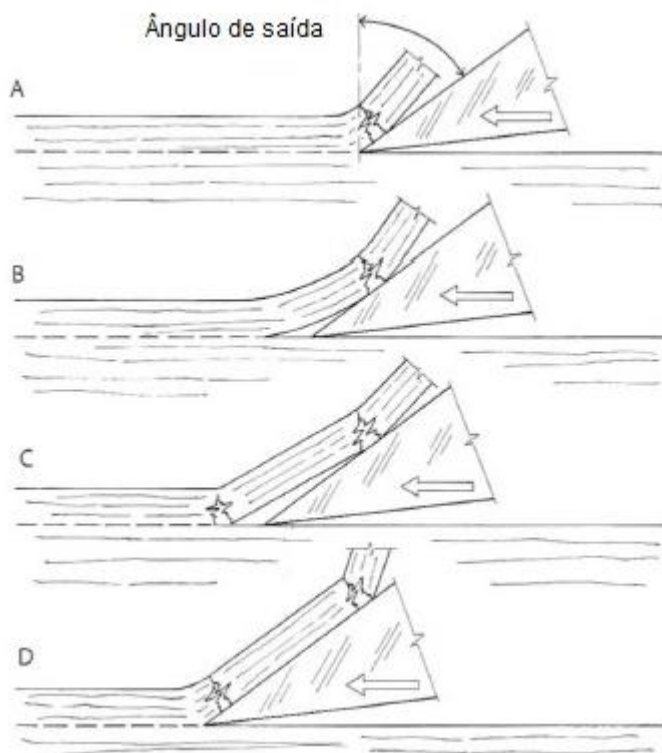
O metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de materiais refratários, sinterizados com mais metais tipo ferro, níquel e cobalto, formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. As partículas duras são carbonetos de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbonetos, como os de titânio, tântalo e nióbio. O tamanho dessas partículas varia geralmente entre 1 a 10 μm e ocupam de 60 a 95% do volume do material. O metal aglomerante é na maioria das vezes o cobalto (responsável pela tenacidade). (Ferraresi, 1995 e Diniz et al., 2001).

A dureza às altas temperaturas e a tenacidade (capacidade de resistência ao choque), são propriedades que se exigem de qualquer material utilizado em ferramentas de usinagem e que encontram um compromisso bastante bom no metal duro. (Diniz et al., 2001).

3.3.3.4. O corte 90°-0°

Este tipo ocorre no corte paralelo às “fibras”, no processo de aplainamento. O cavaco formado é empurrado ao longo da superfície de saída. O corte típico envolve uma sequência cíclica de eventos, conforme Figura 14.

Figura 14 - Ação do corte.



Fonte: Hoadley, 2000 (adaptação).

A ferramenta separa as fibras longitudinalmente, começando a formação do cavaco (A). A medida que a ferramenta avança, o cavaco desliza pela superfície de saída da ferramenta. O cavaco é agora uma viga engastada (cantilever) que resiste à flexão. A raiz do cavaco se estende. Por falha da madeira em tensão perpendicular à “fibra” bem a frente da cunha de corte (B). O comprimento em balanço do cavaco, apoiado em uma extremidade sobre a face da ferramenta, fica tão longo que as tensões de flexão do cavaco se igualam a resistência da madeira e o cavaco quebra próximo a região da raiz (C). O gume avança para o ponto de ruptura e a cunha começa a levantar o próximo segmento de cavaco (D) e assim por diante. (Hoadley, 2000).

3.3.3.5. Tipos de cavaco

A formação do cavaco, segundo Diniz et al. (2001) influencia no desgaste da ferramenta, esforços de corte e calor gerado na usinagem, logo, estão envolvidos aspectos econômicos e de qualidade da peça, a segurança do operador, a utilização adequada da máquina ferramenta, etc.

Franz (1954) classifica os cavacos formados durante a usinagem no plano 90° - 0° como sendo: tipo I (Figura 15), tipo II (Figura 16) e tipo III (Figura 17). Abaixo são abordados com as características mencionados por Franz (1954), os três tipos de cavaco que se formam durante a usinagem no plano longitudinal.

- Tipo I

Formado quando as condições de corte são tais que a madeira se rompe anteriormente a aresta de corte, por clivagem e o cavaco se separa como uma viga engastada (cantilever). Têm-se cavacos em formas de lascas.

Figura 15 - Cavaco tipo I.



Fonte: Franz,1954.

Este tipo de cavaco proporciona o meio mais eficiente de remoção de material e causa pouco desgaste na ferramenta, porém pode causar defeitos na superfície da peça usinada.

- Tipo II

Quando a ruptura da madeira se produz ao longo de uma linha que se estende pela superfície de saída da ferramenta. Neste caso, a ruptura se dá por cisalhamento e forma um cavaco contínuo.

À medida que o corte avança é formado um cavaco contínuo e levemente espiralado. O raio desta espiral aumenta à medida que a espessura do cavaco aumenta.

Figura 16 - Cavaco tipo II.



Fonte: Franz,1954.

Existe uma continuidade na formação deste tipo de cavaco que é o tipo ideal do ponto de vista de qualidade de superfície gerada na usinagem, porém causa um considerável desgaste da ferramenta visto que o gume está sempre em contato com a madeira.

- Tipo III

Formado pela compressão e cisalhamento da madeira. Produzem superfícies que exibem diversas estruturas da madeira amassadas e arrancadas, deixando a superfície com um aspecto felpudo.

Figura 17 - Cavaco tipo III.



Fonte: Franz,1954.

O cavaco admite formas não definidas, reduzido a fragmentos.

3.3.4. Forças na usinagem

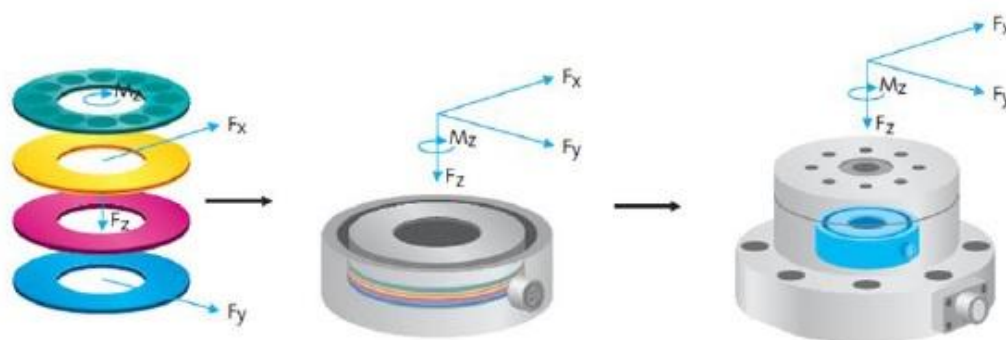
O conhecimento das forças de usinagem é necessário para a estimativa da potência requerida e para o projeto de máquinas operatrizes, suportes e fixação de ferramentas, com rigidez adequada e livres de vibrações. Além disto, a força de corte pode ser um importante indicador da usinabilidade, constituindo um parâmetro importante na tomada de decisões sobre o material a ser utilizado em determinada operação. (Diniz et al., 2001; Trent e Wright, 2000).

De acordo com Ferraresi (1995) a força de usinagem é dependente de fatores como:

- Material da peça;
- Área da seção de corte;
- Espessura de corte;
- Geometria da ferramenta e ângulo de trabalho;
- Estado da afiação da ferramenta;
- Material da ferramenta;
- Velocidade de corte.

Como a força de usinagem varia com os ângulos da ferramenta, uma medição precisa das componentes da força de usinagem é de grande valia para otimizar a geometria da ferramenta. Vários dinamômetros foram desenvolvidos, sendo que atualmente, um dos mais utilizados é a plataforma tipo célula de carga piezelétrica (ver Figura 18) (Trent e Wright, 2000). Por piezeletricidade, entende-se a propriedade que alguns cristais possuem de se polarizar eletricamente quando submetidos a deformações elásticas ou ainda o efeito contrário, de quando submetidos a uma polarização elétrica, exibirem deformações. (Machado et al., 2009).

Figura 18 – Princípio do dinamômetro tipo piezelétrico.



Fonte: Manual Kistler.

Para a medição de componentes de força de usinagem, cristais piezelétricos são introduzidos entre partes metálicas de dinamômetros a fim de medir a tensão elétrica gerada durante o esforço. Geralmente, um invólucro com os cristais e os pólos é montado no caminho do esforço, de modo a sofrer a carga. A medição de força de usinagem por meio de dinamômetros piezelétricos necessita também do uso de amplificadores de carga. (Machado et al., 2000). Os amplificadores convertem os sinais de carga do dinamômetro em tensões de saída, a tensão de saída é proporcional às forças e momentos que ocorrem. (Manual Kistler)

Segundo Ferraresi (1995), por convenção a força de usinagem (F_u) é a força resultante aplicada pela peça sobre a ferramenta, da qual nem a direção nem o sentido são conhecidos, o que torna muito difícil sua medição direta. A força de usinagem é dada pela expressão:

$$F_u = F_t + F_p \text{ Eq.1}$$

Onde:

F_t : força ativa (tangencial), localizada no plano de trabalho. Suas componentes contribuem para a potência de trabalho. É dada pela equação:

$$F_t = F_{corte} + F_{avanço} \text{ Eq. 2}$$

F_p : força passiva, localizada num plano perpendicular ao plano de trabalho. Não contribui para a potência de usinagem, pois é perpendicular aos movimentos, porém é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta, podendo resultar em dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e dimensão apertadas.

A força de corte encontra aplicação no cálculo da estrutura e dos mecanismos de acionamento de máquinas operatrizes, permite o cálculo da potência de usinagem e consequentemente a determinação do rendimento da máquina, para diferentes cargas e velocidades de trabalho, onde geralmente é usada a força de corte média (medida estática da força), já para o mecanismo de formação do cavaco, para estudos da estabilidade dinâmica da máquina operatriz, é necessária a medida da variação da força de corte (medida dinâmica da força). (Ferraresi, 1995).

A força de corte, segundo Stemmer (1995) pode ser relacionada à seção de corte, conforme a equação abaixo:

$$F_c = K_c \times A \text{ Eq.3}$$

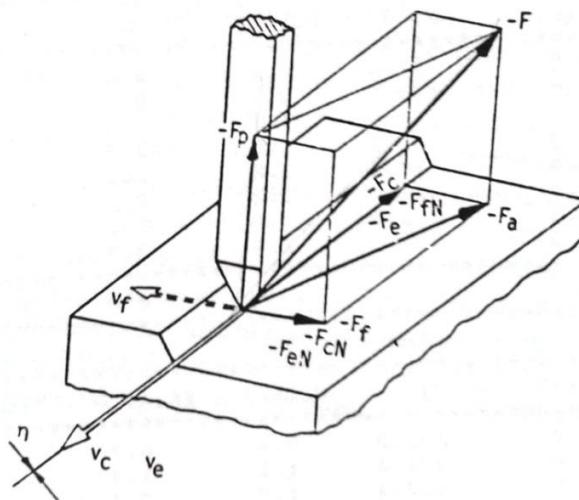
Onde:

K_C : pressão específica de corte em $[N/mm^2]$, este valor é equivalente a “energia de corte por unidade de volume”, ou seja, a energia necessária para remover uma unidade de volume do material da peça, que também equivale a “potência de corte para remover a unidade de volume de material da peça por unidade de tempo”, ou seja, $K_C [N/mm^2] = e_C [J/cm^3] = p_C [W.s/cm^3]$.

A: seção de corte. Para o processo de aplainamento é o produto da profundidade de corte (p) com o avanço (a).

A Figura 19 Representa as forças de atuam durante o processo de usinagem de aplainamento.

Figura 19 – Componentes da força de usinagem no aplainamento.

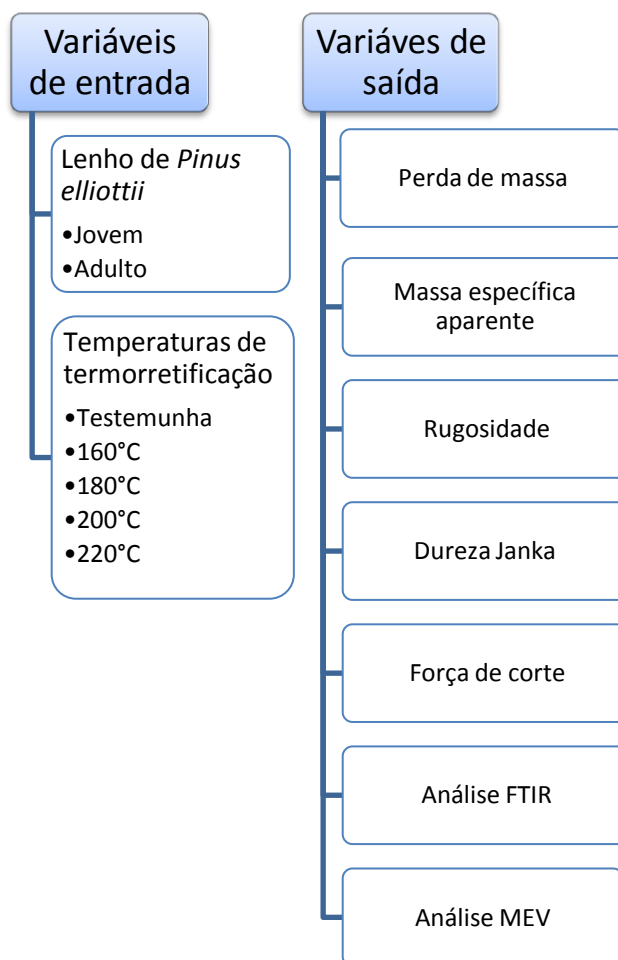


Fonte: Stemmer, 1995.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As variáveis monitoradas durante o desenvolvimento do trabalho podem ser observadas na Figura 20.

Figura 20 - Variáveis monitoradas no processo.



4.1. Matéria prima para confecção dos corpos de prova

O material de estudo procedeu de povoamentos homogêneos experimentais de *Pinus elliottii* pertencentes à empresa Ambar Florestal, localizada no município de São José do Norte - RS, que cedeu cinco toras de madeira *Pinus elliottii*, com 28 anos de idade.

Realizou-se o corte do material a partir de amostragem por delineamento experimental totalmente ao acaso de cinco árvores da espécie, onde foram desdobradas posteriormente em dez pranchões centrais (incluindo a medula no centro da prancha) e com as seguintes dimensões para os sentidos longitudinal, tangencial e radial: 90 x 24 x 9 cm, conforme pode ser verificado na Figura 21, na Serraria Bojuru, localizada na Vila da Quinta em Rio Grande - RS, onde seguiram posteriormente para a UFPel para serem secas em estufa.

Figura 21 - Pranchões desdobrados na Serraria Bojuru.



A fim de secar a madeira para evitar inconvenientes como ataques por fungos, as mesmas foram alocadas em uma estufa, Biopar, com ar forçado a uma temperatura de 45°C, localizada no curso de Engenharia Industrial Madeireira da UFPel, onde permaneceram por 21 dias, conforme a Figura 22.

Após a etapa de secagem, as pranchas foram transportadas para a marcenaria da FURG, onde foram cortadas em forma prismática, sentido 90-0, o qual será analisado durante os testes, tendo-se o cuidado de separar os lenhos de madeira jovem e madeira adulta. A separação dos lenhos foi definida pela variação radial (medula-casca). Contando a partir da medula até segundo anel de crescimento o lenho é considerado infantil, e foi descartado nesse trabalho, ao chegar ao segundo anel, marcou-se então cinco centímetros em direção a casca, obtendo-se assim os corpos de prova de lenho jovem. Após remover a casca, marcou-se cinco centímetros em direção a medula, de onde se obteve os corpos de

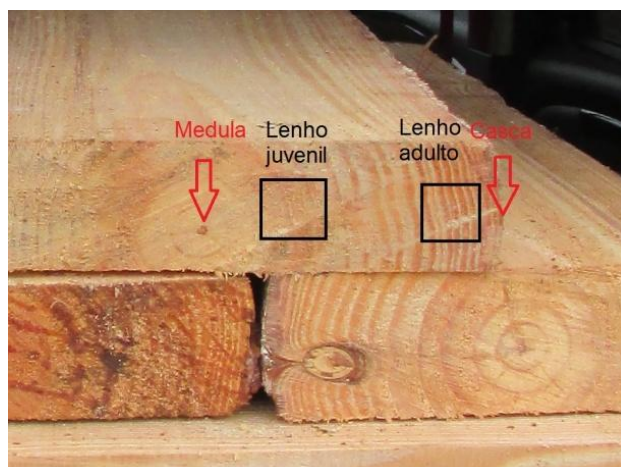
prova de lenho adulto, conforme a Figura 22. Corpos de prova que continham nós, rachaduras e canais resiníferos não foram utilizados nos testes.

Figura 22 - Estufa para secagem de madeira.



Os testes foram realizados na face longitudinal tangencial dos corpos de prova, sendo que, quando se trata dos corpos de prova relativos ao lenho juvenil, a face longitudinal tangencial escolhida foi a que ficava voltada para a medula, já quando se trata dos corpos de prova relativos ao lenho adulto, a face longitudinal tangencial escolhida foi a que ficava voltada para a casca.

Figura 23 - Posição de retirada dos corpos de prova.



Os corpos de prova foram produzidos com dimensões finais de comprimento, (L) x largura (E) x altura (H) de 15 x 5 x 5 cm, conforme se pode notar na Figura 24.

Figura 24 – Indicação das dimensões no corpo de prova.



Após cortados, os corpos de prova seguiram novamente para o laboratório da Engenharia Industrial Madeireira da UFPel, onde permaneceram em uma câmara climática, Equilam modelo LHP 250, a temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $65\%\text{UR} \pm 3,25\%\text{UR}$, por 14 dias para atingir a umidade de equilíbrio de 12%, para atender a NBR 7190, conforme Figura 25.

Figura 25 – Distribuição dos corpos de prova na câmara climática.



Após retirados da câmara os corpos de prova foram ensacados um a um, a fim de evitar ganho de umidade.

4.2. Verificação de massa e dimensional

Os corpos de prova tiveram suas massas e dimensões (L x E x H) verificadas balança com resolução de 0,01g, e paquímetro com resolução de 0,01mm, a fim de se fazer uma avaliação da perda de massa (diferença entre as massas antes e após a realização do tratamento térmico), massa específica aparente, segundo a NBR 7190, e uma avaliação de perda de massa após o processo de termorretificação.

A densidade aparente, segundo a NBR 7190, é a massa específica convencional dos corpos de prova com 12% de umidade. É dada pela equação:

$$\rho_{aparente} = \frac{M_{12}}{V_{12}} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

M_{12} : massa da madeira a 12% de umidade, dada em Kg.

V_{12} : volume da madeira a 12% de umidade, dada em m³.

4.3. Verificação da rugosidade

No intuito de verificar mudanças na superfície dos corpos de prova, realizou-se a verificação da rugosidade de dois dos cinco corpos de prova de cada tratamento (discriminados na Tabela 2). As especificações do rugosímetro utilizado encontram-se na Tabela 1. O teste foi realizado, no laboratório do PPMec da FURG, segundo a norma JIS B 0601 - 1982, Figura 26, com Cut off de 2,5mm. Foram realizadas duas medições no sentido longitudinal da face a ser analisada e duas na transversal, de acordo com a Figura 27.

Tabela 1 - Especificações do rugosímetro utilizado.

Característica	Especificação
Modelo	Mitutoyo SJ – 201P
Material da ponta	Diamond
Raio da ponta	5 μ m
Força de medição	4mN
Velocidade de medição	0,25mm/s, 0,5mm/s

Figura 26 - Posição da medição de rugosidade.



Figura 27 – Pontos de análise da rugosidade, sendo 1 e 2, medida longitudinal; 3 e 4, medida transversal.



O rugosímetro permitia a verificação dos parâmetros: R_A , R_Y , R_Z e R_Q . Onde:

- R_A : é rugosidade da média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil da linha média;
- R_Y : é a soma do pico mais alto e do vale mais profundo, tendo-se em consideração a linha média;
- R_Z : é soma das médias dos cinco picos mais altos e cinco vales mais profundos, medidos a partir da linha média;
- R_Q : é a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios do perfil a partir da linha média.

Na verificação foram considerados os parâmetros R_A , R_Y e R_Z , pois de acordo com Martins et al. (2011), são os parâmetros mais utilizados na investigação da madeira por outros pesquisadores.

$$R_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad \text{Eq.5}$$

$$R_Y = Y_p + Y_v \quad \text{Eq. 6}$$

$$R_Z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_{Pi} + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_{Vi} \quad \text{Eq.7}$$

Onde:

Y_i : desvios do perfil;

Y_{Pi} : picos mais altos;

Y_{Vi} : vales mais profundos;

Y_P : pico mais alto;

Y_V : vale mais profundo.

4.4. Tratamento térmico dos corpos de prova

O forno utilizado para a realização dos tratamentos térmicos foi um forno industrial elétrico Linn Elektro Therm (Typ KK 260.16 60.1060), localizado no laboratório do PPMec – FURG, e que possui um controlador lógico programável. O tratamento foi realizado em presença natural de oxigênio sem a circulação forçada de ar, tempo de quatro horas e temperaturas entre 160°C e 220°C (Tabela 2).

Para certificar que a temperatura programada no CLP estava sendo atingida, empregou-se um termômetro e um termopar para monitorar a temperatura. Pré testes mostraram que as temperaturas programadas e medidas pelo termômetro e termopar satisfaziam as exigências para o processo de termorretificação.

Tabela 2 - Temperaturas de tratamento térmico.

Tratamento	Temperatura (°C)	Total de corpos de prova	Tempo
T0	Testemunha	10 (5 lenho juvenil + 5 lenho adulto)	-
T1	160	10 (5 lenho juvenil + 5 lenho adulto)	4h
T2	180	10 (5 lenho juvenil + 5 lenho adulto)	4h
T3	200	10 (5 lenho juvenil + 5 lenho adulto)	4h
T4	220	10 (5 lenho juvenil + 5 lenho adulto)	4h

Alguns autores como Cademartori (2012), Cademartori et al. (2015), e Silva (2012), utilizam rampa de aquecimento. Já outros autores, como Araújo (2010), Delucis et al. (2014), Dos Anjos (2014), Güths et al. (2014), Manríquez (2012), Poubel et al. (2013) e Zanuncio et al. (2014), não fazem uso da rampa de aquecimento para termorretificar os corpos de prova. Ainda existem autores que optam por utilizar um escalonamento de temperatura, onde o processo permanece em diversos patamares antes de atingir a temperatura final, como Moura et al. (2012).

No presente estudo os corpos de prova foram colocados no forno para a termorretificação com o forno já estabilizado em sua temperatura final. Os corpos de prova foram mantidos na temperatura de termorretificação por quatro horas, quando o forno era desligado. Os corpos de prova foram retirados do forno quando a temperatura chegava a aproximadamente 35°C.

Posteriormente ao tratamento térmico os corpos de prova tiveram suas massas, dimensões e rugosidade novamente verificados, conforme descrito nos itens 4.2 e 4.3.

4.5. Determinação da perda de massa pós tratamento térmico

A determinação da perda de massa deu-se na totalidade dos corpos de prova a partir da variação entre os valores de massa antes e após os tratamentos de termorretificação, conforme Eq. 8.

$$W_L = \frac{M_{BH} - M_{AH}}{M_{BH}} \times 100 \text{ Eq.8.}$$

Onde:

W_L = perda de massa (%);

M_{BH} = massa dos corpos de prova em equilíbrio antes da termorretificação (g);

M_{AH} = massa dos corpos de prova depois da termorretificação (g).

Obs.: Após o tratamento de 220°C, alguns corpos de prova (tanto do lenho juvenil quanto do adulto), quebraram em algumas extremidades. Essas partes quebradas, foram verificadas junto ao corpo de prova correspondente.

4.6. Verificação da dureza Janka

A dureza Janka avalia a resistência oferecida pelo material à penetração de uma pequena esfera de aço até a metade de seu diâmetro. Assim, é fixada a profundidade de penetração da esfera na madeira e avaliada a força para conseguí-la. (Colenci e Ballarin, 2008).

O teste de dureza Janka foi realizado no laboratório da Engenharia Industrial Madeireira da UFPel, na face longitudinal tangencial de todos os corpos de prova, baseado na norma ASTM D 143-09. Foram realizados dois ensaios por corpo de prova. Deve-se atentar para que cada impressão fique distante de uma impressão vizinha, no mínimo 2,5 vezes o seu diâmetro (distância de centro a centro) e também para que nenhuma impressão fique muito próxima da borda, para evitar que a falta de suporte lateral ocasiona uma maior deformação do material nesse lado, alterando os resultados. (Colenci e Ballarin, 2008).

O equipamento utilizado foi uma prensa de ensaios EMIC DL30000N, o método utilizado foi o Janka raio, com uma esfera de indentação seção 0,9331 cm², com velocidade de 6mm/min. A Figura 28 mostra um corpo de prova durante um ensaio de dureza Janka.

Figura 28 - Ensaio de dureza Janka.

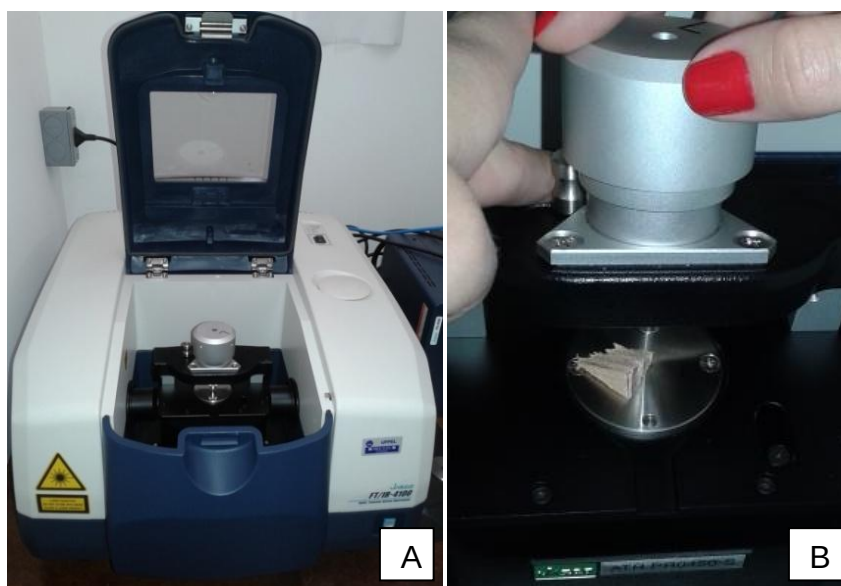


4.7. Análise de espectroscopia por infravermelho (FTIR)

A espectroscopia por infravermelho, informa a composição dos grupos característicos da madeira: celulose, hemicelulose e lignina.

A análise foi realizada na Engenharia Industrial Madeireira da UFPel, em um espectrômetro Jasco 4100 (Figura 29), operando entre 7800 a 350 cm^{-1} . As amostras foram analisadas em forma de lascas e o método utilizado foi o de absorbância. Foi feita a análise em um corpo de prova de cada tratamento e lenho, totalizando dez leituras.

Figura 29 - Espectrômetro utilizado nas análises (A) e detalhe do seu porta amostra (B).



4.8. Ensaio de usinagem

A estrutura morfológica do sistema de medição utilizado consiste basicamente de um transdutor (dinamômetro - Kistler, modelo 9272), um amplificador de sinais (Kistler, modelo 5070A), e um computador com módulo de aquisição A/D (modelo NI USB-6008) para o registro dos dados. O transdutor empregado é do tipo piezoelétrico, onde o sinal gerado pelos cristais é proporcional à força aplicada. A taxa de aquisição empregada para o registro das leituras foi 1000 pontos /segundo.

Para gerenciamento do sistema foi utilizado um programa comercial dedicado a esta finalidade (programa LabVIEW).

A montagem experimental pode ser observada na Figura 30.

Figura 30 - Montagem experimental empregada nos ensaios.



Os ensaios foram realizados em uma plaina limadora Strigon tipo 6H 560/M, localizada no laboratório do PPMec da FURG, cujos parâmetros empregados foram: 40 golpes/minuto, avanço da mesa de 2 mmcurso e profundidade de corte de 1,5 mm. A ferramenta de corte empregada (Figura 31) foi fabricada de um inserto de sangramento para corte em torno, cujo revestimento foi retirado, permanecendo apenas o substrato de metal duro, a ferramenta possuía três milímetros de largura e ângulos: de cunha, $\beta = 50^\circ$; de folga, $\alpha = 10^\circ$; e de saída, $\gamma = 30^\circ$. Os teste foi baseado na norma ASTM D1666.

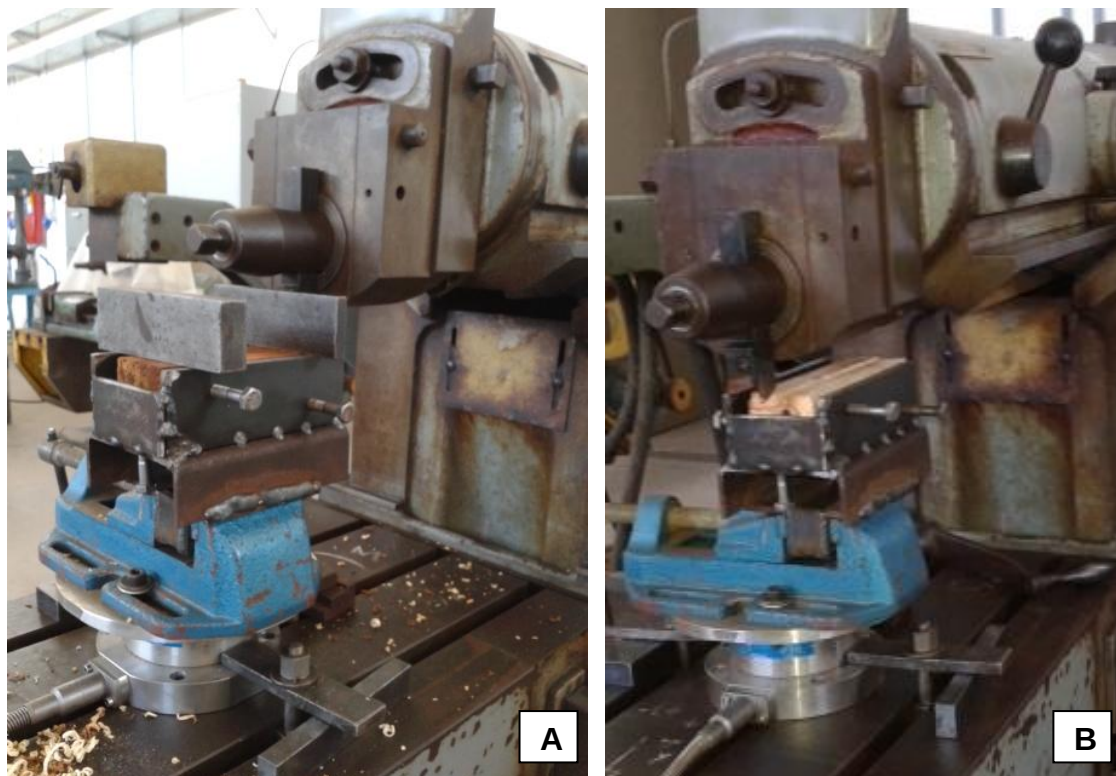
Figura 31 - Esquema dos ângulos da ferramenta.



Na Figura 32, pode ser melhor observado a montagem que envolve a célula de carga e o porta corpo de prova na máquina-ferramenta. O dispositivo porta corpo de prova com batentes superiores foi desenvolvido para fixar o corpo de prova de modo que o mesmo possa sempre manter a distância de 1,5mm de profundidade durante o processo de corte, afim de minimizar os erros no processo.

Vale ressaltar que no momento anterior aos ensaios o paralelismo entre a superfície do CP e o movimento de corte foram todos verificados com relógio comparador, a fim de manter a “fidelidade” do processo.

Figura 32 - Detalhe da montagem da célula de carga na plaina, com batente (A), sem batentes (B) e esquema da interação peça ferramenta (C).



4.9. Análise da estrutura externa por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura permite examinar a superfície de espécimes a altíssimas magnificações. O MEV utilizado encontra-se no CEME-Sul (FURG). Trata-se de um MEV JEOL, modelo JSM - 6610LV, que é um Microscópio Eletrônico de Varredura "analítico" e se destina ao estudo de amostras inorgânicas,

orgânicas e biológicas. O microscópio opera numa tensão de 0,1 a 30 kV com resolução máxima de 3 nm, podendo ser utilizado em observações convencionais de imagem em elétrons secundários (SEI), imagens em elétrons retro-espalhados (BEI) e microanálise química elementar (EDS), com ou sem o uso de padrões para análise e medida de corrente de feixe. (Fonte: página do Ceme Sul).

Foi realizada a observação no MEV de uma amostra para cada condição de temperatura e lenho, totalizando 10 análises.

Os espécimes necessitaram de preparação para poderem ser observados no MEV, tal preparação foi baseada na metodologia de Exley e Butterfield (1974).

Os espécimes são provenientes dos corpos de prova de 15 x 5 x 5 cm, que tiveram uma pequena região (cerca de 1x1cm) escarificada com bisturi (de número 4) de lâmina (de número 24).

A escarificação consiste em “limpar” a amostra através de leves cortes para se observar melhor a estrutura da madeira. Após a escarificação, retirou-se ainda com o auxílio da lâmina e do bisturi, uma fina camada da porção já escarificada.

Após, essas finas camadas retiradas foram encaminhadas para a estufa, De Leo com CLP TLK 48, por onde permaneceram por 60h, a uma temperatura de 103°C, no intuito de ficarem com 0% de umidade. Após esse período, foram encaminhadas diretamente para o CEME Sul, onde foram fixadas ao stub (suporte metálico que se encaixa ao porta amostra do microscópio) através de uma fita de carbono, conforme mostra a Figura 33.

Figura 33 – Amostras posicionadas no stub para análise no MEV.



Por não ser um material condutor, foi necessário o recobrimento com um condutor, no caso, ouro. O recobrimento foi realizado por Sputtering, em um equipamento da Denton Vacuum Des, disponível no CEME-Sul da FURG.

Preparadas as amostras, foram então analisadas em MEV com o método de elétrons secundários (SEI), com magnificação padronizada de 1000x.

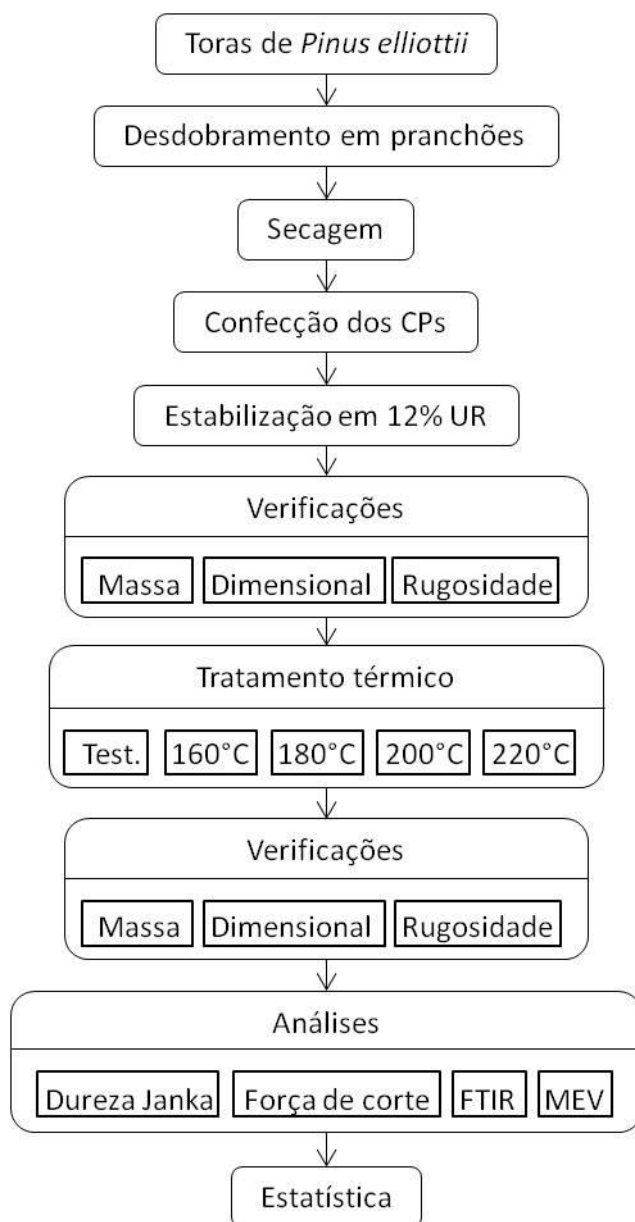
4.10. Análise estatística

Foi realizada ANOVA fatorial, com comparação das médias por teste F em 5% de probabilidade de erro. Posteriormente foi aplicado o teste de comparação de médias Tukey com 5% de probabilidade de erro.

4.11. Fluxograma das principais atividades do trabalho

Como pode ser visto nos itens anteriores, o desenvolvimento do trabalho teve diversas etapas, sendo resumido na Figura 34.

Figura 34 - Fluxograma resumo das atividades descritas em "Materiais e métodos".

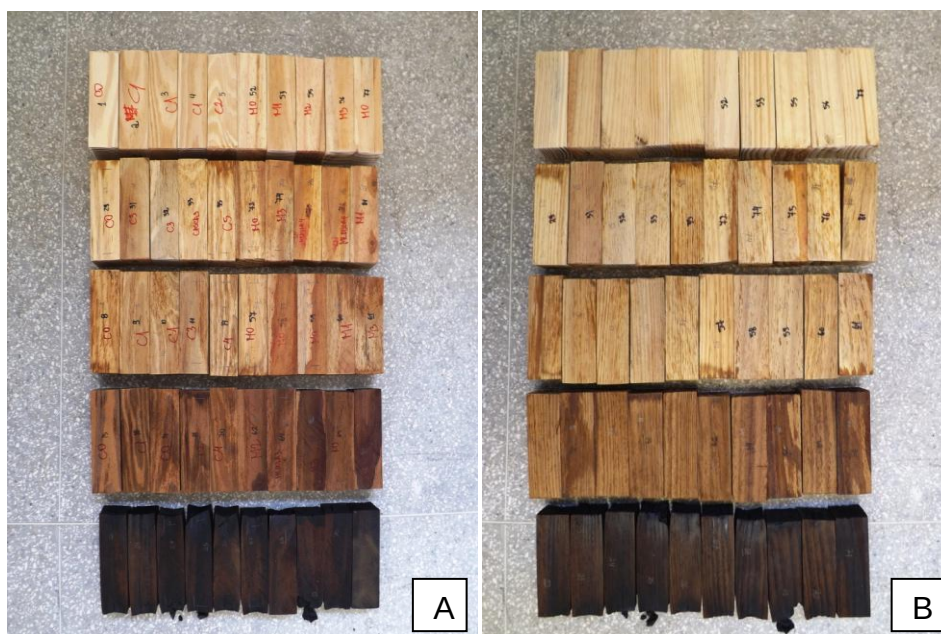


5. RESULTADOS E ANÁLISE

5.1. Alteração na coloração

Em inspeção visual, nota-se que tanto para o plano longitudinal tangencial quanto para o plano longitudinal radial houve o escurecimento dos corpos de prova, independente de ser provindo da região próxima à casca ou à medula. O escurecimento deu-se de maneira gradual, quanto mais elevada a temperatura do tratamento, maior o escurecimento do corpo de prova, observada na Figura 35, onde: A primeira fileira (de cima para baixo): representa os corpos de prova testemunhas (não tratados); A segunda fileira os corpos de prova tratados a 160°C; A terceira fileira os corpos de prova tratados a 180°C; A quarta fileira os corpos de prova tratados a 200°C; A quinta fileira: corpos de prova tratados a 220°C.

Figura 35 - Faces longitudinal tangencial (A) e longitudinal radial (B).



Cademartori (2012), ao estudar as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana* verificou a alteração na cor dos corpos de prova conforme se elevava a temperatura e concluiu que à exposição da madeira à

temperatura causa modificação colorimétrica, sendo que essa é dependente da espécie utilizada, ou seja, a alteração na cor se dá de diferentes formas para diferentes espécies.

Silva (2012), afirma que as mudanças na cor ocorrem devido à degradação dos principais componentes químicos da madeira, principalmente a hemicelulose. A degradação da celulose e lignina pode ter início a baixas temperaturas, como 65°C. (Gouveia, 2008; Thompson et al., 2005 apud Silva, 2012).

Zanuncio et al. (2014), ao estudarem a termorretificação a diferentes tempos e temperaturas para o *Eucalyptus grandis*, concluíram que a temperatura se mostrou mais efetiva na alteração da cor do que o tempo e que essa alteração assemelha-se a cor das madeiras tropicais (de maior valor agregado), podendo ser uma alternativa para ampliação do uso do material.

Nas resinosas, as alterações de cor na madeira, quando submetidas a temperaturas elevadas, ocorrem principalmente pela saída de extrativos e exsudação de resinas, de ceras e de compostos orgânicos que migram para a superfície da madeira. (Manninen et al., 2002; Sundqvist, 2004; Viitaniemi, 2001 apud Manríquez. 2012).

5.2. Alteração (perda) de massa

A Figura 36 contém os valores médios e a Tabela 3 a análise de variância e os testes de médias para a perda de massa da madeira de *Pinus elliottii* tratado termicamente.

Figura 36 - Valores médios da perda de massa da madeira (lenho adulto e juvenil) termorretificada de *Pinus elliottii*. Barras de erros correspondem ao desvio padrão.

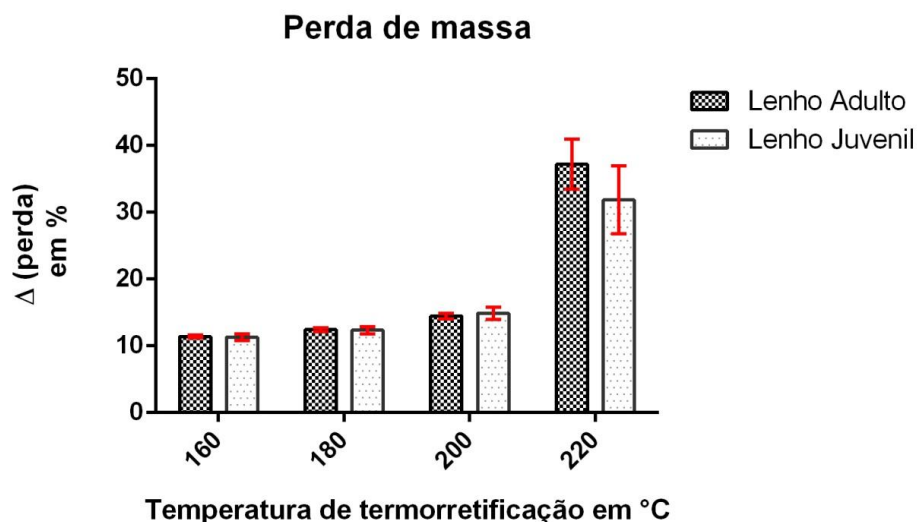


Tabela 3 - Teste de médias (Tukey) para a perda de massa.

Perda de massa		
	Médias (%)	
Tratamentos	L. Adulto	L. Juvenil
160	11,39 a, A	11,3 a, A
180	12,44 a, A	12,34 a, A
200	14,47 a, A	14,9 a, A
220	37,19 b,A	31,85 b, B

Letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha não diferem significativamente em nível de 95% de confiança.

Analisando a Figura 36 e a Tabela 3, fica evidente que todos os corpos de prova tiveram uma diminuição de suas massas, e esta diminuição foi concomitante ao aumento de temperatura do tratamento. A perda de massa obteve o seu valor crítico, e mais discrepante, para o tratamento a 220°C, onde a perda de massa dos corpos de prova, tanto do lenho juvenil quanto do lenho adulto, foi de mais de 30%. No que se refere à perda de massa entre os lenhos juvenil e adulto, ambos tiveram um comportamento muito similar.

A perda de massa foi significativa no quesito temperatura de tratamento, e com exceção do tratamento a 220°C, não teve significância para os diferentes lenhos.

É possível que estes valores tenham sido um pouco elevados visto que quando os corpos de prova foram colocados no forno para serem termorretificados, apresentavam uma umidade relativa de 12%, logo, parte do que se perdeu em massa, foi água de impregnação.

Silva (2012) comparou a perda de massa para o tratamento térmico de *Eucalyptus citriodora* e para o *Pinus taeda*, onde também verificou o aumento da perda de massa com o aumento da temperatura de tratamento, além disso, verificou que a perda era maior no eucalipto, fato que se deve à uma maior facilidade de degradação das hemiceluloses das dicotiledôneas.

Moura et al. (2012), verificaram que a perda de massa acarretava em perda de resistência mecânica, quando investigaram a termorretificação em madeira de *Eucalyptus grandis* e em *Pinus caribaea*, e os efeitos foram mais nocivos no *Eucalyptus grandis*, e a menor perda de massa do *Pinus caribaea* refletiu em menor perda de resistência mecânica frente ao tratamento térmico.

Poubel et al. (2013), analisaram a perda de massa do *Pinus caribaea* termorretificado de lenhos normal e de compressão e verificaram perdas significativas para o tratamento a 220°C, não havendo diferença entre os lenhos.

Menezes (2013) investigou a redução da massa em madeira de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* tratadas termicamente e constatou que baixas temperaturas causam menores perdas.

5.3. Verificação da massa específica aparente

Com as alterações na massa da madeira, a massa específica aparente da madeira tratada termicamente sofreu alterações, o que pode ser observado na Figura 37 e na tabela de médias para densidade aparente, na Tabela 4. A análise de

variância encontra-se presente no Apêndice 2, e apontou que tanto o lenho quanto o tratamento térmico, tiveram comportamento de influência nos resultados, sendo que o lenho apresentou uma significância maior.

Figura 37 - Densidade aparente (lenho adulto e juvenil) termorretificada de *Pinus elliottii*. Barras de erros correspondem ao desvio padrão.

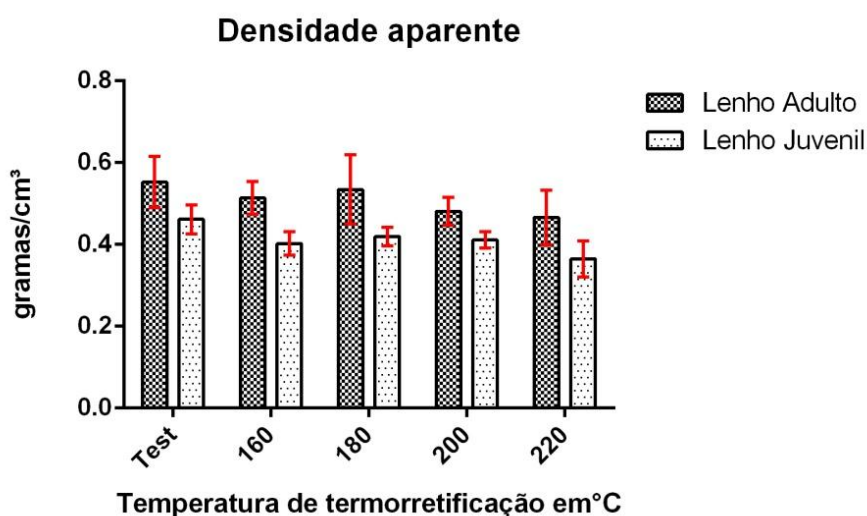


Tabela 4 - Teste de médias (Tukey) para a massa específica aparente.

Massa específica aparente		
	Médias (g/cm³)	
Tratamentos	L. Adulto	L. Juvenil
Testemunha	0,5525 a, A	0,46 a, B
160	0,5134 a, A	0,4027 a, B
180	0,5345 a, A	0,4194 a, B
200	0,4813 a, A	0,4113 a, B
220	0,4663 a, A	0,3649 a, B

Letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha não diferem significativamente em nível de 95% de confiança.

A perda de massa e a consequente perda da densidade estão relacionadas a degradação dos principais compostos químicos da madeira: hemicelulose, celulose e lignina.

Como a testemunha estava com a umidade relativa a 12%, parte da sua massa e consequentemente da sua densidade aparente, correspondem à água de impregnação, e não a material lenhoso.

De um modo geral, houve uma diminuição da densidade aparente devido ao aumento da temperatura de tratamento, o que era esperado, porém, a temperatura de 180°C, tanto o corpo de prova do lenho juvenil quanto o do adulto, apresentaram um pequeno aumento na densidade aparente, que pode ser atribuído a variabilidade natural na densidade da madeira. Burger e Richter (1991), explicam que a variação natural de massa em madeira de iguais dimensões reflete a quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume (ou a quantidade de espaços vazios nelas existentes), sendo que incrustações, conteúdos como resinas, cristais e sílica, quando em grande quantidade, podem fazer com que a massa da madeira aumente.

Silva (2012) notou um comportamento similar ao investigar madeira tratada de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus taeda*, a densidade aparente da madeira tratada termicamente a 180°C se mostrou maior do que a 200°C para ambas as espécies.

Calonego et al., (2014) analisaram os lenhos de madeira juvenil e adulta termorretrificadas de *Eucalyptus grandis*, onde constataram que a influência do tratamento térmico na madeira juvenil foi menor do que na madeira adulta, sendo que o tratamento térmico causou uma maior uniformidade das propriedades físicas de madeira juvenil e adulta.

Menezes (2013) comparou corpos de prova de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora* de testemunhas e tratados a: 140°C, 160°C e 180°C, notando um aumento na massa específica do *Eucalyptus saligna* para 140°C e 160°C, e para o *Corymbia citriodora* uma diminuição, acompanhando o decréscimo da massa.

Diante do exposto acima, pode-se verificar que os resultados obtidos apresentam a mesma tendência para a massa específica aparente quando comparados com demais estudos realizados.

5.4. Verificação da rugosidade

A rugosidade foi avaliada antes e depois do tratamento térmico, não apresentando nenhum comportamento padrão durante a verificação dos parâmetros R_A , R_Y e R_Z , sendo que durante a verificação, algumas tomadas de medidas foram inviabilizadas por acusarem erro no rugosímetro. Os valores verificados encontram-se na Tabela do Apêndice 3.

Como o método utilizado não foi capaz de avaliar a rugosidade, nada se pode afirmar sobre a relação de melhoria ou piora da superfície após tratamento térmico.

5.5. Verificação da Dureza Janka

Analisando-se o efeito dos tratamentos na dureza Janka, na face longitudinal tangencial, observou-se que as madeiras termorretificadas tiveram diferentes comportamentos, o que pode ser observado na Figura 38. Araújo (2010), que investigou a dureza Janka para peças tratadas de *Eucalyptus grandis*, *Bracatinga*, *Peroba mica*, *Eucalyptus sp.* e *Cumarú*, observou esse comportamento (sem padrão).

Figura 38 - Dureza Janka (lenho adulto e juvenil) termorretificada de *Pinus elliottii*. Barras de erros correspondem ao desvio padrão.

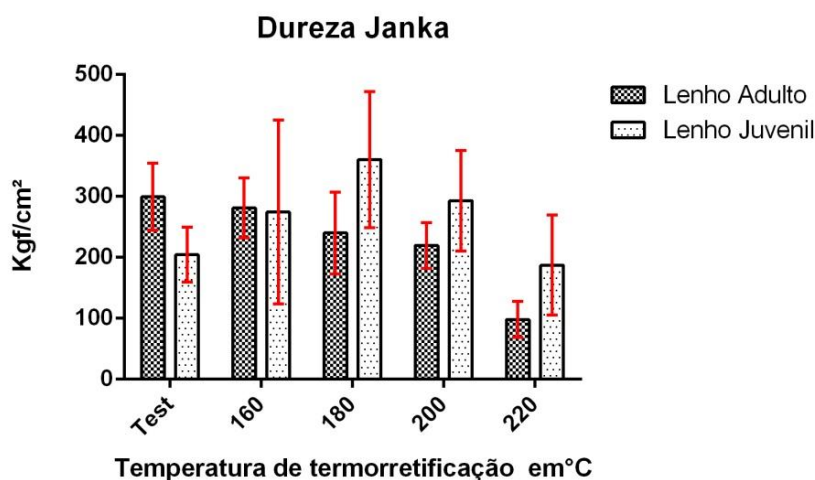


Tabela 5 - Teste de médias (Tukey) para a dureza janka.

Dureza Janka		
	Médias (Kg/cm²)	
Tratamentos	L. Adulto	L. Juvenil
Testemunha	299,3 a, A	204,6 a, A
160	281 a, A	274,5 a, A
180	240 a, A	360,5 a, A
200	219,7 a, A	293,1 a, A
220	98,22 b, A	187,4 b, A

Letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha não diferem significativamente em nível de 95% de confiança.

Na tabela da ANOVA para a dureza Janka, localizada no Apêndice 2, aponta-se que a significância dos resultados encontra-se na temperatura do tratamento.

Observando-se a Figura 38 e a Tabela 5, é possível observar uma tendência na redução da dureza Janka, com o aumento da temperatura do tratamento, para os corpos de prova referentes ao lenho adulto. O valor da dureza Janka, quando compara-se as testemunhas do lenho adulto e juvenil, é maior para o lenho adulto, porém a partir da temperatura de tratamento de 160°C esses valores ficam muito próximos, chegando a se inverter a partir do tratamento a 180°C.

Sundqvist (2004) apud Araújo (2010), observou que com relação à dureza de madeiras termicamente tratadas é possível que as mesmas passem a apresentar um valor mais elevado, assim como pode ocorrer para a resistência mecânica, pois podem ocorrer processos de condensação da lignina e da celulose como moléculas degradadas, podendo formar novas ligações químicas.

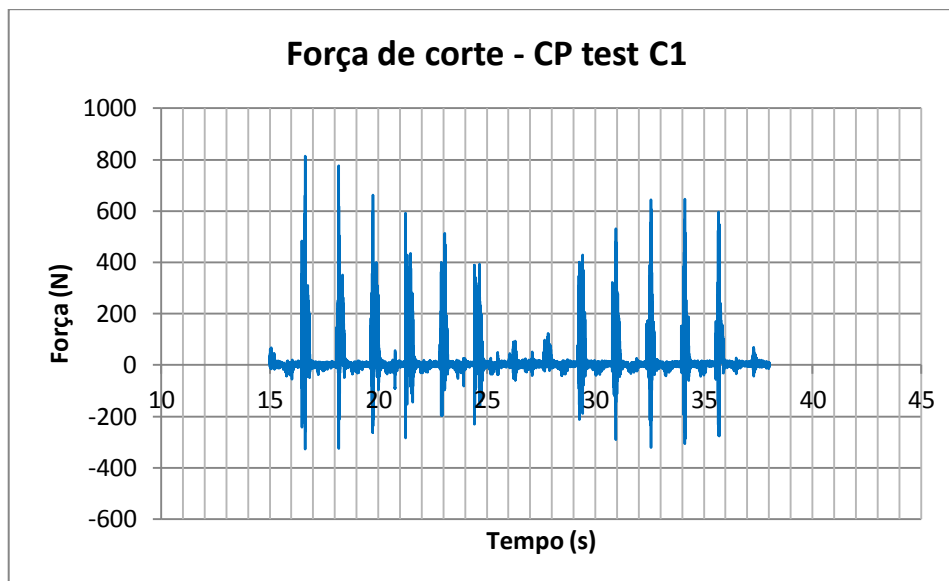
Bakar et al. (2013), avaliaram a dureza das espécies *Quercus rubra* (carvalho vermelho), *Juniperus virginiana* (cedro vermelho) e *Hevea brasiliensis* (seringueira) termorretificadas a 120°C e 190°C por 2h e por 8h e observaram que em geral a dureza teve o seu valor diminuído com o tratamento, sendo o 190°C por 8h o mais severo. A espécie *Quercus rubra* apresentou um valor 33,3% menor do que o valor da amostra controle (sem tratamento). As espécies *Hevea brasiliensis* e *Juniperus virginiana* apresentaram esmagamento e rachaduras devido à compressão durante o ensaio, fatores que podem estar relacionados, segundo os autores, ao aumento da fragilidade devido à modificação química na parede celular devido ao tratamento térmico.

Priadi e Hiziroglu (2013) estudaram as espécies *Melia azedarch* L. (cinamomo), *Swietenia macrophylla* (Mogno), *Quercus falcate Michx* (carvalho espanhol) e *Pinus taeda* L. a 130°C e 200°C por 2h e 8h. No que diz respeito à dureza Janka, foi observado que a espécie *Pinus taeda* L. não apresentou diferenças estatísticas em sua dureza quando teve comparado suas amostras tratadas e não tratadas, resultado atribuído a sua baixa massa específica. Porém as demais espécies apresentaram para o tratamento a 200°C por 8h uma redução na dureza Janka de: 42,7% para a *Quercus falcate Michx*, 20% para a *Swietenia macrophylla* e 17,3% para a *Melia azedarch* L..

5.6. Força de corte

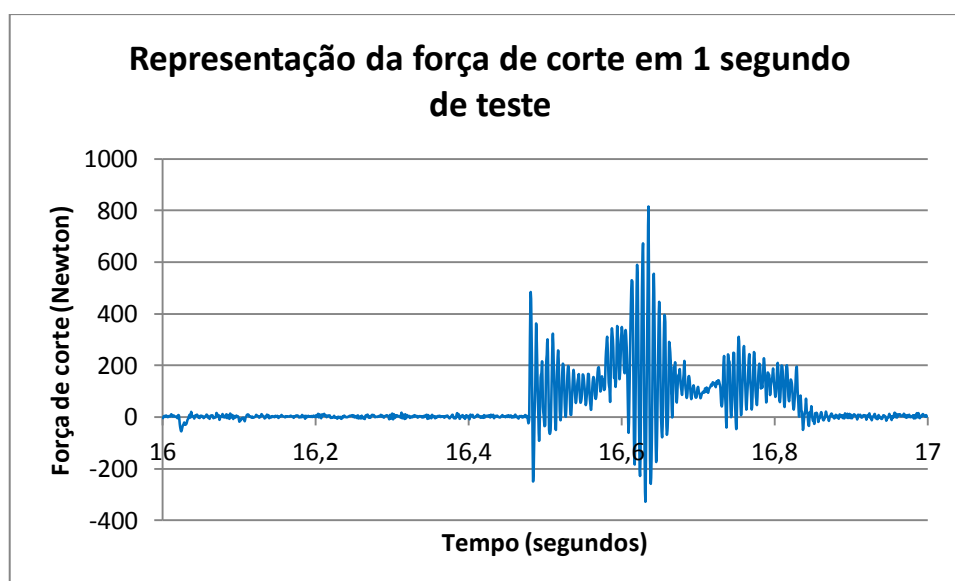
Os arquivos com os dados brutos dos ensaios foram processados de forma a obter a curva de comportamento da força de corte. Conforme pode ser observado na Figura 39, nota-se que cada ensaio dura cerca de vinte segundos.

Figura 39 - Representação da força de corte durante o ensaio do corpo de prova testemunha relativo ao lenho adulto.



A Figura 40 mostra o comportamento da força de corte, representando o intervalo 16-17s da figura anterior. Os valores próximos de zero são aqueles em que a ferramenta não está efetuando a remoção de material.

Figura 40 - Representação da força de corte durante um ciclo de corte.



O processamento dos dados obtidos deu-se da seguinte forma: como o primeiro corte é o de ajuste, foi desconsiderado (como por exemplo o pertencente ao intervalo 16-17s da Figura 36), escolheu-se então resultados de outros sete cortes (intervalos: 18-19s; 19-20s; 21-22s; 22,5-23,5s; 24-25s; 29-30s; 32-33s, por exemplo), desprezando-se valores muito pequenos (por exemplo os intervalos 26-27s e 27-28s). Após a escolha das sete curvas de cada ensaio, foi selecionado o segundo maior valor de força de corte (de cada um dos sete cortes por corpo de prova), foi realizada a média, logo, cada corpo de prova tem um único valor de força de corte atribuído a ele.

No Apêndice 1 podem ser observadas as curvas obtidas durante os 50 ensaios de usinagem. Já na Figura 41 e na Tabela 6 encontram-se os dados gerados pelo processamento dessas curvas.

Figura 41 - Força de corte desenvolvida durante o processo de usinagem (lenho adulto e juvenil) termorretificada de *Pinus elliottii*. Barras de erros correspondem ao desvio padrão.

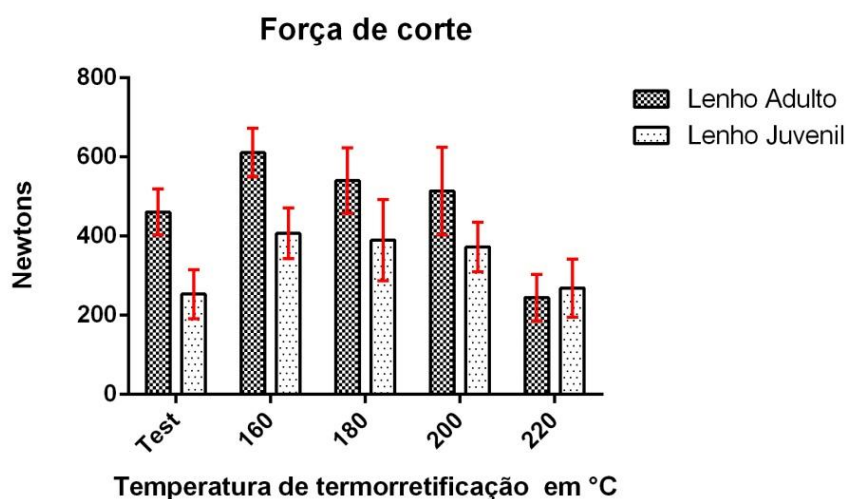


Tabela 6 - Teste de médias (Tukey) para a força de corte.

Força de corte		
	Médias (N)	
Tratamentos	L. Adulto	L. Juvenil
Testemunha	461,2 b, A	253,4 b, B
160	610,9 a, A	407 a, B
180	540,1 a, A	390,1 a, B
200	514,4 a, A	372,9 a, B
220	244,9 c, A	268,7 b, A

Letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha não diferem significativamente em nível de 95% de confiança.

Conforme mostrado na Figura 41 e na Tabela 6, a força de corte para corpos de prova termorretificados tem uma elevação em seu valor quando comparados a testemunha, com exceção aos corpos de prova tratados a 220°C, que foram degradados em demasia. Observa-se que a força de corte requerida na usinagem de corpos de prova provindos no lenho juvenil, com exceção dos tratados a 220°C, são relativamente menores do que as requeridas para a usinagem do lenho adulto.

Observando-se a Tabela 6 e a tabela de ANOVA para a força de corte no Apêndice 2, é possível afirmar que os lenhos, o tratamento e a interação lenho x tratamento tem influência nos resultados, sendo a significância do lenho e do tratamento maior do que a da interação lenho x tratamento.

Os corpos de prova testemunhas encontravam-se com umidade relativa de 12%, possibilitando um maior espaçamento entre suas “fibras” (conforme a Figura 8, em Revisão Bibliográfica), que é o que pode explicar um valor menor de força de corte quando comparada as madeiras tratadas a 160°C, 180° e 200°C, e ao perder esse espaçamento, aumenta-se a força de corte. A força de corte diminuiu no tratamento a 220°C devido a elevada degradação sofrida pelo mesmo durante o processo de termorretificação.

Nota-se uma elevada variação da força de corte durante o processo, variação tal que pode ser explicada pela anisotropia da madeira, pela passagem da

ferramenta em diferentes lenhos (inicial e tardio) e pela possível presença de sílica e/ou extrativos.

Na Figura 42 e na Figura 43 podem ser observados os cavacos gerados durante o processo de usinagem. Nota-se uma elevada diferença entre os cavacos de acordo com o tratamento térmico adotado, enquanto que os cavacos gerados pela testemunha e pelo tratamento a 160°C podem ser classificados como sendo predominantemente do tipo II, os gerados pelo tratamento a 180°C são predominantemente do tipo III, e os gerados pelos tratamentos a 200°C e a 220°C são do tipo I.

Figura 42 – Cavacos formados pelos corpos de prova do lenho adulto: testemunha (A), 160°C (B), 180°C (C), 200°C (D) e 220°C (E).



Figura 43 - Cavacos formados pelos corpos de prova do lenho juvenil: testemunha (A), 160°C (B), 180°C (C), 200°C (D) e 220°C (E).



5.7. Análise de espectrometria por infravermelho (FTIR)

Os resultados da espectroscopia por infravermelho estão representados na Figura 44 para o lenho adulto, e na Figura 45 para o lenho juvenil.

Os espectros estão apresentados entre 1800 e 600 cm^{-1} , visto que este é o intervalo considerado como sendo a identidade da madeira, onde se concentram as principais modificações nos compostos presentes na estrutura da mesma.

Figura 44 - FTIR para madeiras testemunha e termorretificadas do lenho adulto.

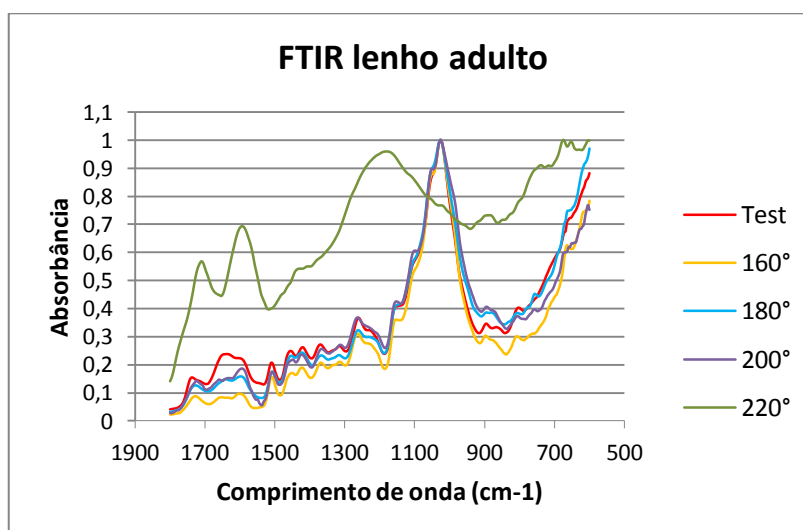
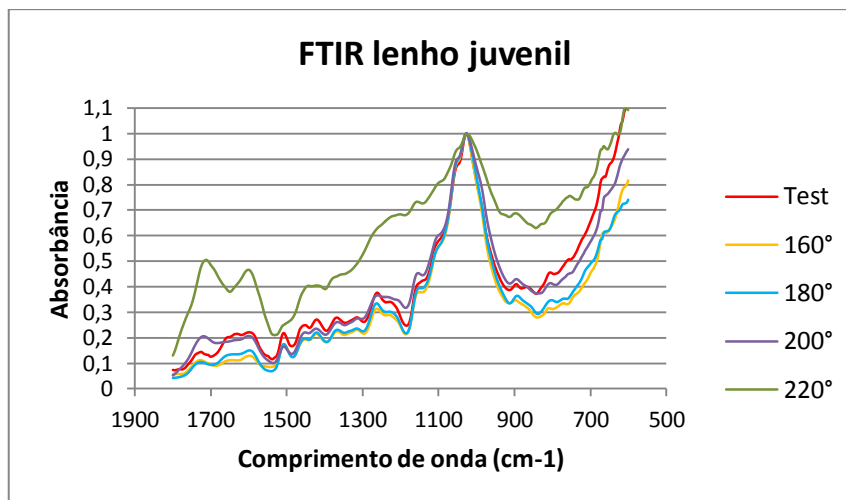


Figura 45 - FTIR para madeiras testemunha e termorretificadas do lenho juvenil.



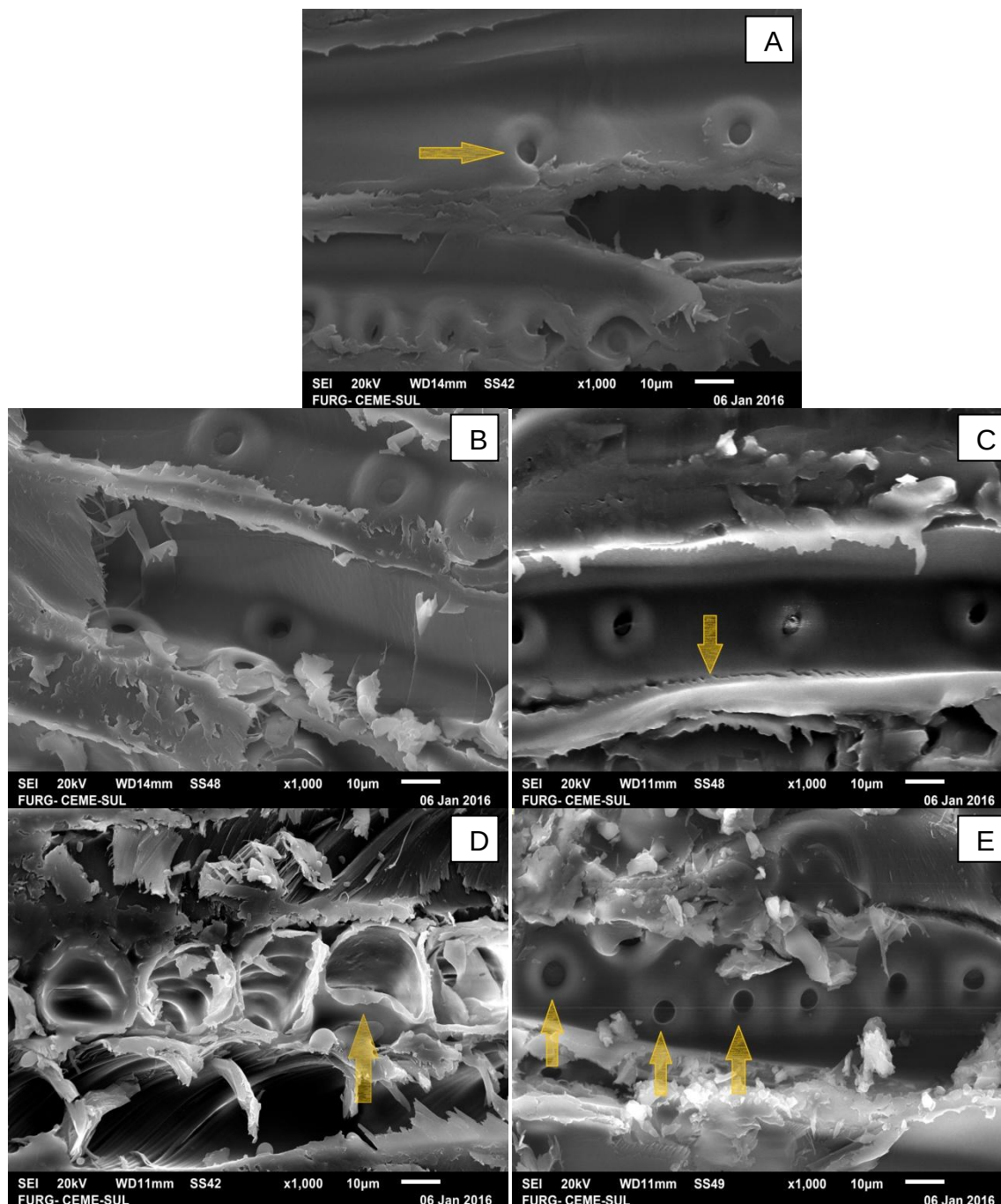
A madeira de ambos os lenhos apresentaram comportamentos semelhantes, ambas sofreram modificações na estrutura química quando comparadas a testemunha (sem tratamento). De uma maneira geral, o perfil da curva foi mantido, exceto para o tratamento a 220°C, onde os corpos de prova experimentaram uma degradação excessiva.

Cademartori (2012), realizou a análise de espectroscopia no infravermelho por reflectância total atenuada (ATR-IR) para os corpos de prova testemunhas e termorretificados a 180°C, 200°C, 220°C e 240°C das espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*, onde foi observado que a madeira das três espécies apresentou um comportamento semelhante quanto à modificação dos picos referentes aos componentes químicos em função da termorretificação realizada e que em geral, quando comparadas a testemunha, os corpos de prova apresentavam leves deslocamentos dos picos característicos e porém o perfil das curvas manteve-se igual.

5.8. Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

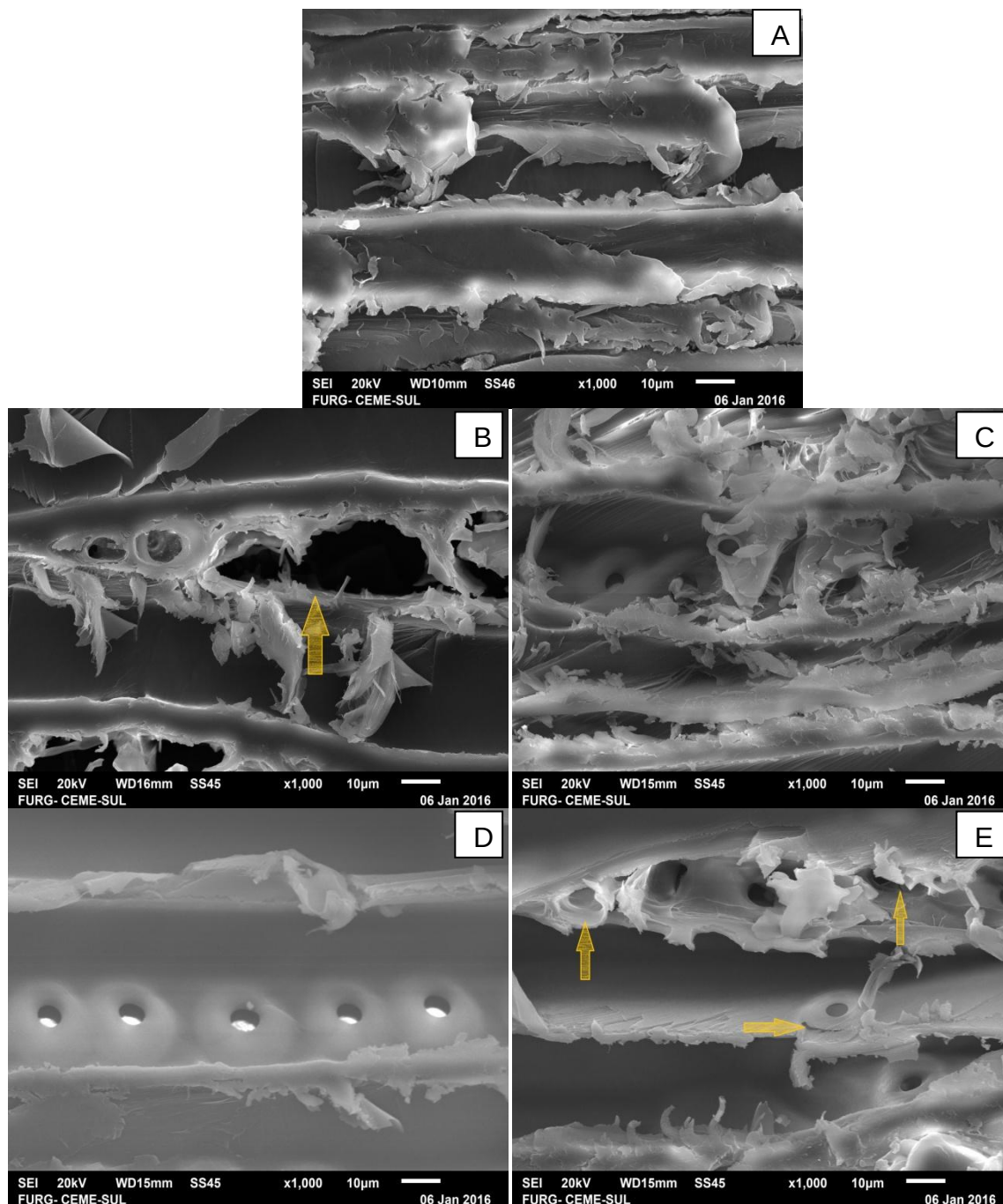
A análise realizada em MEV encontram-se nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 - MEV, corpos de prova do lenho juvenil termorretrificados: testemunha (A), 160°C (B), 180°C (C), 200°C (D) e 220°C (E).



Na Figura 46 é possível notar uma pontuação areolada no traqueíde de um corpo de prova não termorretrificado em (A), rachadura no traqueíde em (C), deformação nos raios em (D) e deformação (“murchamento” na câmara) da pontuação areolada em (E).

Figura 47 - MEV, corpos de prova do lenho adulto termorretificados: testemunha (A), 160°C (B), 180°C (C), 200°C (D) e 220°C (E).



Na Figura 47, é possível observar uma: destruição dos raios em (B) e destruição dos raios e presença de rachaduras em (E). Logo, concluí-se que o tratamento térmico é capaz de alterar a anatomia da madeira.

Bakar et al. (2013), avaliaram a dureza das espécies *Quercus rubra* (carvalho vermelho), *Juniperus virginiana* (cedro vermelho) e *Hevea brasiliensis* (seringueira) termorretificadas a 120°C e 190°C por 2h e por 8h observaram compressão, deformação e colapso da parede celular.

Priadi e Hiziroglu (2013) em análise de MEV para as espécies *Melia azedarch* L.(cinamomo), *Quercus falcata Michx* (carvalho espanhol) a 200°C por 8h, observaram danos na parede celular da *Melia azedarch* e embora as paredes do *Quercus falcata Michx* estarem inteiras, haviam rachaduras e distorções em algumas partes da amostra.

Awoyemi e Jones (2010) investigaram a espécie *Thuja plicata* (cedro vermelho) termorretificada a 220°C por 1h e 2h, e quando analisados em MEV observaram destruição das paredes dos traqueídeos, e que os tecidos dos raios pareciam ter “explodido”, enquanto que os toros das pontoações areoladas “murcharam”, o que aumentou o tamanho dos pites, criando mais aberturas na madeira. Os autores acreditam que as mudanças causadas pela termorretificação são maiores na química do que na anatomia da madeira.

6. CONCLUSÕES

Através do exposto, concluí- se que:

- O processo de termorretificação causa uma alteração na coloração da madeira, quanto maior a temperatura, maior é o escurecimento da madeira;
- Todos os corpos de prova, independentemente da temperatura do tratamento térmico apresentaram perda em suas massas, sendo que quanto maior a temperatura, maior foi a perda;
- Ao contrário da massa, que diminuiu após o tratamento térmico, nem sempre a massa específica teve o mesmo comportamento. O mesmo ocorreu para a dureza Janka;
- Elevadas temperaturas de termorretificação descaracterizam a composição química da madeira;
- A força de corte requerida para o processo de usinagem, foi maior para os corpos de prova tratados do que para os não tratados, comportamento notado tanto para o lenho juvenil quanto para o adulto, exceto para o corpo de prova que foi degradado na temperatura de 220°C;
- A natureza anisotrópica da madeira faz com que haja uma significativa variação no valor da força de corte durante o processo de usinagem;
- A mudança provocada no tratamento térmico alterou a formação do cavaco durante o processo de usinagem;
- A medição de rugosidade antes e depois do tratamento térmico não foi conclusiva;
- A análise por microscopia de varredura eletrônica não conseguiu informar se houve mudança na estrutura da madeira após os tratamentos térmicos;
- O tratamento térmico a 220°C por quatro horas se mostrou inadequado.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Investigar a termorreificação às mesmas temperaturas, porém por tempos menores;
2. Investigar a variação da termorreificação na profundidade da madeira, para entender se a mesma ocorre de forma uniforme;
3. Realizar os testes com madeiras provindas de árvores que passaram pelo processo de “resinagem”;
4. Investigar a termorreificação em termos de qualidade superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Citadas

ABNT NBR 6175. **Processos Mecânicos de Usinagem**. 1971.

ABNT NBR 7190. **Projetos de estrutura de Madeira**. 1997.

ANJOS, Fábio Pereira dos. **Efeitos da termorreificação nas propriedades físicas de três espécies madeireiras da Amazônia**. Dissertação - Mestrado em Ciências Florestais - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2014.

APA, **Engineered Wood Handbook**. Ed. McGrall Hill, United States of America, 2002.

ARAÚJO, Solange de Oliveira. **Propriedades da madeiras termorreificadas**. Tese – Doutorado em Ciência Florestal - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ASTM D143. **Standard test methods for Small Clear Specimens of Timber**. 2009.

ASTM D1666. **Standard test methods for conducting machining testes of wood and wood-base panel materials**. 2011.

AWOYEMI, L.; JONES, I. P. **Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment**. Springer Wood Sci Technol, 2011. Vol. 45, p. 261 – 267.

BAKAR, Balkis Fatomer A.; HIZIROGLU, Salim; TAHIR, Paridah Md. **Properties of some thermally modified wood species**. Elsevier Materials and Design, 2013. Vol. 43, p. 348 – 355.

BURGER, Luiza Maria; RICHTER, Hans Georg. **Anatomia da Madeira**. Ed. Nobel, São Paulo - SP. 1991.

CADEMARTORI, Pedro Henrique Gonzalez de. **Propriedades tecnológicas da madeira termorretificada de três espécies de *Eucalyptus***. Dissertação – Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

CADEMARTORI, Pedro Henrique G. de; MISSIO, André L.; MATTOS, Bruno D.; GATTO, Darci A. **Effect of thermal treatments on technological properties of wood from two *Eucalyptus* species**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2015. Vol. 87(1) p. 471-481.

CALONEGO, Fred Willians; SEVERO, Elias Taylor Durgante; LATORRACA, João Vicente de Figueiredo. **Effect of Thermal Modification on the Physical Properties of Juvenile and Mature Woods of *Eucalyptus grandis***. Revista Floram, 2014. Vol. 21(1), p. 108-113.

COLENCI, Roberto Antônio; BALLARIN, Adriano Wagner. **Utilização de dureza brinell na avaliação de resistência mecânica de madeiras**. Revista Energia na Agricultura, 2008. Vol. 23, p. 88-99.

CUTLER, David F.; BOTHA, Ted; STEVENSON, Dennis Wm. **Anatomia vegetal : uma abordagem aplicada**. Ed. Artmed, Porto Alegre – RS, 2011.

DELUCIS, Rafael de Avila; GATTO, Darci Alberto; CADEMARTORI, Pedro Henrique Gonzalez de; MISSIO, André Luiz; SCHNEID, Eduardo. **Propriedades Físicas da Madeira Termorretificada de Quatro Folhosas**. Revista FLORAM, 2014. Vol. 21(1), p. 99-107.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Ed. mm, São Paulo-SP, 1999.

ESTEVES, Bruno M.; PEREIRA, Helena M. **WOOD MODIFICATION BY HEAT TREATMENT: A REVIEW**. BioResources, 2009. Vol. 4 (1), p. 370 – 404.

EXLEY, R.R; BUTTERFIELD, B. G.; MEYLAN B. A. **Preparation of wood specimens for the scanning electron microscope**. Journal of Microscopy, 1974. Vol. 101, p. 21-30.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Ed. Edgar Blucher, São Paulo-SP, 1995.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. . 2010 Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

FRANZ, Norman C. **An Analysis of Chip Formation Wood Machining**. Meeting of Great Lakes Section, Grand Rapids - Mich, 1954.

GÜTHS, William Gamino; DELUCIS, Rafael de Ávila; BELTRAME, Rafael; GATTO, Darci Alberto. **Efeitos do tempo e temperatura de termorreificação na degradação térmica da madeira de *Eucalyptus botryoides***. XVI ENPOS (Encontro de pós graduação), Universidade Federal de Pelotas, 2014.

HILL, Callum A.S. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. Ed. John Wiley & Sons, Chichester - England. 2006.

HOADLEY, R. Bruce. **Understanding wood – a craftsman's guide to wood technology**. Ed. The Taunton Press, Newtown - United States of America, 2000.

JOLY, Aylthon Brandão. **Botânica : introdução a taxonomia vegetal**. Ed. Nacional, São Paulo, 1983.

JUDD, W.S; CAMPBELL, C.S.; KELLOG, E.A.; STEVENS, P.F.; DONOGHUE, M.J. **Sistemática vegetal : um enfoque filogenético**. Ed. Artmed, Porto Alegre - RS, 2009.

LUCAS FILHO, Fernando Cardoso. **Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**. Tese - Doutorado em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da usinagem dos materiais** . Ed. Blücher, São Paulo-SP, 2009.

MANRÍQUEZ FIGUEROA, Manuel Jesús. **Coeficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura**. Tese - Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MARCHIORI, Jose Newton Cardoso. **Dendrologia das gimnospermas**. Ed. da UFSM, Santa Maria, 1996.

MARTINS, Sabrina Andrade; FERRAZ, Joana Mendes; SANTOS, Cristiane Moreira Tavares dos; MENEZZI, Cláudio Henrique Soares Del; SOUZA, Mário Rabelo de. **Efeito da usinagem na rugosidade da superfície da madeira de *Eucalyptus benthamii***. Revista FLORAM, 2011. Vol. 18(2), p. 135-143.

MENEZES, Waldir Marques de. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades físico mecânicas da madeira de *Corymbia* e *Eucalyptus saligna***. Dissertação – Mestrado em Engenharia Florestal –Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MOURA, Luiz Fernando de; BRITO, José Otávio; BORTOLETTO JÚNIOR, Geraldo. **Efeitos da termorreificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. Revista FLORESTA, 2012. Vol. 42 (2), p. 305 – 314.

NÉRI, Antônio Carlos. **Parâmetros de corte na usinagem de madeiras de reflorestamento**. Tese – Doutorado em Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

POUBEL, Dallyene da Silva; GARCIA, Rosilei Aparecida; SANTOS, Wanessa Aparecida dos; OLIVEIRA, Gisely de Lima; ABREU, Heber dos Santos. **Efeito da termorreificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea***. Cerne, 2013. Vol. 19 (3), p. 391-398.

PRIADI, Trisna; HIZIROGLU, Salim. **Characterization of eat treated wood species**. Elsevier Materials and Design, 2013. Vol. 49, pg. 575 – 582.

SILVA, Marcio Rogério. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalipto citriodora***

e *Pinus taeda*. Tese – Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte I**. Ed. da UFSC, Florianópolis- SC, 1995.

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K. **Metal cutting**. Ed.Butterworth-Heinemann, Woburn – MA, 2000.

ZANUNCIO, Antônio José Vinha; FARIAS, Elias de Sá; SILVEIRA, Teodorico Alves da. **Termorreificação e Colorimetria da Madeira de *Eucalyptus grandis***. Revista Floram, 2014. Vol. 21(1), p. 85-90.

- **Consultadas**

DELUCIS, Rafael de Avila; STANGERLIN, Diego Martins; TREVISAN, Rômulo; BELTRAME, Rafael; PERES, Matheus Lemos. **Dureza janka da madeira de duas folhosas**. I Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira (CBCM) - III Simpósio de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio de Janeiro (SIMADERJ), 2013.

EOM, Young Geun; KWON, Ohkyung; HANNA, Robert B; MEYER, Robert W. **Wall sculpturing in vessel elements of juglans species of the united states**. IAWA Journal, 2008. Vol. 29 (2), p. 153–160.

EYMAA, Florent; MÉAUSOONE, Pierre-Jean; MARTIN, Patrick. **Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process**. Journal of Materials Processing Technology, 2004. Vol. 148, p. 220–225.

KILIC, Murat; HIZIROGLU, Salim; BURDURLU, Erol. **Effect of machining on surface roughnes of Wood**. ELSEVIER Building and Environment, 2006. Vol. 41,p. 1074-1078.

KÜES, Ursula. **Wood Production, Wood Technology, and Biotechnological Impacts**. Universitätsverlag Göttingen, 2007.

MALKOÇOĞLU, A. **Machining properties and surface roughness of various wood species planed in different conditions.** ELSEVIER Building and Environment, 2007. Vol. 42, p. 2562-2567.

NENNEWITZ, Ingo; NUTSCH, Wolfgang; PESCHEL, Peter; SEIFERT, Gerhard. **Manual de tecnologia da Madeira.** Ed. Blucher, 2011.

POLETTTO, Matheus; ZATTERA, Ademir J.; SANTANA, Ruth M. C. **Structural Differences Between Wood Species: Evidence from Chemical Composition, FTIR Spectroscopy, and Thermogravimetric Analysis.** Journal of Applied Polymer Science, 2012. Vol. 126, p. 336–343

PORANKIEWICZ, B.; GOLI, G. **Cutting forces by Oak and Douglas fir machining.** Maderas, Ciencia y tecnologia, 2014. Vol. 16, nº2, p. 199 – 216.

SCHNEID, E.; CADEMARTORI, P.H.G; GATTO, D. **The effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of Luehea divaricata hardwood.** Maderas, Ciencia y tecnologia. 2014. Vol. 16, nº4, p. 413 – 422.

ZHONG, Z.W.; HIZIROGLU, Salim; CHAN, C.T.M. **Measurement of the surface roughness of wood based materials used in furniture manufacture.** ELSEVIER Measurement, 2013. Vol. 46, p. 1482-1487.

APÊNDICES

- 1 - Forças de corte
- 2 - Análise estatística
- 3 - Rugosidade
- 4 - Relação Massa específica aparente x Força de corte x Dureza Janka

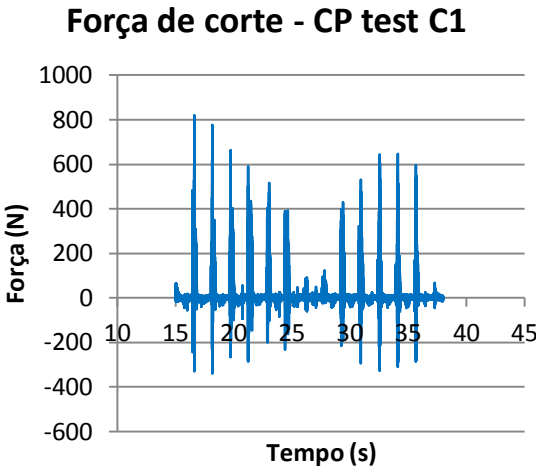
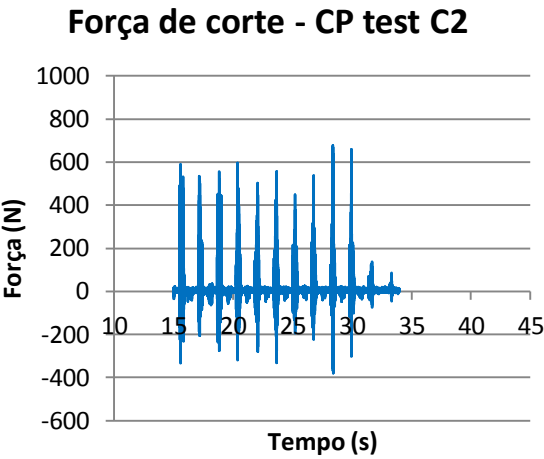
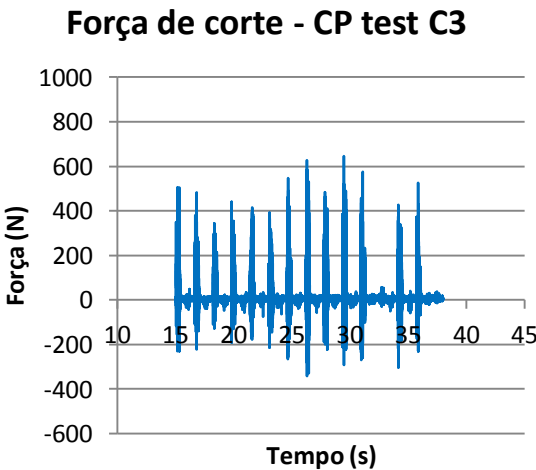
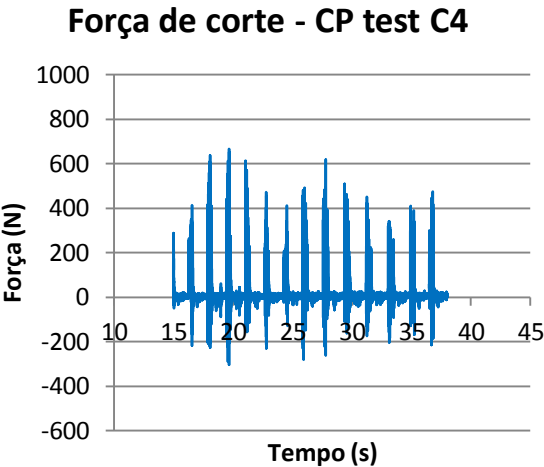
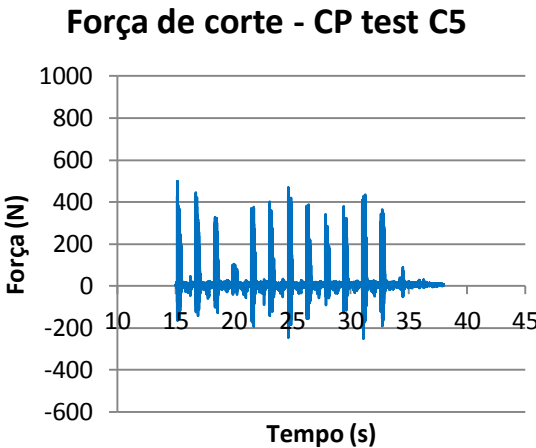
ANEXOS

- 1 - Características do *Pinus elliottii*
- 2 - Especificação de máquinas e equipamentos
- 3 - Imagens diversas

APÊNDICE 1
Forças de corte

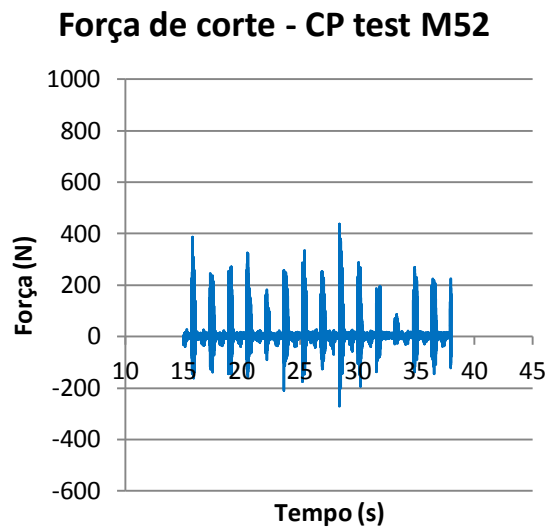
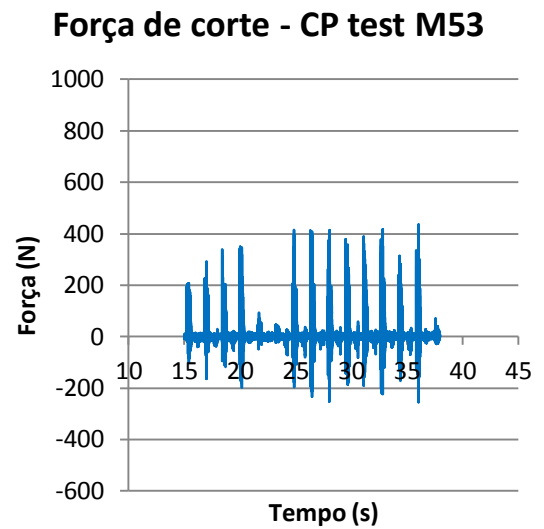
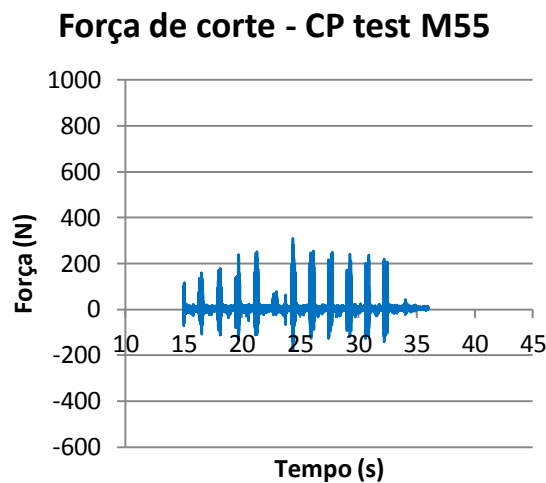
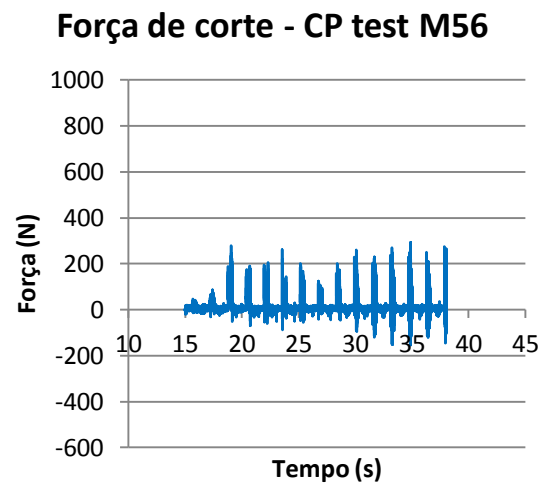
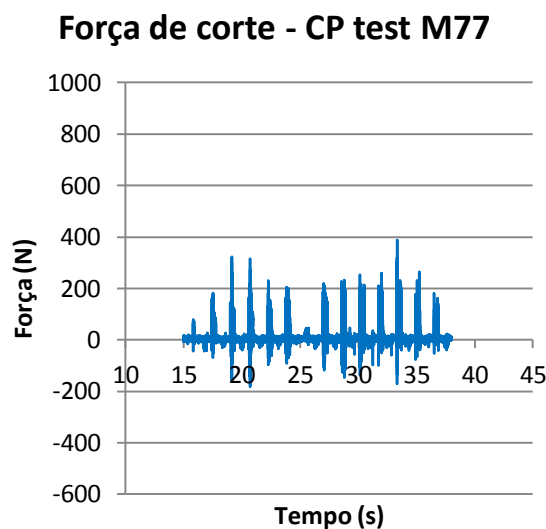
Tratamento térmico: testemunha

Corpos de prova: lenho adulto



Tratamento térmico: testemunha

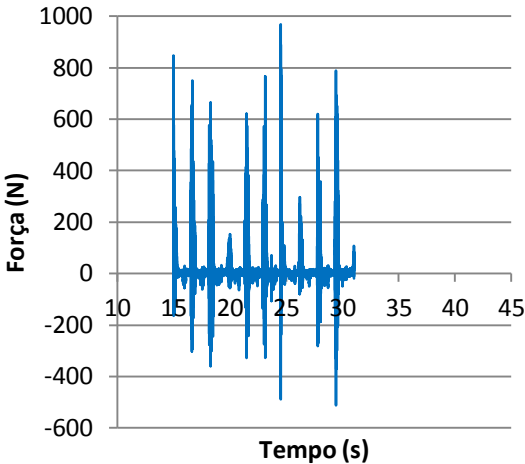
Corpos de prova: lenho juvenil



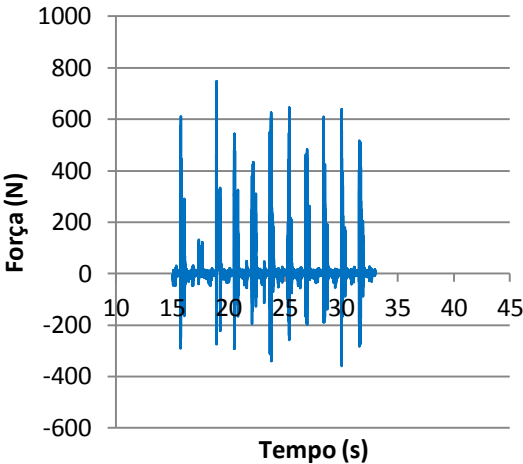
Tratamento térmico: 160°C

Corpos de prova: lenho adulto

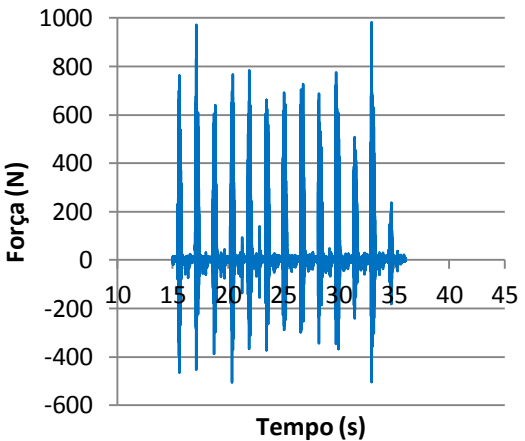
Força de corte - CP 160 C29



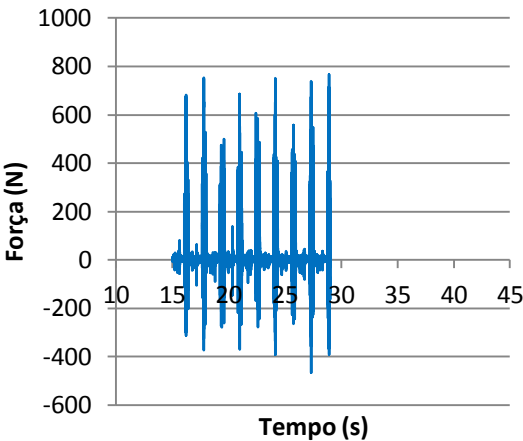
Força de corte - CP 160 C31



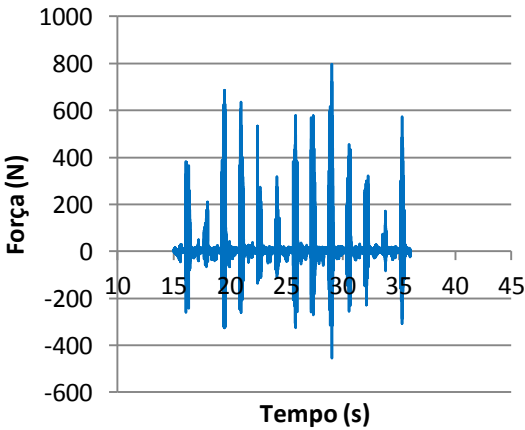
Força de corte - CP 160 C32



Força de corte - CP 160 C33

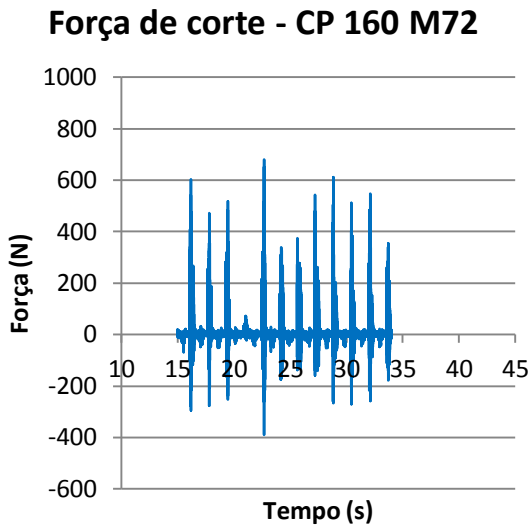
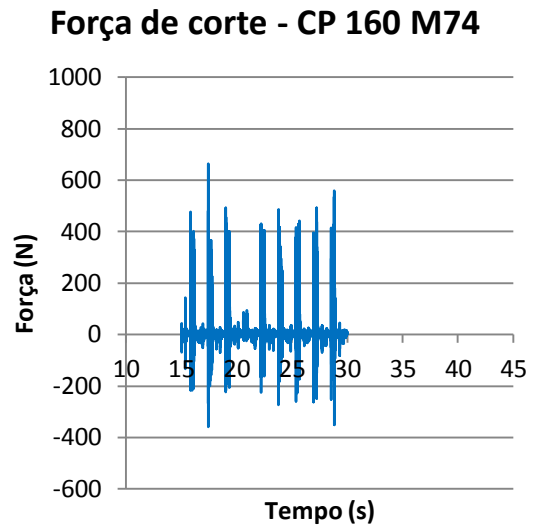
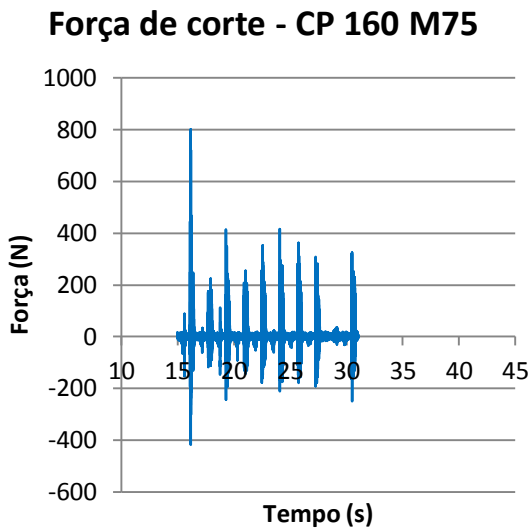
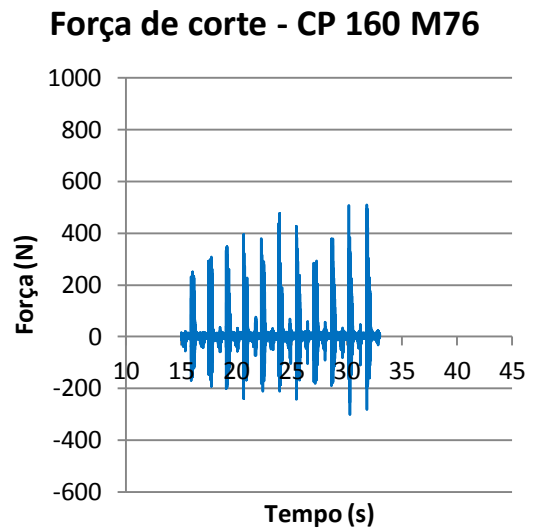
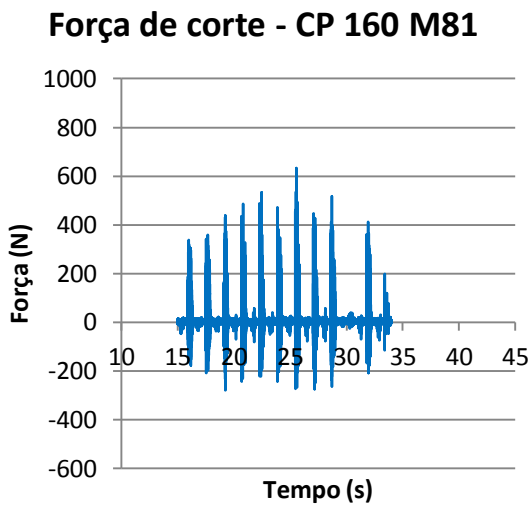


Força de corte - CP 160 C35



Tratamento térmico: 160°C

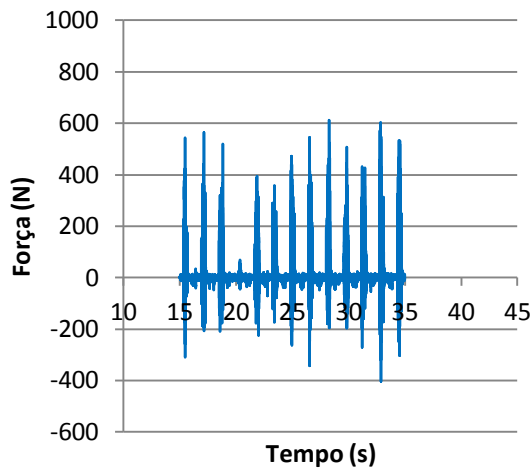
Corpos de prova: lenho juvenil



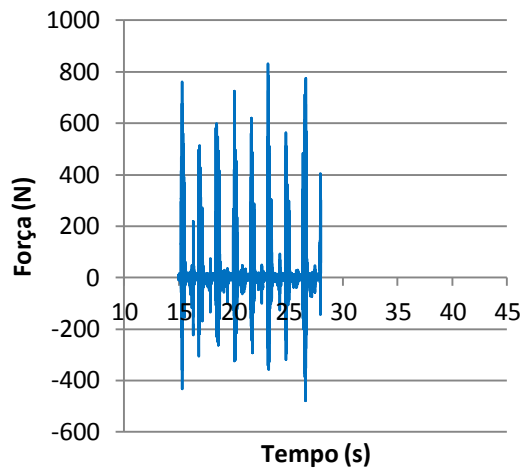
Tratamento térmico: 180°C

Corpos de prova: lenho adulto

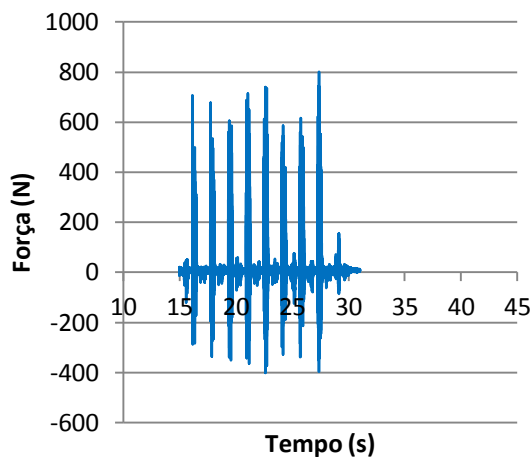
Força de corte - CP 180 C8



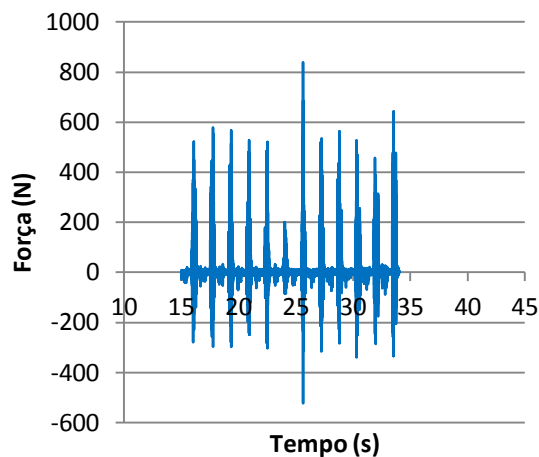
Força de corte - CP 180 C9



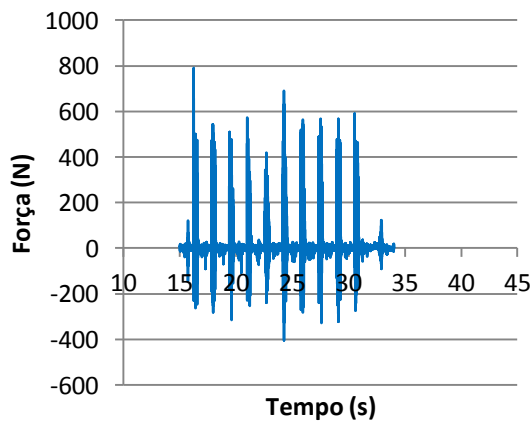
Força de corte - CP 180 C10



Força de corte - CP 180 C11

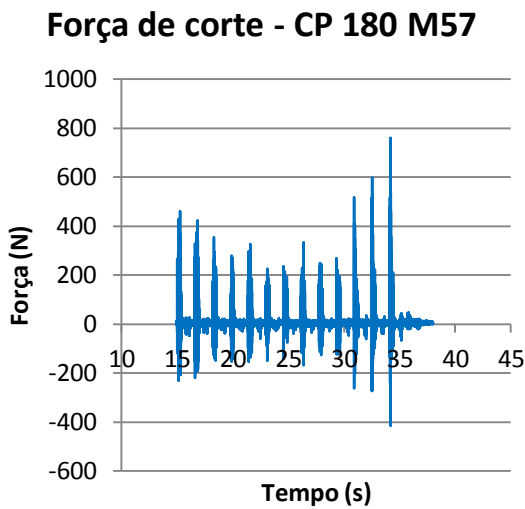
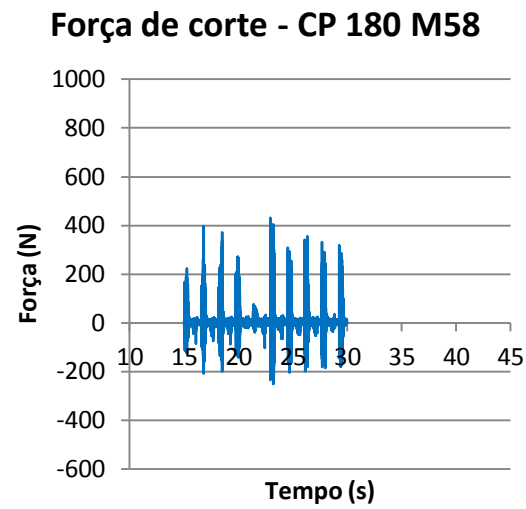
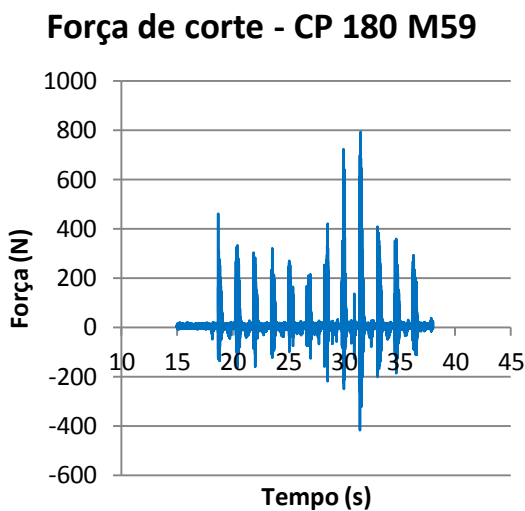
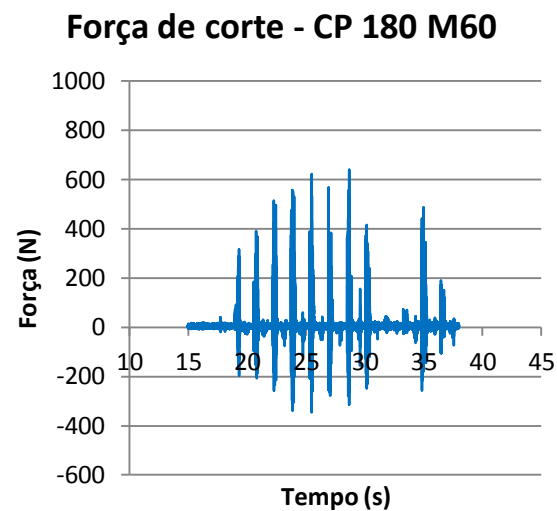
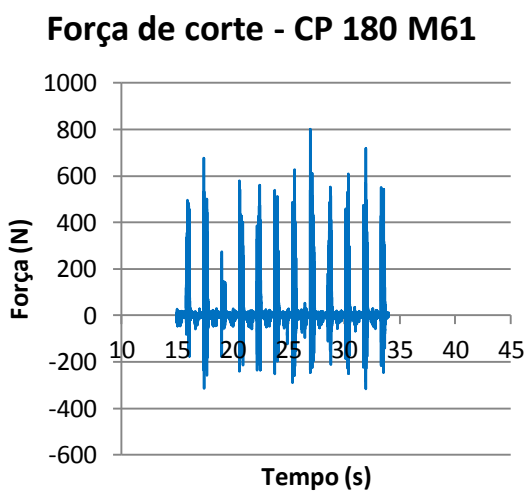


Força de corte - CP 180 M14



Tratamento térmico: 180°C

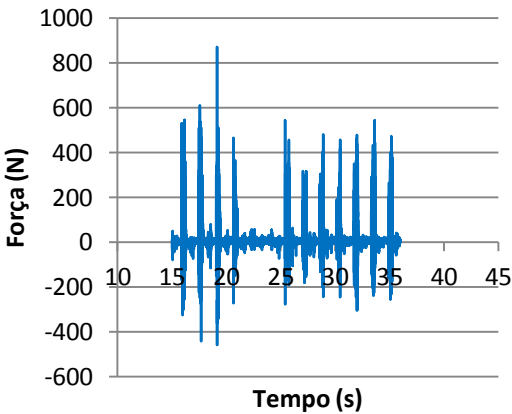
Corpos de prova: lenho juvenil



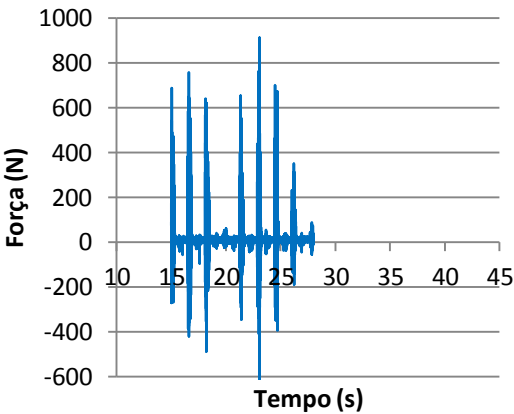
Tratamento térmico: 200°C

Corpos de prova: lenho adulto

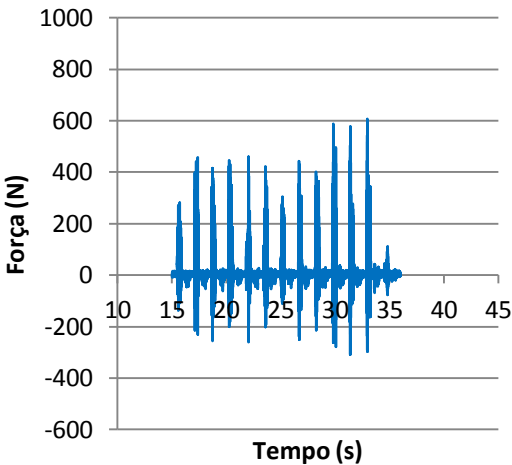
Força de corte - CP 200 C15



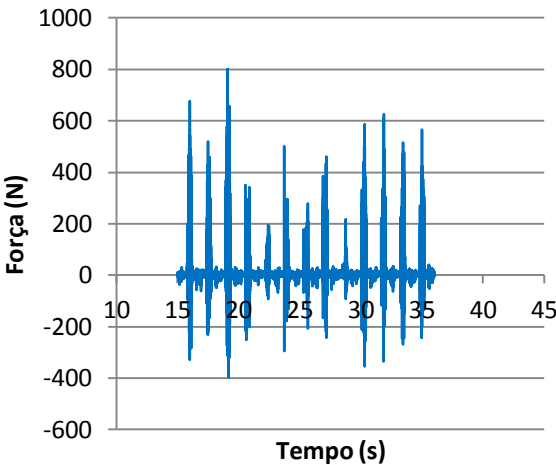
Força de corte - CP 200 C16



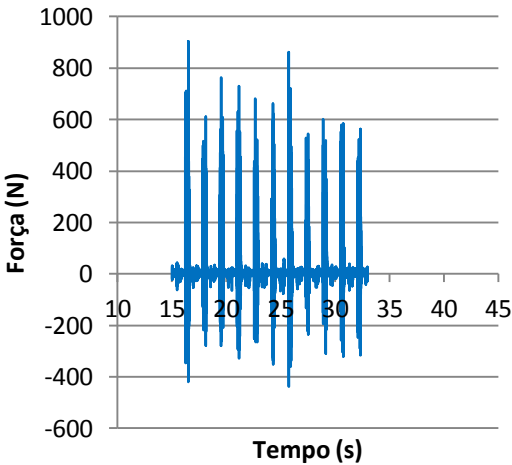
Força de corte - CP 200 C17



Força de corte - CP 200 C19

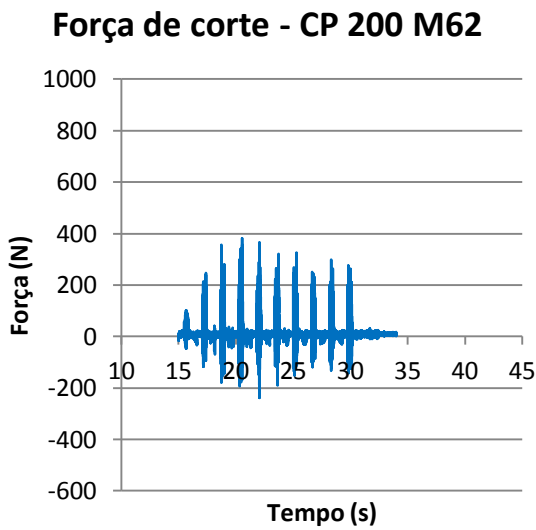
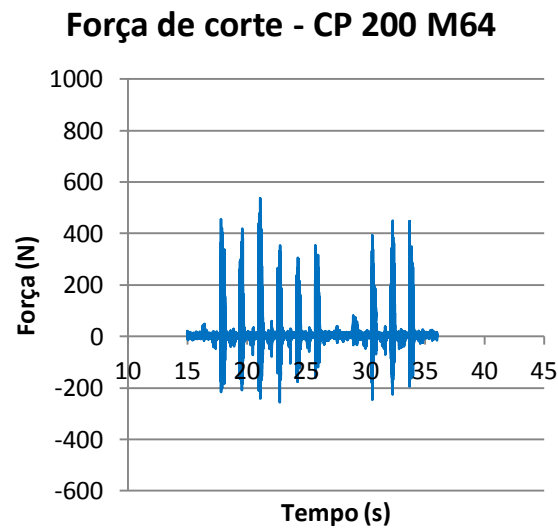
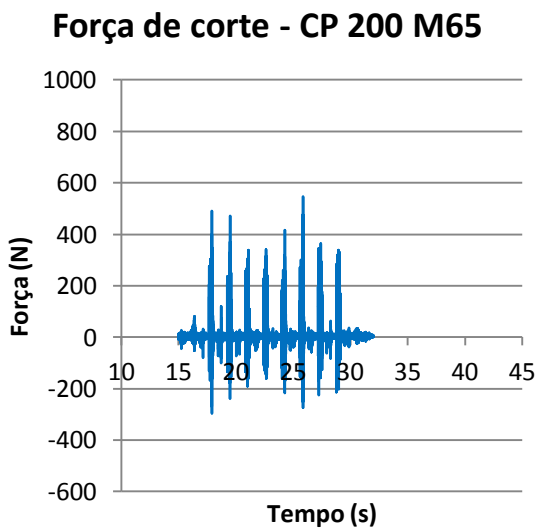
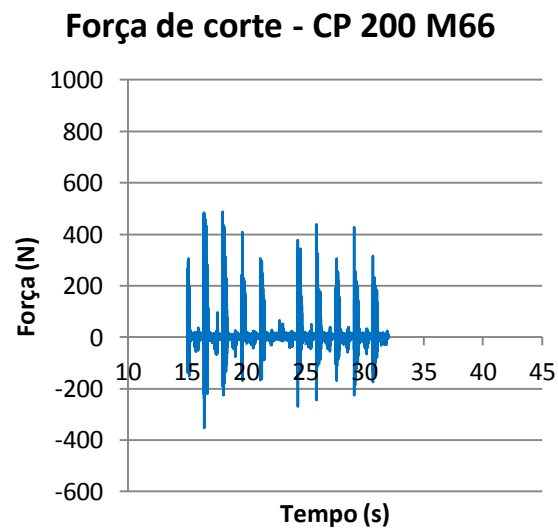
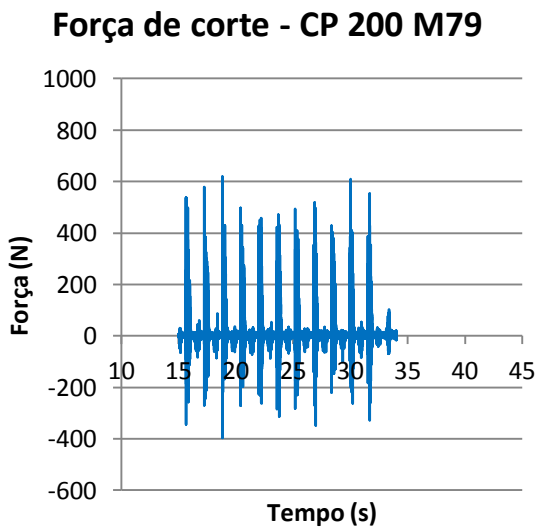


Força de corte - CP 200 C20



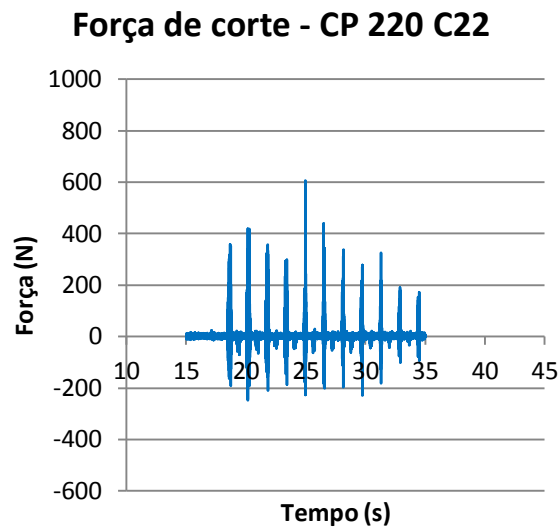
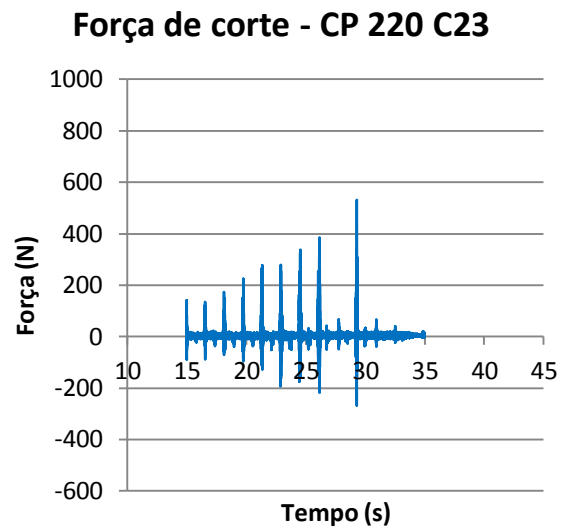
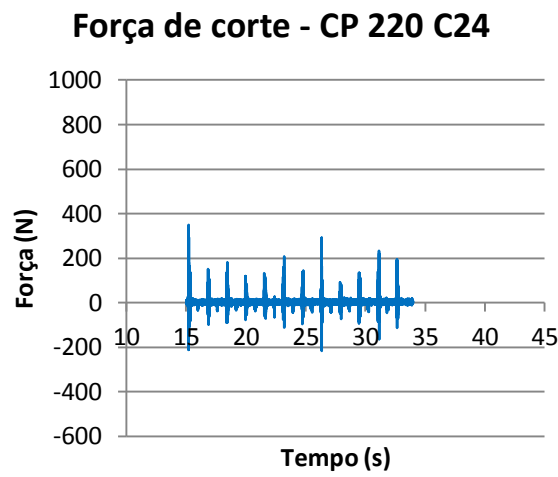
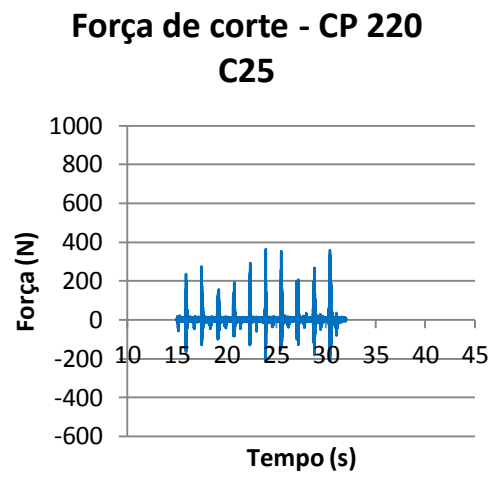
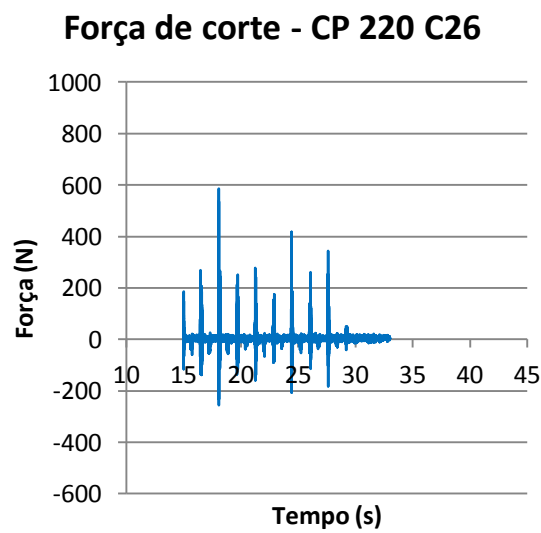
Tratamento térmico: 200°C

Corpos de prova: lenho juvenil



Tratamento térmico: 220°C

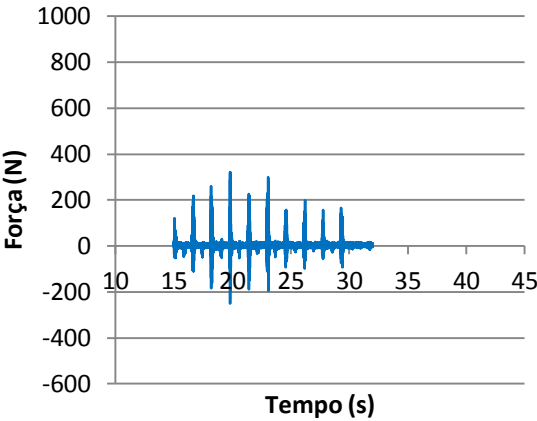
Corpos de prova: lenho adulto



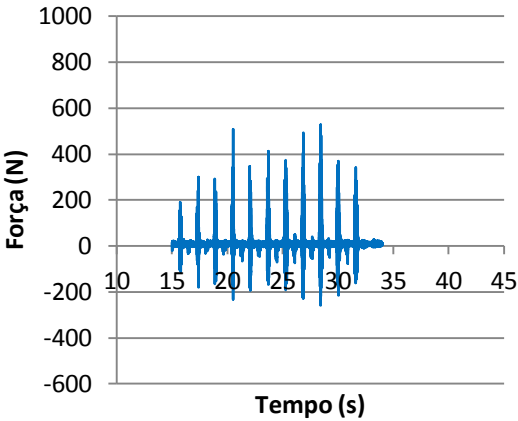
Tratamento térmico: 220°C

Corpos de prova: lenho juvenil

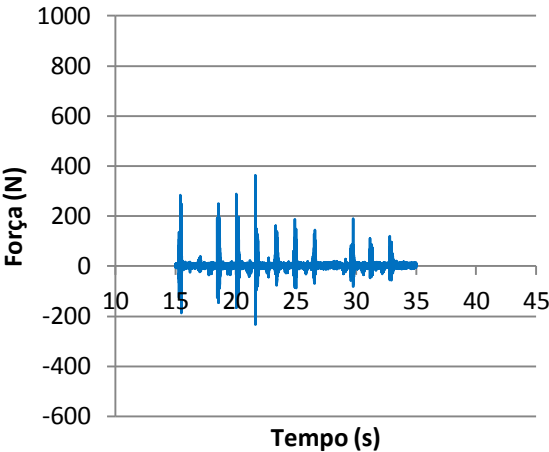
Força de corte - CP 220 M67



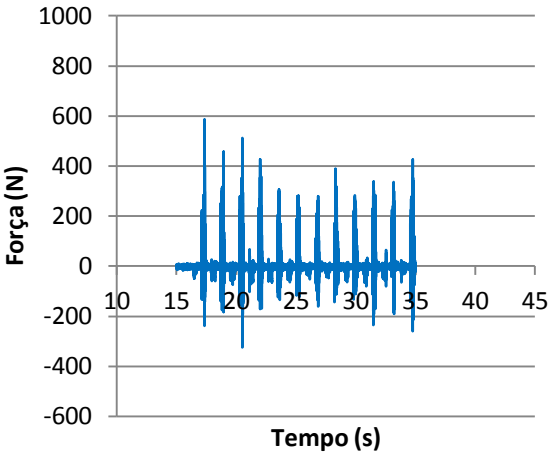
Força de corte - CP 220 M68



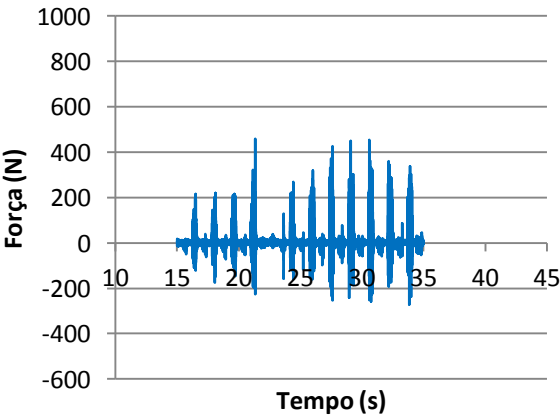
Força de corte - CP 220 M69



Força de corte - CP 220 M70



Força de corte - CP 220 M71



APÊNDICE 2
Análise estatística

Análise de variância (ANOVA) para a perda de massa

Perda de massa					
Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	P
Interação	55,48	3	18,49	F = 2,496	P = 0,0969 NS
Tratamento	3596	3	1199	F = 407,6	P < 0,0001 S
Lenhos	16,29	1	16,29	F = 2,198	P = 0,1576 NS
Residual	118,5	16	7,408		

Teste de médias (Tukey) para a perda de massa

Perda de massa						
	Diferença das médias (%)		Intervalo de confiança a 95%		Teste q	
Tratamentos	L. Adulto	L. Juvenil	L. Adulto	L. Juvenil	L. Adulto	L. Juvenil
160 vs. 180	-1,05	-1,038	-4,948 to 2,847	-4,936 to 2,860	1,033	1,021
160 vs. 200	-3,076	-3,599	-6,974 to 0,8219	-7,497 to 0,2987	3,024	3,538
160 vs. 220	-25,8	-20,56	-29,70 to -21,91	-24,45 to -16,66	25,36	20,21
180 vs. 200	-2,026	-2,561	-5,924 to 1,872	-6,459 to 1,337	1,991	2,517
180 vs. 220	-24,75	-19,52	-28,65 to -20,86	-23,42 to -15,62	24,33	19,19
200 vs. 220	-22,73	-16,96	-26,63 to -18,83	-20,86 to -13,06	22,34	16,67

Os resultados **grifados** são significativos.

Análise de variância (ANOVA) para a massa específica aparente

Massa específica aparente					
Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	P
Interação	0,003256	4	0,0008141	F = 0,2706	P = 0,8934 NS
Tratamento	0,04667	4	0,01167	F = 7,171	P = 0,0009 S
Lenhos	0,1191	1	0,1191	F = 39,61	P < 0,0001 S
Residual	0,06016	20	0,003008		

Teste de médias (Tukey) para a massa específica aparente

Massa específica aparente						
	Diferença das médias (g/cm³)		Intervalo de confiança a 95%		Teste q	
Tratamentos	L. Adulto	L. Juvenil	L. Adulto	L. Juvenil	L. Adulto	L. Juvenil
Test vs. 160	0,0391	0,05898	-0,04786 to 0,1261	-0,02798 to 0,1459	1,816	2,74
Test vs. 180	0,01802	0,04226	-0,06894 to 0,1050	-0,04470 to 0,1292	0,837	1,963
Test vs. 200	0,07122	0,05032	-0,01574 to 0,1582	-0,03664 to 0,1373	3,308	2,337
Test vs. 220	0,08626	0,09678	-0,0006984 to 0,1732	0,009822 to 0,1837	4,007	4,495
160 vs. 180	-0,02108	-0,01672	-0,1080 to 0,06588	-0,1037 to 0,07024	0,9791	0,7766
160 vs. 200	0,03212	-0,00866	-0,05484 to 0,1191	-0,09562 to 0,07830	1,492	0,4022
160 vs. 220	0,04716	0,0378	-0,03980 to 0,1341	-0,04916 to 0,1248	2,191	1,756
180 vs. 200	0,0532	0,00806	-0,03376 to 0,1402	-0,07890 to 0,09502	2,471	0,3744
180 vs. 220	0,06824	0,05452	-0,01872 to 0,1552	-0,03244 to 0,1415	3,17	2,532
200 vs. 220	0,01504	0,04646	-0,07192 to 0,1020	-0,04050 to 0,1334	0,6986	2,158

Os resultados **grifados** são significativos.

Análise de variância (ANOVA) para a força de corte

Força de corte					
Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	P
Interação	88779	4	22195	F = 4,548	P = 0,0089 s
Tratamentos	401504	4	100376	F = 15,15	P < 0,0001 s
Lenhos	230800	1	230800	F = 47,30	P < 0,0001 s
Residual	97595	20	4880		

Teste de médias (Tukey) para a força de corte

Força de corte						
	Diferença das médias (N)		Intervalo de confiança a 95%		Teste q	
Tratamentos	L. Adulto	L. Juvenil	L. Adulto	L. Juvenil	L. Adulto	L. Juvenil
Test vs. 160	-149,8	-153,6	-286,8 to -12,75	-290,6 to -16,57	4,415	4,528
Test vs. 180	-78,98	-136,7	-216,0 to 58,04	-273,7 to 0,3397	2,328	4,029
Test vs. 200	-53,28	-119,5	-190,3 to 83,73	-256,5 to 17,51	1,571	3,523
Test vs. 220	216,2	-15,26	79,23 to 353,3	-152,3 to 121,8	6,375	0,4497
160 vs. 180	70,78	16,91	-66,23 to 207,8	-120,1 to 153,9	2,087	0,4985
160 vs. 200	96,48	34,08	-40,53 to 233,5	-102,9 to 171,1	2,844	1,005
160 vs. 220	366	138,3	229,0 to 503,0	1,315 to 275,3	10,79	4,078
180 vs. 200	25,7	17,17	-111,3 to 162,7	-119,8 to 154,2	0,7575	0,5062
180 vs. 220	295,2	121,4	158,2 to 432,2	-15,60 to 258,4	8,703	3,579
200 vs. 220	269,5	104,2	132,5 to 406,5	-32,77 to 241,3	7,946	3,073

Os resultados **grifados** são significativos.

Análise de variância (ANOVA) para a dureza janka

Dureza Janka					
Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	P
Interação	75541	4	18885	F = 2,674	P = 0,0618 NS
Tratamentos	147512	4	36878	F = 6,663	P = 0,0014 S
Lenhos	16509	1	16509	F = 2,337	P = 0,1420 NS
Residual	141262	20	7063		

Teste de médias (Tukey) para a dureza janka

Dureza Janka						
	Diferença das médias (Kgf/cm²)		Intervalo de confiança a 95%		Teste q	
Tratamentos	L. Adulto	L. Juvenil	L. Adulto	L. Juvenil	L. Adulto	L. Juvenil
Test vs. 160	18,26	-69,95	-125,1 to 161,6	-213,3 to 73,41	0,5145	1,971
Test vs. 180	59,16	-155,9	-84,20 to 202,5	-299,2 to -12,52	1,667	4,392
Test vs. 200	79,57	-88,48	-63,79 to 222,9	-231,8 to 54,88	2,242	2,493
Test vs. 220	201	17,23	57,68 to 344,4	-126,1 to 160,6	5,664	0,4854
160 vs. 180	40,9	-85,93	-102,5 to 184,3	-229,3 to 57,43	1,152	2,421
160 vs. 200	61,31	-18,53	-82,05 to 204,7	-161,9 to 124,8	1,727	0,5221
160 vs. 220	182,8	87,18	39,42 to 326,1	-56,18 to 230,5	5,15	2,456
180 vs. 200	20,41	67,4	-123,0 to 163,8	-75,96 to 210,8	0,575	1,899
180 vs. 220	141,9	173,1	-1,482 to 285,2	29,75 to 316,5	3,997	4,877
200 vs. 220	121,5	105,7	-21,89 to 264,8	-37,65 to 249,1	3,422	2,978

Os resultados **grifados** são significativos.

APÊNDICE 3

Rugosidade

	R _A (μm)		R _V (μm)		R _Z (μm)		
Médias dos pontos	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
1 e 2	9,755	5,795	137,56	59,38	69,385	37,615	Lenho adulto 160°C
3 e 4	17,55	15,73	151,7	163,35	108,73	99,57	
1 e 2	5,58	6,225	41,905	49,855	32,545	37,155	
3 e 4	19,91	22,23	169,1	159,9	111,8	122,9	
1 e 2	6,66	8,025	52,155	70,315	42,63	52,54	Lenho adulto 180°C
3 e 4	16,465	15,48	118,695	98,475	95,955	89,805	
1 e 2	6,11	5,925	65,08	43,87	39,005	34,92	
3 e 4	15,885	19,56	137,6	161,5	100,46	112,2	
1 e 2	5,005	4,29	57,08	41,97	31,06	28,79	Lenho adulto 200°C
3 e 4	16,3	12,38	160,3	115,75	82,3	74,165	
1 e 2	7,48	7,91	66,815	85,955	44,89	45,01	
3 e 4	16,03	9,25	172,45	69,41	108,165	59,11	
1 e 2	7,085	6,34	51,25	51,48	37,13	43,33	Lenho adulto 220°C
3 e 4	9,22	Erro	140,9	Erro	66,56	Erro	
1 e 2	11,71	7,44	138,4	52,93	68,545	46,12	
3 e 4	14,165	Erro	153,6	Erro	100,075	Erro	
1 e 2	11,185	8,15	104,07	63,54	67,26	48,38	Lenho jovem 160°C
3 e 4	12,22	15,215	79,63	120	72,15	92,15	
1 e 2	22,25	18,74	176	146,6	140,7	102,5	
3 e 4	25,45	23,99	166,1	147,5	135,6	135,1	
1 e 2	14,74	13,13	120,05	82,92	90,6	68,89	Lenho jovem 180°C
3 e 4	15,04	8,9	115,41	83,62	90,21	63,69	
1 e 2	8,84	9,77	75,78	82,94	53,57	66,625	
3 e 4	13,755	13,6	90,225	108,59	77,96	83,18	
1 e 2	13,23	13,145	111,05	100,245	79,795	72,085	Lenho jovem 200°C
3 e 4	16,67	17,98	103,8	130	91,95	97,96	
1 e 2	18,35	14,81	117,95	96,15	90,665	78,345	
3 e 4	17,645	14,535	151,45	121,85	103,625	94,72	
1 e 2	9,105	13,12	88,655	109,2	53,655	63,36	Lenho jovem 220°C
3 e 4	25,34	Erro	224,5	Erro	168,4	Erro	
1 e 2	11,045	10,05	98,755	109,815	71,935	64,52	
3 e 4	12,615	8,73	95,985	77,04	79,21	52,14	

APÊNDICE 4

**Relação Massa específica aparente x Força de corte x Dureza
Janka**

Figura 1 - Relação Massa específica aparente X Força de corte X Dureza Janka, corpos de prova do lenho juvenil.

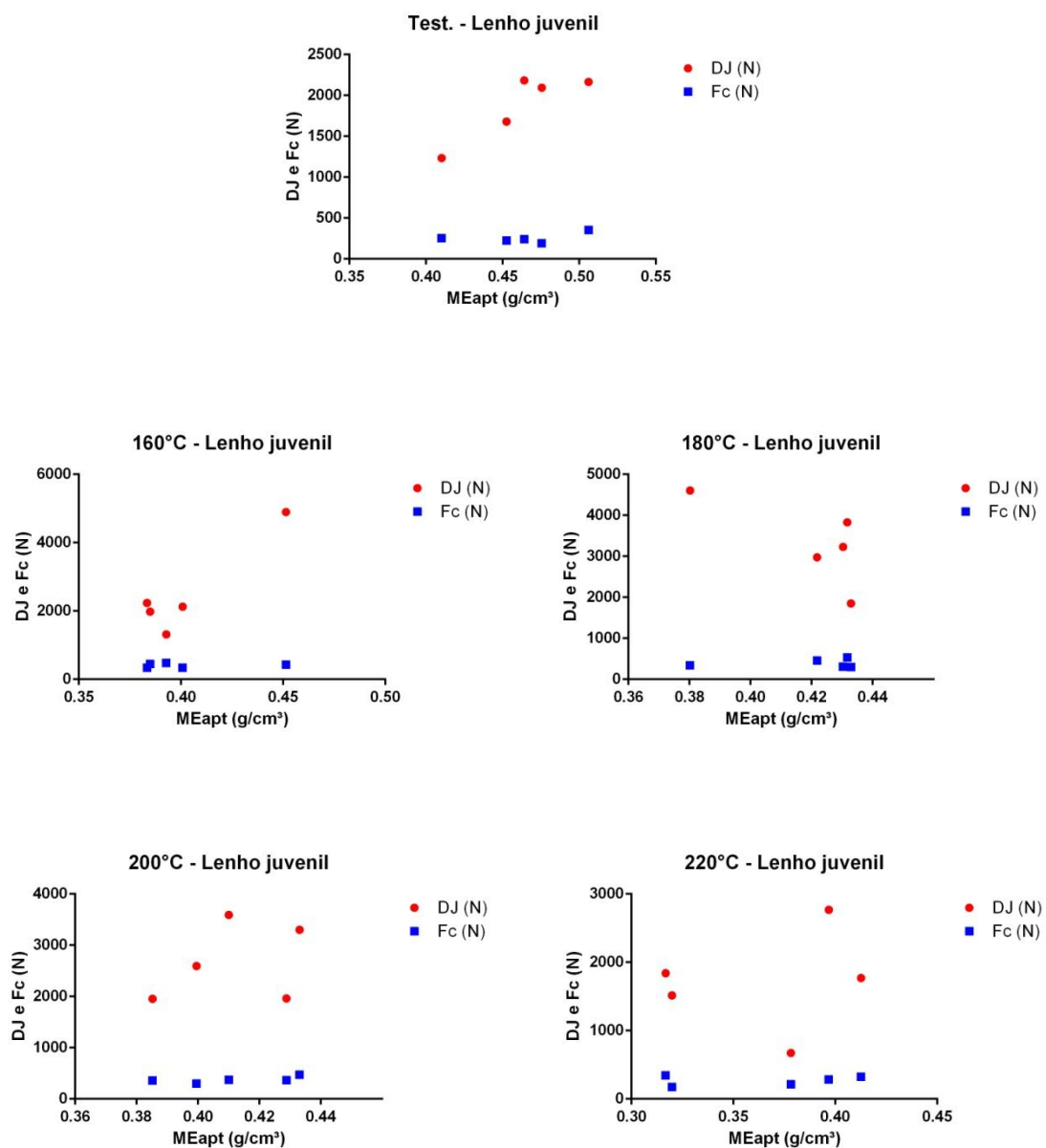
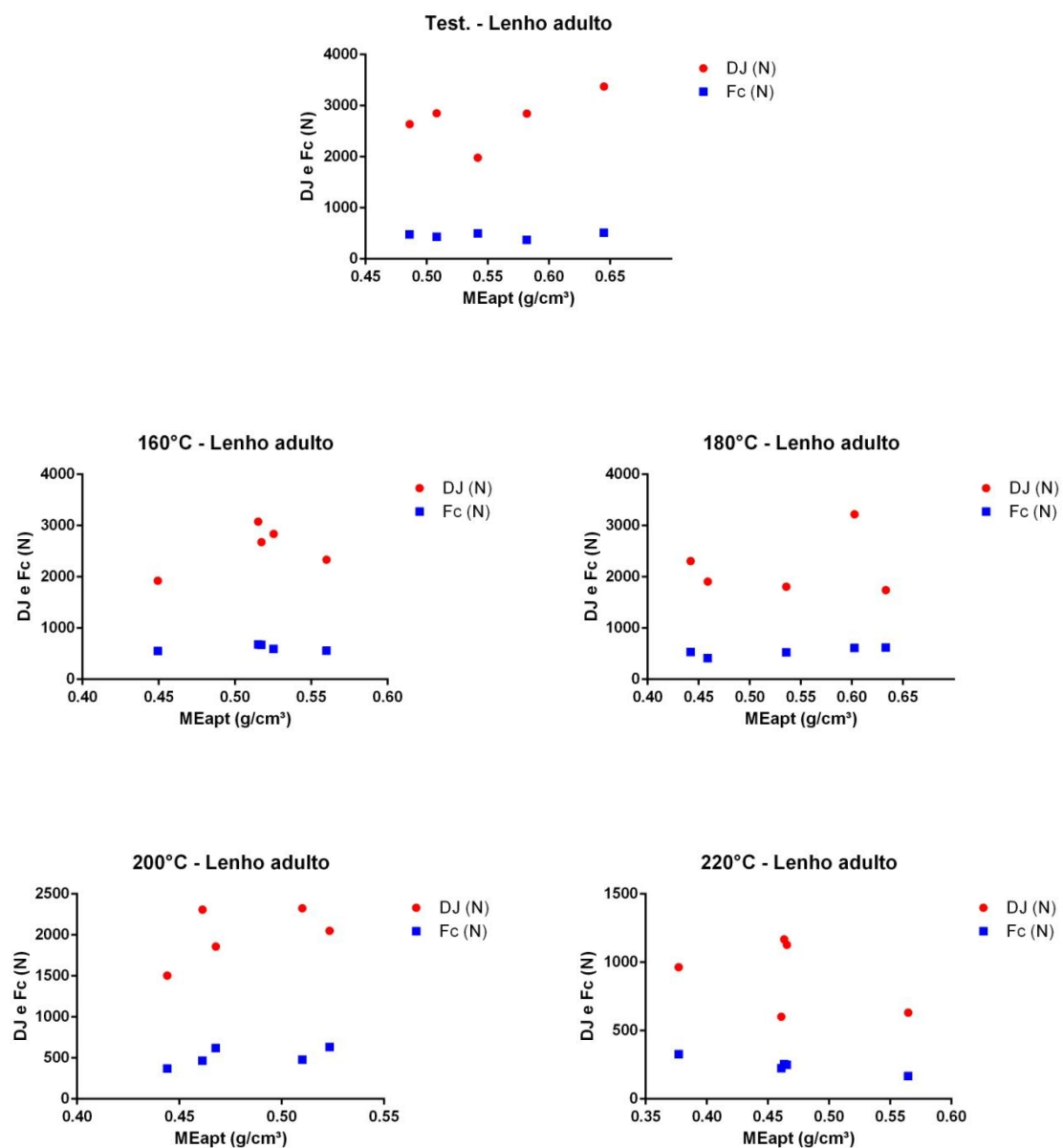


Figura 2 - Relação Massa específica aparente X Força de corte X Dureza Janka, corpos de prova do Lenho adulto.



ANEXO 1

Características do *Pinus elliottii*

Tabela 1 - Características do *Pinus elliottii*

	Nome científico	<i>Pinus elliottii</i> Engelm., Pinaceae.
	Observação	Madeira de reflorestamento.
	Nomes populares	Pinheiro, Pinheiro-americano, Pinus.
	Nomes internacionais	Slash pine, Southern pine (BSI,1991), Southern yellow pine
	Ocorrência no Brasil	Amapá, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo.
	Observação	Espécie introduzida no Brasil.
Características gerais	Características sensoriais	Cerne e alburno indistintos pela cor, branco-amarelado, brilho moderado; cheiro e gosto distintos e característicos (resina), agradável; densidade baixa; macia ao corte; grã direita; textura fina.
	Descrição anatômica macroscópica	Parênquima axial: invisível mesmo sob lente; Raios: visíveis apenas sob lente no topo, na face tangencial é invisível mesmo sob lente; Camadas de crescimento: distintas, transição brusca entre o lenho inicial e o tardio; Canais de resina: visíveis sob lente, em disposição axial e radial.
Durabilidade/ Tratamento/ Trabalhabilidade e/ Secagem	Durabilidade natural	Susceptível ao ataque de fungos (emboloradores, manchadores e apodrecedores), cupins, brocas-de-Madeira e perfuradores marinhos.
	Tratabilidade	Fácil de tratar.
	Trabalhabilidade	Fácil de ser trabalhada. É fácil de desdobrar, aplainar, desenrolar, lixar, tornear, furar, fixar, colar e permite bom acabamento.
	Secagem	Fácil de secar.
Propriedades físicas	Massa específica aparente a 15% UR (Umidade Relativa)	480 kg/m ³ .
	Massa específica básica	400 kg/m ³ .
	Contração	Radial: 3,4%; Tangencial: 6,3%; Volumétrica: 10,5%.
Propriedades mecânicas	Flexão - Resistência	Madeira verde: 48 MPa; Madeira a 15% UR: 69,6 MPa.
	Flexão - Limite de proporcionalidade	Madeira verde: 19,7 MPa.
	Flexão - Módulo de elasticidade	Madeira verde: 6463 MPa.
	Compressão paralela às fibras - Resistência	Madeira verde: 18,5 MPa; Madeira a 15% UR: 31,5 MPa.
	Compressão paralela às fibras - Coeficiente de influência da umidade	6,7%.
	Compressão paralela às fibras - Limite de proporcionalidade	Madeira verde: 13,7 MPa.
	Compressão paralela às fibras - Módulo de elasticidade	Madeira verde: 8846 MPa.
	Dureza janka paralela	Madeira verde: 1932 N.

Fonte: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7

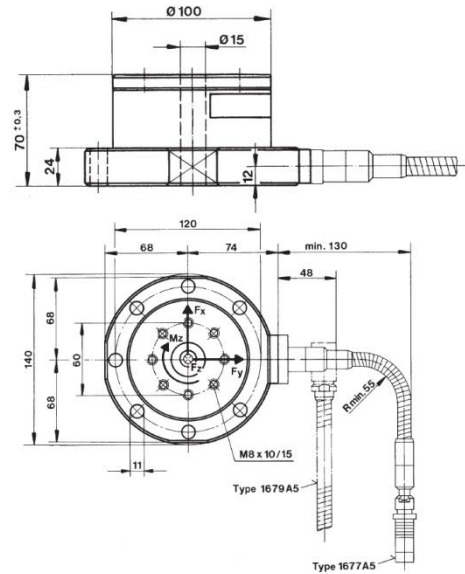
ANEXO 2

Especificação de máquinas e equipamentos

Dinamômetro

Technical Data

Measuring range	F_x, F_y	kN	-5 ... 5 ¹⁾
	F_z	kN	-5 ... 20 ²⁾
	M_z	N·m	-200 ... 200
Calibrated measuring range			
100 %	F_x, F_y	kN	0 ... 5
	F_z	kN	0 ... 20
	M_z	N·m	0 ... 200
10 %	F_x, F_y	kN	0 ... 0,5
	F_z	kN	0 ... 2
	M_z	N·m	0 ... 20 0 ... -20
Overload	F_x, F_y	kN	-6/6
	F_z	kN	-6/24
	M_z	N·m	-240/240
Max. bending moment	M_{bx}, M_{by}	N·m	-400 ... 400
Threshold	F_x, F_y	N	<0,01
	F_z	N	<0,02
	M_z	mN·m	<0,2
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈-7,8
	F_z	pC/N	≈-3,5
	M_z	pC/N·m	≈-160
Linearity, all ranges		% FSO	≤±1
Hysteresis, all ranges		% FSO	≤1
Crosstalk	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	≤±2
	$F_z \rightarrow F_{xy}$	%	≤±1
	$F_{xy} \rightarrow F_z$	%	≤±2
	$F_z \rightarrow M_z$	mN·m/N	≤±0,2
	$M_z \rightarrow F_z$	N/N·m	≤±1
	$F_{xy} \rightarrow M_z$	mN·m/N	≤±0,7
Rigidity	c_x, c_y	kN/μm	≈0,4
	c_z	kN/μm	≈2
	cM_z	N·m/μrad	≈0,7
Natural frequency (mounted on rigid base)	$f_n(x,y)$	kHz	≈3,1
	$f_n(z)$	kHz	≈6,3
	$f_n(M_z)$	kHz	≈4,2



Operating temperature range		°C	0 ... 70
Temperature coefficient of sensitivity		%/°C	-0,02
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	185
	M_z	pF	420
Insulation resistance (20 °C)		Ω	>10 ¹³
Ground isolated		Ω	>10 ⁸
Connector		Fischer flange 9-pole neg.	
Degree of protection EN60529		-	IP67 ³⁾
Weight		kg	4,2

¹⁾ Force application point inside and max. 25 mm above top plate area

²⁾ Force application point max. 20 mm from center

³⁾ With connecting cable Types 1677A5, 1679A5

Amplificador

Technical Data

Charge Amplifier

Number of channels		4
Option		8
Connector type		BNC neg.
Option		Fischer 9-pole neg.
Measuring range FS	pC	±200 ... 200 000
Option	pC	±600 ... 600 000
Error (0 ... 50 °C) typ./max.	%	<±0,3/<±1
Drift, measurement type DC/long		
at 25 °C	pC/s	<±0,05
at 50 °C	pC/s	<±0,2
Frequency range (20 Vpp)	kHz	=0 ... >45

Voltage Output

Connector type		D-Sub 15f
Output voltage	V	±10
Output current	mA	±2
Output resistance	Ω	10
Reset-measure transition	pC	<±2
Zero point error (Reset)	mV	<±10
Output interference signal (0,1 Hz ... 1 MHz)	mVpp	<10

Low-Pass Filter

Order		2
Cutoff frequency (-3 dB)	Hz	100, 300, 600, 1 000, 2 000
Error	%	<±5

High-Pass Filter

Zero point error	mV	<±15
Time constant		
Range 200 ... 200 000 pC	s	10
200 ... 6 269 pC	s	340
6 270 ... 200 000 pC	s	
Time constant		
Range 600 ... 600 000 pC	s	33
600 ... 18 809 pC	s	1 023
18 810 ... 600 000 pC	s	
Error (time constant)	%	<±20

Signal Evaluation

Measurand renewal		
Instantaneous value	ms	300
Minimum value	ms	300
Maximum value	ms	300
Bar display	ms	50

Summing Calculator (Option)

Specifications are valid incl. charge amplifier

Number of summation outputs		6
Error (0 ... 50 °C) typ./max.	%	<±0,5/<±1
Output voltage	V	±10
Output current (short-circuit proof)	mA	±2
Output resistance	Ω	10
Zero point error (Reset)	mV	<±10
Output interference signal (0,1 Hz ... 1 MHz)	mVpp	<10
Frequency range (20 Vpp)	kHz	=0 ... >45

RS-232C Interface

Standard		RS-232C (V.24)
Connector type		D-Sub 9f
Pin allocation		
Pin 2		R X D
Pin 3		T X D
Pin 5		GND RS
Max. input voltage, continuous	V	±20
Max. voltage between signal ground and protective ground	V _{RMS}	<20
Baud rates		1 200/9 600/ 19 200/ 38 400/ 57 600/115 200
Data bit		8
Stop bit		1
Parity		none



RS-232C Interface

Standard		RS-232C (V.24)
Connector type		D-Sub 9f
Pin allocation		
Pin 2		R X D
Pin 3		T X D
Pin 5		GND RS
Max. input voltage, continuous	V	±20
Max. voltage between signal ground and protective ground	V _{RMS}	<20
Baud rates		1 200/9 600/ 19 200/ 38 400/ 57 600/115 200
Data bit		8
Stop bit		1
Parity		none

IEEE-488 Interface (Option)

Standard		IEEE-488.1-1987
Connector type		Microribbon Series 57, (24-pole)
Interface functions		SH1, AH1, L4, LEO, T6, TE0, SR1, RL2, PPO, DC1, DT1, CO, E1
Uniline commands		IFC, REN, EOI, SRQ, ATN
Multiline commands		DCL, SDC, GET, UNL, UNT, SPE, SPD
Address range		0 ... 30

Mains Connection

Mains connector type (2P + E, Protective Class I)	Type	IEC 320C14
Voltage	VAC	100 ... 240
Voltage tolerance	%	±10
Mains frequency	Hz	50 ... 60
Power consumption	VA	20
Voltage between signal ground and protective ground	V _{RMS}	<50

Further Technical Data

Degree of protection IEC60529 (DIN40050)	IP	40
Operating temperature	°C	0 ... 50
Storage temperature	°C	-10 ... 60
Relative air humidity non-condensing	%	<80
Vibration resistance (20 Hz ... 2 kHz, duration 16 min., cycle 2 min.)	g	<10
Shock resistance (1 ms)	g	<200
Case dimensions without frame (WxHxD)	mm	213,4x128,7x230
with frame (WxHxD) (Option)	mm	247,5x142x253,15
Front panel according to DIN 41494, Part 5	HE/TE	3/42
Weight	kg	3,8

ANEXO 3

Imagens diversas

Figura 1 - Corpos de prova ensacados um a um.



Figura 2 - Balança usada para verificação da massa dos corpos de prova.



Figura 3 - Paquímetro utilizado para a verificação dos corpos de prova.



Figura 4 - Lâmina e bisturi utilizados para a escarificação e corte dos espécimes.



Figura 5 - Microscópio eletrônico de varredura.

